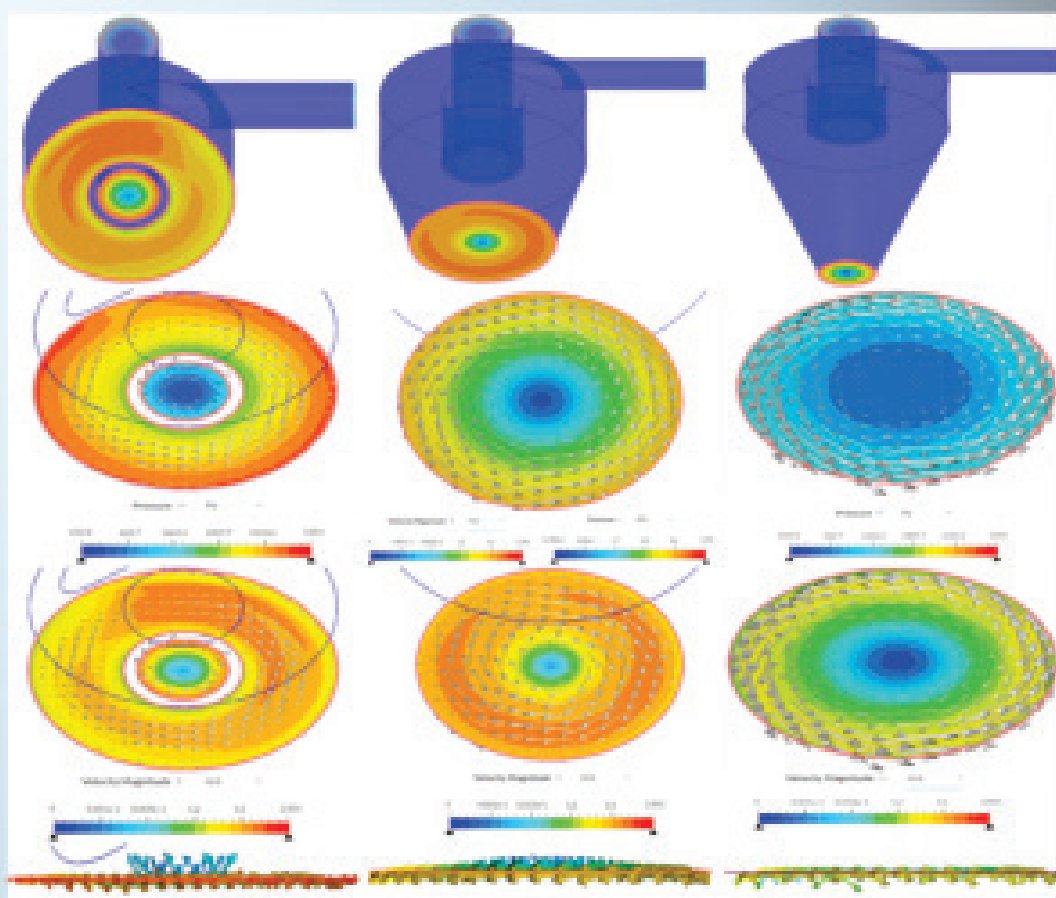


Ciencia Nicolaita 83



diciembre 2021

Revista Científica
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

CIENCIA NICOLAITA

ISSN: 2007 7068

Marco Antonio Landavazo Arias
COORDINADOR DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA

Pedro Corona Chávez
EDITOR

COMITÉ EDITORIAL

Luca Tessieri, Instituto de Física y Matemáticas, **Sabina Irene Lara Cabrera**, Facultad de Biología, **Martina Medina Nava**, Facultad de Biología, **María Lourdes González Arqueros**, Conacyt-Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, **Jeannette Sofía Bayuelo Jiménez**, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, **José Miguel Cervantes Alfaro**, Facultad de Medicina, **Jorge Alejandro Verduzco Martínez**, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales, **Claudio Rubén Fuerte Esquivel**, Facultad de Ingeniería Eléctrica, **Jesús Cirilo Trujillo Jiménez**, Facultad de Ingeniería Mecánica, **Elia Mercedes Alonso Guzmán**, Facultad de Ingeniería Civil.

COMITÉ EDITORIAL EXTERNO

Daniele Colosi, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelia, México, **Carlos Alonso Maya Lastra**, Columbia University, Department of Ecology, Evolution and Environmental Biology (USA), **Rafael Ángel Reyna-Hurtado**, Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Campeche, México, **Zayre Ivonne González Acevedo**, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México, **Ramón Marcos Soto Hernández**, Colegio de Postgraduados, Posgrado en Botánica, Estado de México, **María Esther Olvera Cortés**, Centro de Investigación Biomédica de Michoacán, Instituto Mexicano del Seguro Social, México, **Ignacio Alejandro Figueroa Vargas**, Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, **Enrique Acha**, Profesor Emérito en la Universidad de Tampere, Finlandia, **Víctor Manuel Ambríz Díaz**, Instituto Tecnológico de Chihuahua, **Luis Fernando Guerrero Baca**, Universidad Autónoma Metropolitana, México.

Asistentes Editoriales: Sergio Ramírez Murillo, Naborina Villaseñor Santoyo, Rafael Orozco Flores;
Administrador de Página Web: Hugo Cesar Guzmán Rivera

Revista Ciencia Nicolaita

Número 83, enero 2022

<https://www.cic.cn.umich.mx/cn/issue/view/31/3>

Contenido

Directorio

Presentación

Pedro Corona Chávez

Editor

Volumen especial “Tendencias actuales en la Ciencia”

Martina Medina Nava, José Miguel Cervantes Alfaro, Claudio Rubén Fuerte Esquivel
Editores invitados

Etnoedafología mexicana: 43 años de experiencia.

Ortiz Solorio C. A. y Gutiérrez Castorena M. C.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.567>

137

Retos y perspectivas del sector acuícola rumbo al 2050.

Martínez-Chávez, C. C., Navarrete-Ramírez, P., Raggi, L., Ríos-Durán, M. G., Fonseca-Madrigal, J., Chávez-Sánchez, M.C., Amillano-Cisneros, J.M., Martínez-Palacios, C.A. 2021.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.572>

153

Assessment of the wind power generation uncertainty on the steady-state operation of electric power systems.

Sandoval Pérez U.F., Fuerte-Esquivel C.R.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.573>

183

A philosophical look at mathematics and related sciences from the beginning to the future.

Wagner, E.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.578>

200

La ciencia de la ecología en México ante los retos del cambio global.

Suazo-Ortuño I., Martínez-Ramos M y Del Val de Gortari E.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.579>

232

Retos y oportunidades de la fundición en México.

Guerra F. V., Bedolla-Jacuinde A., Verduzco J.A., Borja-Soto, C., Pacheco-Cedeño S

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.580>

248

Miscelanea

Estudio experimental de transferencia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina.

Jiménez Macedo V. D., Rubio Maya C., Pacheco Ibarra, J.J., Cortéz Neri E.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.563>

257

Medición de temperatura en distintas partes en un motor de combustión interna a velocidades 800 y 1000 rpm.

Piña Castillo J.J., González Bernal R.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.566>

267

Modelación y construcción de un hidrociclón.

González Bernal R., Cirilo Trujillo Jiménez J. C.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.571>

278

Diseño y construcción de un generador por lotes a diferencia de presiones para la producción de microburbujas.

Franco Gutiérrez, F., Figueroa Espinoza, B., Aguilar-Corona A.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.582>

289

Ciencia Nicolaita, número 83, enero 2022

Presentación

El número 83 de la revista **Ciencia Nicolaita** se propone continuar con la publicación de **Volúmenes Monográficos** relacionados con las diversas áreas del conocimiento de ciencias, ingeniería y arquitectura, con énfasis en las investigaciones activas de la UMSNH como núcleo del contenido, pero mantiene la búsqueda permanente de lograr un alcance externo a nivel nacional e internacional.

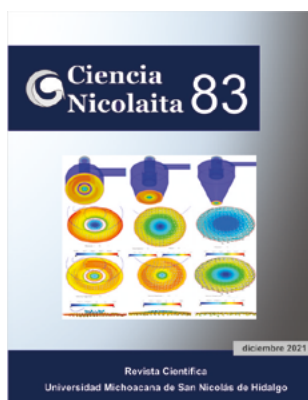
El número 83 de la Revista **Ciencia Nicolaita** representa el segundo volumen monográfico: **“Tendencias actuales en la Ciencia”**. La emisión de la convocatoria, así como el cuidado de la revisión y edición de cinco valiosas contribuciones estuvieron a cargo de **Martina Medina Nava, José Miguel Cervantes Alfaro y Claudio Rubén Fuerte Esquivel** todos miembros del Comité Editorial de la Revista Ciencia Nicolaita y destacados investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. De este modo, este volumen especial incluye diferentes artículos donde se discute la relevancia y estado actual del conocimiento de tópicos como la etno-edafología, acuicultura, energía eólica, matemáticas, ecología y la fundición en México y el mundo.

El número 83 de la revista **Ciencia Nicolaita**, mantiene su compromiso para difundir contribuciones de diversas áreas del conocimiento, incluyendo también en la sección de miscelánea, cuatro contribuciones relevantes en la ingeniería mecánica, metalurgia y las ciencia de los materiales.

Esperamos que la calidad del contenido de los artículos de este número y en especial la continuidad de la propuesta de edición de volúmenes monográficos pueda ser un estímulo para la publicación de nuevas contribuciones de diversas áreas del conocimiento, así como se observe como una oportunidad para leer y promover el envío de un mayor número de contribuciones a nivel nacional e internacional.

Pedro Corona Chávez

Editor



Etnoedafología mexicana: 43 años de experiencia

Carlos Alberto Ortiz Solorio y María del Carmen Gutiérrez Castorena

Para citar este artículo: Ortiz Solorio C. A. y Gutiérrez Castorena M. C. 2022. Etnoedafología mexicana: 43 años de experiencia. Ciencia Nicolaita, número 137-152. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.567>



[Ver material suplementario](#)



[Publicado en línea, enero de 2022](#)



[Envíe su artículo a esta revista](#)

Etnoedafología mexicana: 43 años de experiencia

Carlos Alberto Ortiz Solorio* y Ma del C. Gutiérrez Castorena

Área de Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos. Programa de Edafología. Campus Montecillo.
Colegio de Postgraduados. Km. 36.5 Carretera México-Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México.

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 9 de septiembre de 2021

Aceptado: 8 de noviembre de 2021

RESUMEN

En el presente escrito se menciona la historia de la línea de investigación denominada Etnoedafología o Etnopedología, con más de 40 años de experiencia en nuestra institución. La dividimos para su descripción en tres etapas: Período Inicial 1978-1981, en el que se conoció a la Dra. Barbara J. Williams y su enfoque histórico, basado en códigos de inicios la colonia; Período Intermedio 1981-1987, iniciando trabajos con el conocimiento local contemporáneo, cometiendo errores y aprendiendo de ellos; y, Período Cartográfico 1987-2021, demostrando que era posible realizar mapas de suelos de alta calidad, rápidos, baratos y sencillos, mezclando el conocimiento de los productores con el científico. Finalmente, el impacto de esta disciplina a nivel nacional e internacional.

PALABRAS CLAVE: Conocimiento local, entrevistas, usos de la tierra, Clasificación de suelos.

ABSTRACT

In the present writing the history of the research line called Ethnoedaphology or Ethnopedology is mentioned, with more than 40 years of experience in our institution, which we have divided for its description into three stages: Initial Period 1978-1981, in that Dr. Barbara J. Williams and her historical approach, based on early colony codices, was met; Intermediate Period 1981-1987, starting work with contemporary local knowledge, making mistakes and learning from them and; Cartographic Period 1987-2021, demonstrating that it was possible to make high-quality, fast, cheap and simple soil maps, mixing the knowledge of the producers with the scientific one. Finally, the impact of this discipline at the national and international level.

KEYWORDS: Local knowledge, interviews, land uses, Soil Classification.

1. Introducción

En México el realizar investigación científica resulta más difícil que en instituciones de gran prestigio como Harvard u Oxford, debido a que no sólo se requiere conocimiento y creatividad, sino también la obtención de todos los medios para desarrollarla. En el presente escrito se pretende dejar constancia histórica de las experiencias obtenidas en los más de 40 años de la línea de investigación sobre la etnoedafología por dos de sus líderes, con 43 y 24 años, en el Colegio de Postgraduados.

Para su descripción se ha dividido en tres etapas: el Período Inicial (1978–1981), donde se conoce a la Dra. Barbara Williams y sus trabajos sobre los Códices de Santa María Asunción y el Vergara, elaborados a inicios de la colonia, con la característica de contar con glifos de parcelas y dentro de ellas la representación pictórica de los suelos que poseían; además, contar con el reconocimiento de la propuesta del término Ethnopedology. El Período Intermedio (1981–1987), en el cual se comienza a trabajar con información contemporánea de los productores, se reconocen errores por la falta de experiencia, se proponen alternativas metodológicas y se establece la existencia de conocimientos sobre suelos en el campo mexicano. Finalmente, el Período Cartográfico (1987–2021) mencionando que nuestro grupo fue el primero a nivel mundial en la elaboración de mapas a partir del conocimiento local, a través de una mezcla de conocimientos, el de los productores con el científico, manteniendo sus características y no confrontándolos.

Los mapas fueron evaluados y comparados con las Cartas Edafológicas del INEGI y con Levantamientos de Suelos de Instituciones Educativas como los del propio Colegio de Postgraduados. Los resultados mostraron, que no sabíamos hacer mapas de suelos, por-

que los realizados con el conocimiento local eran muy superiores en términos de precisión (definición de los suelos dentro de una unidad cartográfica) y de exactitud (ubicación de linderos).

A nivel nacional se han realizado estudios en más de 60 ejidos con mapas al menos en 23 estados, todos con datos que revelan la necesidad de cambiar las estrategias de investigación agrícola, por los numerosos fracasos que no son fácilmente aceptados, tanto en la agricultura de riego como en la de secano. Asimismo, la forma actual de la transferencia de tecnología generada en los campos experimentales que está destinada al fracaso, ya que una y otra vez se ha demostrado que la mejor manera es de productor a productor y en el mismo tipo de tierra/suelo.

A nivel internacional ha sido altamente satisfactorio por los reconocimientos de nuestras contribuciones en Bélgica, Brasil, Holanda, España y en países asiáticos o las opiniones de científicos australianos o de instituciones como la FAO, la UNESCO o la Academia de Ciencias de Bélgica. De la misma manera destacamos el uso de su terminología en libros de texto de la ciencia del suelo con mucho prestigio o en Enciclopedias de Suelos donde ahora se menciona que un procedimiento para realizar levantamientos de suelos es el etnopedológico.

En América Latina es grato conocer las tesis universitarias realizadas a diferentes niveles académicos sobre la Etnoedafología y en particular su gran aceptación por profesores y estudiantes.

2. Período Inicial 1978-1981

La Etnopedología o Etnoedafología, que para nosotros son sinónimos, inició en 1978 con la llegada al Colegio de Postgraduados de la Dra. Barbara J. Williams cuando visitó al maestro Efraím Hernández Xolocotzin, pro-

blemente el más famoso etnobotánico de nuestro país. Dado que el interés de la doctora era sobre suelos, el maestro Xolocotzin la envió a la Rama de Suelos, con el Dr. Heriberto Cuanelo de la Cerda, quién en ese período era el presidente de la Rama hoy conocida como Programa de Edafología. Como el Dr. Cuanelo no disponía de tiempo, comisionó al primer autor como ayudante de la Dra. Williams para todo el trabajo de campo.

La Dra. Williams venía a México con un proyecto que trataba de estudiar el impacto de 500 años de agricultura en Tepetlaoxtoc, Estado de México, lugar histórico dado que fue el origen de tres códices conocidos como: Kingsborough, Santa María Asunción y Vergara. El Códice de Santa María Asunción (CSMA) es un manuscrito de ochenta folios que se elaboró en el periodo de contacto entre los nativos y los europeos (alrededor de 1546) en Tepetlaoxtoc, Edo. de México y el Códice Vergara fue pintado entre 1543 y 1544. Estos códices registran las tierras de cada casa y también un sistema para clasificación de suelos (Williams y Hicks, 2011).

Ella, como académica de la Universidad de Wisconsin, sólo estaba autorizada para una estancia corta, que prácticamente se restringía al verano. Afortunadamente esa acción se repitió los dos años siguientes (1979 y 1980), tiempo suficiente para conocer sus investigaciones principalmente las relacionadas con el Códice de Santa María Asunción (Williams y Harvey, 1997), sobre el lenguaje pictórico de los glifos y la representación y nombres de las tierras. Se aprendió sobre cada clase de tierra: por ejemplo, el *Atoctli* que viene de la lengua náhuatl *atl*, agua y *toctli* caña de maíz, que se definía como la tierra que ha traído el agua y es buena para producir maíz. También, a través del trabajo de Harvey y Williams (1980), se conoció la forma como median los perímetros y las áreas de sus parcelas con la aritmética azteca o acolhua, que era de base 20

y que también consideraban al cero. Además, se aprendió cómo realizar *entrevistas* a los productores para generar la información local sobre sus tierras, las cuales deberían tener las siguientes tres características: a) libres; b) espontáneas; y c) no remuneradas (Williams y Ortiz, 1981).

Después de sus tres visitas al sitio de interés nos percatamos de que no sería posible generar información sobre el impacto de la agricultura durante 500 años. Si bien en Tepetlaoxtoc, el conocimiento local reconocía clases de tierras (negras y amarillas) e incluso se mencionaban a los tepetates, las tierras no tenían relación con los códices. El proceso de culturización fue tan severo que borró todas las huellas de esos documentos en la población de esa pequeña comunidad de tiempos prehispánicos. Cada clase de tierra que conocían los productores, las visitamos, muestreamos y analizamos posteriormente en el laboratorio. Al final se publicó un artículo (Williams y Ortiz, 1981), que versaba sobre la taxonomía popular de suelos (*folk soil taxonomy*), en el cual se reportó el trabajo de campo.

En ese artículo se propuso y se definió el término de *Etnopedología*, una ciencia que por primera vez contemplaba el conocimiento local o campesino de los suelos. Treinta años después, Krasilnikov y Tabor (2011) reconocían que Williams y Ortiz-Solorio habían acuñado ese nombre, además, textualmente indicaron:

“La Etnopedología, usa el término Pedología como su raíz, pero se aplica en un contexto mucho más amplio, para incluir cómo la gente entiende, aprecia y maneja a sus tierras a diferentes escalas espaciales. Es una disciplina científica que relaciona lo social con lo natural”.

Otros aspectos relevantes del artículo de Williams y Ortiz (1981) fueron: a) establecer la poca correspondencia entre el concepto científico de suelos y el equivalente campesino-

no de tierra y; b) proponer un sistema jerárquico para la clasificación de tierras, siguiendo las propuestas de la taxonomía popular. En esa época se creía que los campesinos sólo consideraban a la capa arable, es decir, era bidimensional, mientras que para el científico lo definía como tridimensional.

La etapa inicial dejó muchas ideas e inquietudes, como descubrir la existencia de otro conocimiento sobre los suelos o tierras por parte de los campesinos y comunidades indígenas, que era eminentemente práctico y no se parecía a lo que nos habían enseñado en las aulas.

El lema de nuestra *alma mater*, la Escuela Nacional de Agricultura ahora Universidad Autónoma Chapingo dice “Enseñar la Explotación de la Tierra, no la del Hombre”. Bajo este lema, se nos instruyó como agrónomos para producir y a su vez instruir a los agricultores sobre cómo hacerlo; por lo tanto, nunca hubo interés de nuestros profesores por considerar cualquier tipo de conocimiento local, campesino, indígena o étnico. Nuestra formación, como especialistas en suelos, estuvo centrada en el método científico y no empataba con el conocimiento empírico de los productores. Cuando asistíamos a foros académicos, para mostrar nuestros estudios, fuimos blanco de muchos cuestionamientos y duras críticas.

Este tipo de formación académica y desprecio al conocimiento local se puede comprender a través de la obra de Gibson (1996), quien indicaba que desde la colonia se tuvo una política de desprestigio al conocimiento autóctono de las tierras. Los nombres de las clases de tierra de mala calidad, como las tequexquitosas (salinas) y los tepetates se conservaron y las demás tierras recibieron un nombre en español. También mencionó que, desde entonces, las ideas dominantes provenían del exterior e internamente sólo nos que daba implementarla; es decir, el conocimiento local no tiene validez y sólo se puede aspirar a

ser una buena mano de obra.

Durante este período inicial, nosotros también sobredimensionamos a la clasificación nahua o acolhua de suelos, sobre todo cuando consultamos la obra de Fray Bernardino de Sahagún (Sahagún, 2016). Al principio se creía que cada glifo, representado en los códices de Santa María Asunción y de Vergara, correspondían a una clase de tierra. De hecho, Williams y Harvey (1997) reportaban 100 variantes de suelos de acuerdo con los glifos sólo del código de Santa María Asunción en Tepetlaoxtoc. Durante varios años se trató de encontrar esta gran variación de suelos sin conseguirlo e incluso el conocer su significado pictórico. Fue hasta hace pocos años cuando se hizo un estudio detallado de suelos y se encontró que en la zona de influencia del código se presentaban únicamente Leptosols, Regosols, Fluvisols y Anthrosols, estos últimos generados por la formación de terrazas (Gutiérrez-Castorena et al., 2017).

También se tuvo la creencia de que los Acolhuas-Aztecas estaban más adelantados que los europeos en el conocimiento de las tierras/suelos, incluso por varios siglos, si se le comparaba con el origen de la moderna Ciencia del Suelo. Como se sabe, su estudio sistemático inició a finales del siglo XIX, con la escuela rusa de Vasilii Dokuchaev (Boul et al., 2008).

Con esa ilusión se creyó que sería importante y conveniente dar a conocer la existencia de ese otro tipo de conocimiento sobre los suelos. No se tenía ni la menor idea de que se abría la caja de pandora, al confrontar el conocimiento científico y el conocimiento tradicional. Bajo esas dos corrientes de pensamiento se nos presentaron dos grupos totalmente antagónicos; contextualmente, un grupo se puede representar por Agrawal (1996), quien comentaba que el conocimiento científico era superior, mientras que el tradicional era un obstáculo para el desarrollo. En el otro extremo estaba Iwanska (1971), quien reportaba que los mazahuas, del

Estado de México reconocían que eran ignorantes en todos los campos del conocimiento, excepto en el de los suelos, proclamando incluso su superioridad al de los ingenieros.

3. Período Intermedio 1981-1987

Nos quedarnos solos y las referencias históricas no nos permitían realizar avances en el conocimiento campesino de tierras, pero no evitó que comenzáramos a trabajar con el conocimiento contemporáneo de los productores sobre suelos de diferentes etnias del país. Nuestra falta de formación y experiencia para comunicarnos con los productores eran evidentes, así como el identificar que los técnicos y los productores utilizábamos diferentes lenguajes para referirnos al mismo objeto: *suelo* para los científicos y *tierra* para los agricultores.

En una ocasión se le preguntó a un productor —¿cuántos tipos de suelos conoce? y nos respondió, —sólo uno y todos son de tierra. La pregunta que en realidad se hacía se entendía cómo, —¿Cuántos tipos de *pisos* conoce? En ese sentido, la respuesta del productor era correcta. Además, esta experiencia nos permitió darnos cuenta de que sería muy fácil distorsionar las respuestas e incluso llegar a considerar que los productores no tenían conocimiento de ese recurso y en consecuencia dar carpetazo a ese tipo de investigaciones.

Pronto se aprendió que, si queríamos ser interlocutores, deberíamos tener un cambio de mentalidad, entrevistar a la gente directamente en campo y establecer con ellos una igualdad de condiciones. En una plática, con un agricultor ya anciano, le manifestamos nuestro interés en saber sobre sus tierras/suelos y nos respondió, —¿que él no sabía que nosotros éramos los que teníamos ese conocimiento! Le comentamos que lo que realmente nos interesaba era su experiencia sobre tierras/suelos y contestó, —¡Ah quieren comenzar a barrer por su casa! La respuesta nos dejó una profunda huella y nos mostró que nos dirigíamos en la dirección

correcta.

En los primeros trabajos, por falta de experiencia, se cometieron errores y tuvimos que aprender en la marcha y tratar de motivar a nuestros estudiantes para generar adeptos a estas ideas. Al ser profesor del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma de Chapingo, pronto tuvimos tesisistas entusiastas a nivel de licenciatura. El primero fue Pedro Luna Orea quien realizó un levantamiento de suelos en 1980 en los terrenos del ex lago de Texcoco y comparó esa información con el conocimiento de las tierras reconocidas en Atenco, México (Luna, 1980). La segunda tesis se elaboró en Yucatán, en el municipio de Oxtutz usando la clasificación maya de suelos y con el cultivo de naranja (Pérez-Pool, 1984). La tercera tesis estudió la clasificación Otomí de las tierras en el Valle del Mezquital, en Hidalgo (Quiroz, 1984).

En todos los estudios se obtenían muestras de suelos sólo de la capa arable y para cada clase de tierra reconocida localmente por los productores se caracterizaban y analizaban con el fin de realizar una comparación entre ellas. Algunos resultados pueden parecer ahora muy obvios, pero se abría una beta de conocimiento que no estaba en las bibliotecas. Fue muy emocionante encontrar, en el municipio de Atenco, Estado de México, que la tierra de barro contenía el mayor porcentaje de arcilla; que la tierra arenosa poseía la mayor cantidad de arena o que la tierra blanca contaba con el porcentaje más alto de carbonatos de calcio, así como reconocer que la tierra salina resultaba con la mayor conductividad eléctrica (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 1999).

También comenzamos a aplicar técnicas estadísticas multivariadas, como el análisis de conglomerados cuyos dendrogramas resultantes tenían un paralelismo con la opinión de los productores (Ortiz y Gutiérrez, 1999). Los sonidos que producen las tierras al pisarlas fue otra forma de caracterización, como sucedió

con las tierras Cacahuatudas de Atenco, Estado de México, que cuando los agregados están secos producen un sonido semejante a un cacahuate o cuando los Otomís mencionaron que identificaban a las tierras salinas porque se la comían los chivos (Quiroz, 1984).

Al confrontar los resultados obtenidos en el ex lago de Texcoco con los del Valle del Mezquital, a pesar de tratarse de etnias diferentes, los resultados de clases de tierras semejantes eran parecidos. La mayoría de los productores comentaban que las mejores tierras eran aquellas que podían producir a un mayor número de cultivos; que en general, no les gustaban los fertilizantes (o abono químico), porque necesitaban agua o quemaban a las plantas y que preferían aplicar estiércol o bien que el rastrojo que producían algunas clases de tierras no le gustaba a su ganado (Ortiz, 2019).

En 1982, nuevamente Luna Orea se convierte en el primer estudiante de maestría en hacer una tesis en etnoedafología, al realizar una comparación de la clasificación campesina de tierras en dos comunidades del Valle de México (Luna, 1982). En 1983 se graduó a la primera estudiante de postgrado, Georgina Calderón, quien desarrolló una investigación sobre dos zonas chinamperas, en Maquixco, Estado de México y en Mixquic, Cd. de México (Calderón, 1983), lo que permitió saber que la formación de chinampas no era exclusiva de Xochimilco, sino que se presentaban en varios lugares del país.

Es importante mencionar que el artículo de Luna se publicó en el Colegio de Postgraduados seis años después de su titulación (Luna, 1988), pues los comités editoriales consideran que este conocimiento no era científico. Otras investigaciones no se aceptaron para su publicación o bien se redujeron a ensayos porque utilizaron a las clases de tierras campesinas para determinar el origen de los suelos, como en la publicación de Gutiérrez-Castorena *et al.* (1999).

En la década de los años 1980's se incorporan a nuestro grupo de esta línea de investigación, personal académico del Colegio, previo convencimiento que no fue fácil, siempre contracorriente, como Damián Martínez Díaz y David Pájaro Huertas. El primero tuvo el interés en desarrollar a la Etnoedafología Forestal mostrando que también existía ese conocimiento; mientras que el segundo, siendo oriundo de San Salvador Atenco, Estado de México, nos ayudó a convertir a su ejido en nuestro campo experimental por un buen número de años y todo lo que nos interesaba conocer de los saberes locales o las hipótesis que se formulaban, ahí se sometían a prueba.

Cuando nos enteramos de que durante el reparto agrario, por parte del presidente Lázaro Cárdenas, en 1939, el Ejido de Atenco estaba constituido principalmente por tierras salinas y que para los años 80s esa clase de tierra representaba sólo una pequeña superficie, surgió el interés de conocer cómo habían hecho para eliminar las sales de los suelos y dio origen a otra tesis de licenciatura, la de Antonio Rodríguez (1990) quien no sólo trabajó en Atenco, sino también incluyó a otro ejido vecino, Acuexcomac, del Estado de México. Se realizaron entrevistas, se obtuvo información del procedimiento y de los ingredientes. Los productores rehabilitaron sus tierras utilizando estiércol bovino y agua de río.

Otro estudio fue el relacionado con el uso de la ceniza doméstica como mejorador de la compactación de suelos arcillosos, como sucede en las tierras cacahuatudas, que al presentar baja estabilidad estructural forman una costra que no deja germinar a las semillas (Carrillo, 1991). Lo interesante de este estudio fueron dos aspectos: uno que jamás hubiéramos pensado en ese mejorador y el segundo fue el conocer la existencia de un instituto dedicado a la aplicación de cenizas en la agricultura. A estas tierras se les llegó a considerar como Anthrosols con problemas de labranza (Gutiérrez

y Ortiz, 1992).

Espinosa (1987) realizó su trabajo de investigación sobre la caracterización, distribución y uso de arvenses en las diferentes clases de tierras del ejido de Atenco. En esa tesis de maestría se mostró parte de la cosmovisión de los productores tradicionales, es decir, a diferencia de la agricultura comercial donde se trata de eliminar toda competencia al cultivo de interés, el productor tradicional trata de aprovechar todo lo que la naturaleza le da.

A finales de esta década, las cosas cambian y la comunidad académica comienza a reconocer el conocimiento local, campesino o indígena y nuestra área de estudio se incrementa hasta trabajar en varios estados de nuestro país.

Lo más importante del periodo intermedio fue descubrir que los campesinos utilizan una nomenclatura sobre suelos/tierras y poder establecer los diferentes usos que tenía la clasificación campesina de las tierras. Además, que la clasificación de suelos/tierras que poseen los agricultores es, sin duda alguna, para fines utilitarios pues particularmente se relacionan con cultivos específicos, con el uso de abonos, con la labranza y las herramientas de trabajo, con arvenses, con métodos de recuperación y con usos no agrícolas. A continuación, se da una descripción breve de tales relaciones.

1. ASOCIACIÓN ENTRE CLASES DE TIERRAS Y CULTIVOS

ADAPTABLES. En cada comunidad estudiada los productores identifican perfectamente los cultivos que se adaptan a más de una clase de tierra y los cultivos que se establecen sólo en una. De hecho, indican que las mejores tierras son aquellas en las que se produce el mayor número de cultivos.

2. LABORES E IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS. En repetidas ocasiones se nos ha comentado que en toda el área de estudio se realizan las mismas labores de cultivo para todas las clases de tierras; sin embargo, los implementos agrícolas que se emplean difieren por clases de tierra. Más aún, los

productores modifican o diseñan implementos para solucionar sus problemas. (Ortiz *et al.*, 2014).

3. FERTILIZACIÓN. El campesino conoce el efecto benéfico del empleo de fertilizantes y estiércoles para cada cultivo y para cada clase de tierra donde se produzca, tanto en términos de cantidad como frecuencia de aplicación. Lo que más nos llamó la atención fue que los productores prefieren el uso de estiércoles sobre los fertilizantes y en particular en la agricultura tradicional.

4. ENMIENDAS Y USO DE AGUAS RESIDUALES. Los productores usan otros materiales para mejorar las tierras menos productivas, por ejemplo, aplican sedimentos de ríos o los azolves de avenidas, de canales o represas y ceniza doméstica. Este último, después de analizarlo en el laboratorio, se encontró que tienen altos contenidos fósforo y potasio en comparación con los estiércoles. El uso de aguas negras en diferentes zonas del país es común, sobre todo en los ejidos cercanos a las grandes urbes como la zona oriente del Estado de México (Reséndiz-Paz *et al.*, 2013) o del Valle del Mezquital (Justo Segovia, 2017), en donde los campesinos conocen perfectamente la calidad de las tierras y el manejo del agua y no desconocen que se pueden presentar metales pesados en las aguas residuales.

5. USOS DE ARVENSES. La recolección de plantas comestibles es una práctica común en los terrenos de cultivo y junto con el reconocimiento formal de la herbolaria, principalmente con plantas medicinales, constituyen un nuevo paradigma de la importancia de las arvenses en el medio rural mexicano y su asociación con las clases de tierras, por la relación que existe entre ellas.

6. RECUPERACIÓN DE TIERRAS. Otra información que surgió de las entrevistas es el conocimiento sobre la recuperación de tierras para la agricultura, como es el caso de áreas tepetatasas o las salinas sódicas donde el estiércol juega un papel importante.

7. Usos no agrícolas. El productor no sólo relaciona a las clases de tierras con su uso agrícola, sino también aborda otros campos, por ejemplo: uso forestal sin aptitud agrícola, en comunidades otomíes del Estado de Hidalgo, fabricación de tabiques e identificación de tierras destinadas al crecimiento urbano por presentar un estrato endurecido a poca profundidad que sirve de cimiento en el Valle de México

Anecdóticamente, lo anterior resultó como si estuviéramos abriendo una puerta de conocimiento, que salía una luz muy brillante y nos permitía reconocer por primera vez que el productor siempre quiso hablar y que nosotros los técnicos nunca lo dejamos. Después de esto, comprendimos que efectivamente los productores sabían mucho más que nosotros sobre suelos.

4. Período cartográfico: 1987-2021

Ante el crecimiento de la población y la presencia de eventos climáticos catastróficos se tiene la necesidad de incrementar la producción de alimentos y conservar el ambiente, lo cual provoca que el recurso suelo requiera una mayor comprensión y un manejo más racional y eficiente. Para lograrlo técnicamente, como ocurre en los países desarrollados, es necesario realizar levantamientos detallados de suelos (escala >1:20 000), con el fin de delimitar sus diferentes clases en forma individual y poder dar recomendaciones para su manejo y conservación. Este tipo de estudios desafortunadamente no se efectúan en nuestro país, debido a que son costosos, requieren de tiempo y, sobre todo, de personal altamente especializado. La situación anterior provocó que, en nuestro grupo, en el Programa de Edafología del Colegio Postgraduados, se realizara una profunda reflexión sobre si debíamos seguir copiando la ciencia y la tecnología generada en países desarrollados o bien buscar nuestro propio camino.

La escasez de recursos es la madre de las ideas, así que nos quedamos con la segunda

alternativa. Primero teníamos que contar con un marco de referencia geográfico, que tuviera el suficiente nivel de detalle; segundo, que el levantamiento de suelos fuera rápido, barato y que, además, para su realización, no requiriera de personal altamente especializado. ¿Se podría cambiar de paradigma? —nos preguntábamos.

Durante muchos años se estudiaron los procedimientos de elaboración de los levantamientos de suelos en nuestra área de trabajo (Ortiz-Solorio *et al.*, 1973; 1981), los cuales llegamos a entender que parten de un supuesto básico: ausencia de conocimiento sobre suelos en el área de trabajo. Sin embargo, en nuestro país era notoria e innegable la existencia de un amplio conocimiento milenario por parte de las etnias y los productores sobre las tierras/suelos.

Dado que los productores conocen con mucho detalle las características de sus tierras, saben cómo diferenciarlas, establecen su ubicación geográfica y cuentan con amplia experiencia sobre su uso y manejo, nos podrían responder los cuestionamientos básicos de los levantamientos de suelos: ¿cómo son?, ¿dónde están? y ¿para qué se emplean las distintas clases de tierras? Con el reconocimiento de ese hecho se planteó como hipótesis que los mapas detallados de suelos se pueden elaborar con el conocimiento de los productores y el conocimiento cartográfico de los técnicos.

En este punto se quiere especificar, que más que una confrontación de conocimientos, que resultaría irrelevante, lo que se deseaba era la cooperación entre ellos, a través de su mezcla, entendida como una mezcla física; es decir, como si uniéramos agua y suelo formando un lodo y ese lodo continúa siendo agua y suelo.

En otras palabras, se juntan los conocimientos, pero cada uno mantiene sus características propias.

Para realizar un Mapa de Clases de Tierras se propuso contar con un mapa base de la zona de estudio, sobre el cual se trazarían los límites

o linderos de cada tipo de tierra/suelo (Ortiz-Solorio *et al.*, 1990). En los primeros trabajos se utilizaron los planos parcelarios que poseían los ejidos; no obstante, no siempre resultaron apropiados ya que en ocasiones eran muy antiguos y la distribución parcelaria había cambiado. En otros casos se usaron planos topográficos, fotografías aéreas, y ortofotos. Actualmente se utilizan imágenes de satélite de Google earth, disponibles en internet para todo el país.

Es recomendable que el mapa base tenga una escala de 1:15,000 o mayor, lo cual es un reflejo del nivel de detalle encontrado del conocimiento que poseen los productores de sus tierras. En ocasiones un ejido abarca varias imágenes por lo que será necesario crear un mosaico, uniendo todas las partes que lo integran. Finalmente, con el mapa base y los límites de la zona de estudio se procede a visitar al ejido para buscar a informantes clave, cuyo número debe ser reducido y no mayor a tres.

A través de los años y de los estudios realizados se ha establecido que los mejores informantes clave son los comisariados ejidales, ya sean los actuales o los pasados, debido a que son los que conocen todas las tierras de su ejido. Además, es necesario explicarles desde un principio la importancia de realizar un mapa de las clases de tierras con los nombres e información local y solicitar su apoyo para efectuar recorridos de campo, a pie y cruzando todas las parcelas. Durante esas travesías se pregunta sistemáticamente al o los informantes: ¿cómo son las tierras? y ¿dónde cambian o cómo las diferencian de sus vecinas? Las respuestas que dan los comisariados son comúnmente ejemplificadas sobre el terreno, de tal manera que el investigador pronto aprende cómo reconocerlas y cómo diferenciarlas. Además, con el mapa base en mano, va marcando los linderos de las clases de tierras donde se le vaya indicando. Finalmente, al concluir el recorrido de campo se tiene un borrador del mapa de clases

de tierras con los nombres que son conocidos por los productores. El procedimiento en forma esquemática se presenta en la Figura 1.

La mayor superficie trabajada a la fecha con esta metodología ha sido de alrededor de 48 mil hectáreas en una zona de abastecimiento de caña de azúcar para dos ingenios en el Sur de Veracruz (Sánchez *et al.*, 2002). El primer mapa se realizó en 1987 en Atenco y desde entonces se han estudiado más de 60 ejidos, distribuidos dentro de 23 estados, que se ilustran en la Figura 2.

En la siguiente etapa se requiere conocer el uso, manejo, problemática y recomendaciones por parte de los productores para cada una de las clases de tierras/suelos. Este procedimiento es similar a lo que en los levantamientos de suelos se conoce como la aplicación de clasificaciones interpretativas o el establecimiento de predicciones sobre el comportamiento de los suelos bajo un determinado uso y con diferentes niveles de manejo. Para ello se requiere entrevistar a un conjunto de productores cuya característica en común sea que tengan la misma clase de tierra y el número de entrevistados dependerá del aporte de conocimiento nuevo; esto es, las entrevistas se terminan cuando las respuestas se vuelven repetitivas (Williams y Ortiz, 1981).

Es importante indicar que el investigador debe reconocer su habilidad o dificultad para comunicarse con los productores, ya que se convierte en el medio para transmitir conocimientos en ambos sentidos. Además, el investigador debe tener un cambio de mentalidad, que le permita tratar al productor de igual a igual. Sin embargo, en ocasiones, la comunicación se dificulta porque el investigador usa un lenguaje muy técnico, que no entiende el productor o se hacen preguntas sobre aspectos que no son de uso cotidiano. A su vez, el productor explica sus conceptos y experiencias de forma no ortodoxa y es en ambos casos cuando el investigador requiere una habilidad especial para

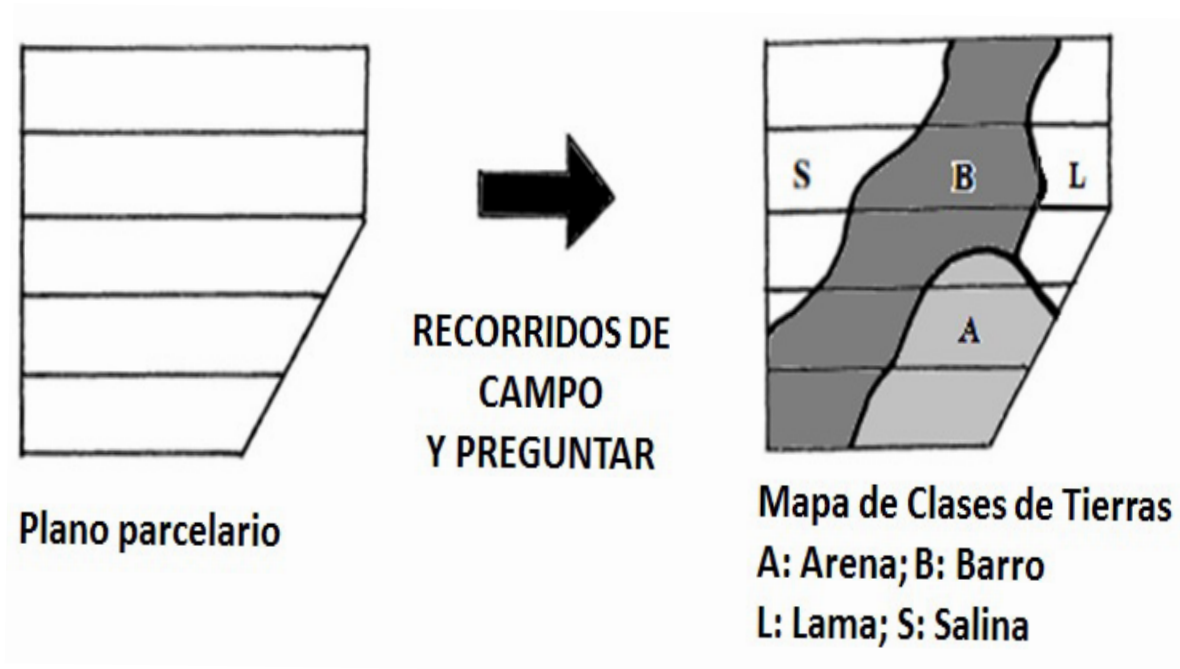


FIGURA 1. Procedimiento para la Cartografía de Clases de Tierras

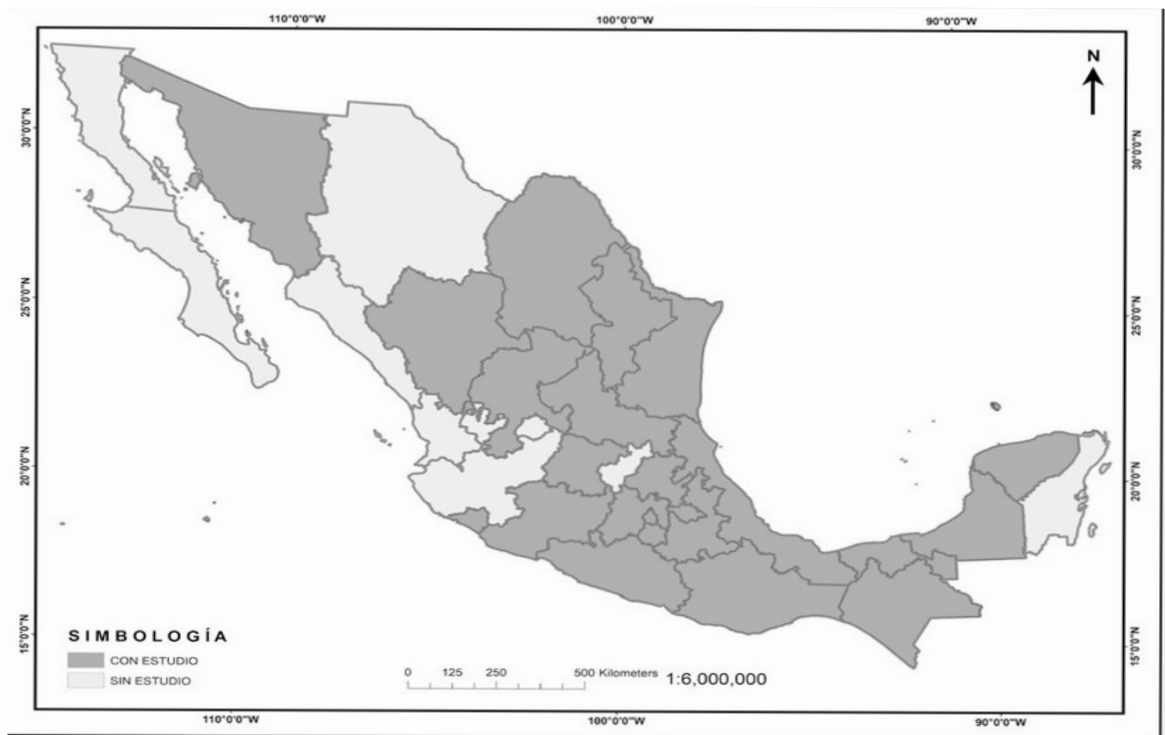


FIGURA 2. Mapa de la República Mexicana mostrando las clases de Tierras a nivel Ejidal.

explicar sus conceptos y experiencias de forma no ortodoxa y es en ambos casos cuando el investigador requiere una habilidad especial para entender y dar a conocer distintos temas.

También es necesario contar con la autorización del productor para grabar su entrevista o hacer anotaciones en una libreta o en su defecto aceptar que no se puede realizar ninguna de ellas. Aun cuando, durante la entrevista, el productor es quien proporciona toda la información sobre las tierras, en algunos casos se pueden hacer algunas preguntas sobre temas de interés. A continuación, se mencionan algunas de las investigaciones que se han dirigido sobre este tema:

1. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MAPAS. Lleverino *et al.* (2000) realizaron la evaluación de la calidad de tres mapas de suelos que contenían a la mayor parte del ejido de San Salvador Atenco, considerando dos parámetros: la precisión y la exactitud. La primera es relativa a los suelos que integran a las unidades cartográficas y la segunda se relaciona con los linderos. Los mapas estudiados fueron: el elaborado por el Colegio de Postgraduados (Cachón *et al.*, 1976), la Carta Edafológica desarrollada por INEGI, escala 1: 50,000 y el tercero, el mapa de Clases de Tierras de 1987. El resultado fue contundente, los mapas de ambas instituciones eran de muy baja calidad en precisión y exactitud, mientras que el conocimiento local resultó muy superior.

2. ESTUDIOS A NIVEL REGIONAL UTILIZANDO FOTO INTERPRETACIÓN O IMÁGENES DE SATÉLITE. Al efectuar un buen número de estudios a nivel de ejido, en los años 1990's, se trató de convertir a los estudios de caso a nivel regional, pensando que se podría lograr con la técnica de fotointerpretación o con las interpretaciones de imágenes de satélite. La primera opción fue desarrollada en Atenco por Licona *et al.* (1993) y se continuó aplicándola posteriormente en Veracruz (Licona *et al.*, 1992) y en Zacatecas (Martínez y Ortiz, 1992; Martínez *et al.*, 2003). En ambos estudios se obtuvieron resultados satisfactorios,

sin embargo, el uso de las fotografías aéreas en México ha sido cada vez menor y la tendencia es que se puede predecir su desaparición, dejando en su lugar a las imágenes de satélite sobre todo las de alta resolución. Con respecto a tales imágenes aún no se ha resuelto el problema de la cartografía de las clases de tierras campesinas, aunque se han tenido avances significativos con los tres trabajos de Cruz *et al.* (2010a y 2010b; 2011).

3. TRASFERENCIA DE TECNOLOGÍA . También se trató de hacer transferencia de tecnología y contar con un campo experimental en cada área de estudio. Diversas pláticas se realizaron con el personal del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y se planeó hacer un mapa de clases de tierras en uno de sus campus. El objetivo general era aplicar los resultados fuera de éste en las mismas clases de tierras en donde se habían obtenido resultados. Sin embargo, dos aspectos impidieron alcanzar nuestro objetivo: el primero, fue que los experimentos se rotaban y al final no se sabía dónde servirían; y el segundo, fue el detectar que el campo se ubica en una zona no representativa. Lo anterior, condujo a realizar transferencias de productor a productor, como se reportó en la investigación de Villalón y Tavarez (1990) o de ejido a ejido cuando eran vecinos y uno tenía conocimientos de mejoramientos de suelos que el otro no sabía (Licona *et al.*, 2006).

4. ESTUDIOS DE GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. En las investigaciones de tesis de postgrado es muy común que se realice tanto el mapa de clases de tierras como la clasificación científica de los suelos que integran a cada una de las unidades cartográficas, ya sea con la Taxonomía de Suelos (Soil Survey Staff, 2014) o con la WRB (IUSS Grupo de trabajo de la WRB, 2015), con lo cual el mapa de tierras se convierte en un mapa formal de Grupos de Referencia u Órdenes de suelos, dependiendo del sistema que se utilice y con ello, se está generando cono-

cimiento básico sobre la génesis de los suelos (Gutiérrez-Castorena *et al.*, 1999; Alcalá *et al.*, 2001; Reséndiz-Paz *et al.*, 2013; Mariles *et al.*, 2016; Rojas, 2017; Torres *et al.*, 2019).

5. OTRAS APLICACIONES. En estos últimos años se ha continuado trabajando con diferentes cultivos y en distintos lugares usando siempre los estudios etnoedafológicos, entre los cuales se puede mencionar a: la caña de azúcar con riego en Morelos (Hernández *et al.*, 2018), la producción de agave mezcalero en Oaxaca (Mariles *et al.*, 2016), la pimienta dioica en Puebla con el grupo étnico Totonaca (Rojas, 2017) y la caracterización de agroecosistemas a nivel local, el caso de un ejido cafetalero del centro de Veracruz (Aguilar *et al.*, 2019). También se han hecho estudios para determinar la tasa de descomposición de las raíces finas (<2 mm) de maíz en áreas con diferentes manejos agronómicos y su distribución en el paisaje (Torres *et al.*, 2019). Así como el manejo de la fertilidad de los suelos en Guerrero (González, 2019), la tipología del uso de la tierra y su relación con las cadenas productivas en Durango (Morales *et al.*, 2021) y con las etnias Yaqui y Seris, en comunidades con poca o ninguna actividad agrícola en Sonora (Villafructe *et al.*, 2021). Actualmente se está generando una experiencia con esta disciplina en varios ejidos en el Estado de Hidalgo, donde, los productores están elaborando sus propios mapas de tierras y los técnicos actúan como editores, transfiriendo la información cartográfica a imágenes de satélite.

5. Impacto de la Etnoedafología a nivel nacional e internacional

Es importante señalar que, a partir de 1981, no sólo se definió el concepto de Etnoedafología, sino que en menos de seis años nos convertimos en el primer grupo de investigación a nivel nacional e internacional que elaboraba mapas de suelos/tierras considerando al conocimiento local y aplicando el procedimiento

descrito. En una revisión bibliográfica sobre estudios etnoedafológicos realizada por Barre-ra y Zinck (2000, 2003) a nivel internacional, se reportó que México era el país que contaba con el mayor número de investigaciones (70) y la mayoría de ellas realizadas en el Colegio de Postgraduados.

Con la experiencia acumulada se tuvo la suficiente confianza para comenzar a divulgar a nivel internacional los estudios etnoedafológicos o etnopedológicos, dándolos a conocer en Holanda (Ortiz, 1995), en Bélgica (Ortiz, 2001) y en Rusia en 2004 (Ortiz *et al.*, 2005). Empezamos a tener reconocimiento de nuestro trabajo en España (Andrade *et al.*, 2001), en instituciones como la FAO (FAO, 2007) y en países de América Latina (Lucena *et al.*, 2009).

Uno de los aspectos más satisfactorios que hemos tenido fue el conocer el trabajo de Verheye (2009) publicado en la Enciclopedia de Land Use, Land Cover and Soil Sciences, quien al referirse a los procedimientos en los levantamientos de suelos indicó textualmente:

Los levantamientos se basan en la descripción de las propiedades de suelos, en lugares representativos del paisaje (puntos de observación) y la subsecuente agrupación de esas observaciones en más o menos unidades homogéneas (unidades aéreas). Para lo cual, existen tres tipos de procedimientos: el mapeo sistemático, el mapeo libre y el enfoque etnopedológico.

Como el mapeo en campo es un procedimiento que consume mucho tiempo y tiene un costo elevado es frecuente que dependa de la disponibilidad de fondos y en años recientes tales recursos son escasos. Para resolver ese problema existe la tendencia de integrar al conocimiento local, no considerado anteriormente, al sistema por medio de preguntar a la gente del lugar para identificar a los diferentes tipos de suelos que ellos conocen en su área y para mostrarnos en el campo donde se localizan, así como donde cambian sus propiedades. La ventaja de este sistema es que es relativamente rápido y barato y el producto final

(mapa) razonablemente preciso

6. Comentario Final

Más que tratar de dar una o varias conclusiones consideramos que es conveniente manifestar una reflexión de lo vivido, e indicar, sobre todo a los jóvenes investigadores, que lo más relevante es la convicción de las ideas que uno posea. El proceso de investigación puede tener muchas restricciones, barreras, ataques o dificultades, lo que sea, pero al final lo que buscamos es la verdad y si estamos convencidos de algo, debemos luchar con todo hasta alcanzar nuestras metas. Nosotros estamos simplemente agradecidos por permitirnos desarrollar nuestros pensamientos.

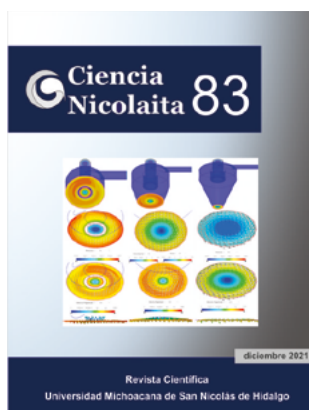
Bibliografía

- AGUILAR-OREA, G.F., RUÍZ ROSADO, O., ORTIZ SOLORIO, C.A. Y ARMIDA ALCUDIA, L. 2019. La ETNOEDAFOLOGÍA COMO INSTRUMENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE AGROECOSISTEMAS A NIVEL LOCAL, EL CASO DE UN EJIDO CAFETALERO DEL CENTRO DE VERACRUZ. *INVESTIGACIONES GEOGRÁFICAS*, INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM. 99: e59850. DOI: [DX.DOI.ORG/10.14350/RIG.59850](https://doi.org/10.14350/RIG.59850).
- AGRAWAL, A. 1996. DISMANTLING THE DIVIDE BETWEEN INDIGENOUS AND SCIENTIFIC KNOWLEDGE. *DEPT. OF POLITICAL SCIENCE. TROPICAL CONSERVATION AND DEVELOPMENT PROGRAM*. UNIV. OF FLORIDA. GAINESVILLE, FL. 40 PÁG.
- ALCALÁ DE JESÚS, M., ORTIZ SOLORIO, C. A. Y GUTIÉRREZ CASTORENA, MA. DEL C. 2001. CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS DE LA MESETA TARASCA, MICHOACÁN. *TERRA LATINOAMERICANA* 19 (3): 227-239. E-ISSN: 2395-8030.
- ANDRADE L., E., FAZ C. A., GARCÍA, F.G. AND ARNOLDOS L.R. 2001. FARMER CLASSIFICATION: AN APPROACH TO SOIL QUALITY IN MURCIA, SE OF SPAIN. *EUROPEAN SOIL BUREAU. RESEARCH REPORT NO. 7*: 157-163.
- BARRERA-BASSOLS, N. AND ZINCK, J. A. 2000. ETHNOPEDODOLOGY IN A WORLDWIDE PERSPECTIVE: AN ANNOTATED BIBLIOGRAPHY. *ITC PUBLICATION, VOL. 77* ENSCHEDE, THE NETHERLANDS.
- BARRERA-BASSOLS, N. AND ZINCK, J.A. 2003. ETHNOPEDODOLOGY IN A WORLDWIDE VIEW ON THE SOIL KNOWLEDGE OF LOCAL PEOPLE. *GEODERMA* 111(3-4): 171-195.
- BUOL, S. W., HOLE, F. D. AND MCCracken. R. J. 2008. GÉNESIS Y CLASIFICACIÓN DE SUELOS. *TRADUCIDO POR AGUSTÍN CONTIN. SEGUNDA EDICIÓN, TRILLAS*. MÉXICO.
- CACHÓN A., E., H. NERY G. Y H. E. CUANALO DE LA C. 1976. LOS SUELOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DE CHAPINGO. *COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. CHAPINGO, México.
- CALDERÓN A., G. 1983. CARACTERIZACIÓN Y UTILIDAD DE LA CLASIFICACIÓN CAMPESINA DE SUELOS EN DOS ZONAS CHINAMPERAS DEL VALLE DE MÉXICO. *TESIS DE MAESTRÍA. CENTRO DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. CHAPINGO, TEXCOCO, MÉXICO
- CARRILLO G., R., ORTIZ SOLORIO, C.A., PÁJARO H., D. Y MARTÍNEZ G., A. 1991. EL USO DE LAS CENIZAS DOMÉSTICAS COMO MEJORADOR DE SUELOS EN ATENCO, MÉXICO. *AGROCIENCIA, SERIE: AGUA-SUELO-CLIMA*, 2-3:155-169. ISSN 0188-3089.
- Cruz C., G., ORTIZ-SOLORIO, C. A., OJEDA T., E., MARTÍNEZ M., J. F., SOTELO R., E. AND LICONA V., A. L. 2010A. EVALUATION OF FOUR DIGITAL CLASSIFIERS FOR AUTOMATED CARTOGRAPHY OF LOCAL SOIL CLASSES BASE ON REFLECTANCE AND ELEVATION IN MEXICO. *INTERNATIONAL JOURNAL OF REMOTE SENSING*, 34:665-679. DOI: [10.1080/01431160902894491](https://doi.org/10.1080/01431160902894491)
- Cruz C., G., ORTIZ-SOLORIO, C. A., OJEDA T., E., MARTÍNEZ M., J. F., SOTELO R., E. AND LICONA V., A. L. 2010B. DIGITAL MAPPING OF FARMLAND CLASSES IN THREE LANDSCAPES IN MEXICO. *JOURNAL SOIL SCI. PLANT NUTR.* 10(4): 414-427.
- Cruz C., G., ORTIZ-SOLORIO, C. A., OJEDA T., E., MARTÍNEZ M., J. F., SOTELO R., E. AND LICONA V., A. L. 2011. COMPUTER ASSISTED CARTOGRAPHY USING TOPOGRAPHIC PROPERTIES: PRECISION AND ACCURACY OF LOCAL SOIL MAPS IN CENTRAL MEXICO. *REV. BRAS. CI. SOLO*, 35:683-691. [HTTPS://DOI.ORG/10.1590/S0100-06832011000300003](https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000300003)
- CÓDICE DE SANTA MARÍA ASUNCIÓN Y EL APEO Y DESLINDE DE TIERRAS (DE LOS TERRENOS) DE SANTA MARÍA DE LA ASUNCIÓN. *MS DE OLAGÜBEL. 1497 BIS. BIBLIOTECA NACIONAL DE MÉXICO*. MÉXICO, D. F.
- ESPINOSA H., V. 1987. CARACTERIZACIÓN, DISTRIBUCIÓN Y USO DE LAS ARVENSES EN LAS DIFERENTES CLASES DE TIERRAS CAMPESINAS EN EL EJIDO DE ATENCO. *TESIS DE MAESTRÍA. CENTRO DE EDAFO-*

- CLASES DE TIERRAS CAMPESINAS EN EL EJIDO DE ATENCO. *TESIS DE MAESTRÍA. CENTRO DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. CHAPINGO, MÉXICO.
- FAO. 2007. LAND EVALUATION: TOWARDS A REVISED FRAMEWORK. LAND AND WATER DISCUSSION PAPER 6. *FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF UNITED NATIONS*. ROME. ISSN 1729-0554.
- GIBSON, CH. 1996. LOS AZTECAS BAJO EL DOMINIO ESPAÑOL 1519-1810. *DÉCIMA TERCERA EDICIÓN EN ESPAÑOL. EDITORIAL SIGLO VEINTIUNO. COLECCIÓN AMÉRICA NUESTRA*. MÉXICO. ISBN: 978-968-23-0144-5.
- GONZÁLEZ Z., R. 2019. PERCEPCIÓN Y MANEJO DE LA FERTILIDAD EN LAS CLASES DE TIERRAS AGRÍCOLAS EN EL EJIDO TIERRA COLORADA, GUERRERO. *TESIS DE MAESTRÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. MONTECILLO, MÉXICO.
- GUTIÉRREZ-CASTORENA., MA. DEL C. Y ORTIZ-SOLORIO, C.A. 1992. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS ANTROPOGÉNICOS CON PROBLEMAZA EN EL EX LAGO DE TEXCOCO. *AGROCIENCIA, SERIE: AGUA-SUELO- CLIMA*, 3-2: 95-111. ISSN: 1405-3195
- GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA. DEL C. Y ORTIZ SOLORIO, C. A. 1999. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LOS SUELOS DEL EX LAGO DE TEXCOCO. *AGROCIENCIA* 33: 199-208. ISSN: 1405-3195
- GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA. DEL C., ORTIZ SOLORIO, C. A., FERNÁNDEZ GALÁN, B. E. GUTIÉRREZ CASTORENA E.V. Y GONZÁLEZ VARGAS, T. 2017. LOS SUELOS DEL ÁREA DE INFLUENCIA DEL CÓDICE SANTA MARÍA ASUNCIÓN Y SU REPRESENTACIÓN PICTÓRICA. *TERRA LATINOAMERICANA* 35: 101-111. E-ISSN: 2395-8030
- HARVEY, H. R. AND WILLIAMS, B. J. 1980. AZTEC ARITHMETIC: POSITIONAL NOTATION AND AREA CALCULATION. *SCIENCE*. 210: 499-505.
- HERNÁNDEZ A., E. E., ORTIZ-SOLORIO, C. A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C., GUTIÉRREZ-CASTORENA, E. V. Y SÁNCHEZ G., P. 2018. MANEJO LOCAL DE LOS SUELOS CAÑEROS EN TLAQUILTENGO, MORELOS, MÉXICO. *REV. GEOGRAFÍA AGRÍCOLA* 61: 85-102.
- IUSS GRUPO DE TRABAJO WRB. 2015. BASE REFERENCIAL MUNDIAL DEL RECURSO SUELO 2014, SISTEMA INTERNACIONAL DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA LA NOMENCLATURA DE SUELOS Y LA CREACIÓN DE LEYENDAS DE MAPAS DE SUELOS. *INFORMES SOBRE RECURSOS MUNDIALES DE SUELOS* 106. FAO, ROMA.
- IWANSKA, A. 1971. PURGATORY AND UTOPIA: A MAZAHUA INDIAN VILLAGE OF MEXICO. SCHENKMAN PUB. CO. CAMBRIDGE, MASS.
- JUSTO SEGOVIA, V. M. 2017. EFECTO DEL AGUA RESIDUAL EN LOS SUELOS DEL MÓDULO DE RIEGO TEPETATES, VALLE DEL MEZQUITAL. *TESIS DE MAESTRÍA. PROGRAMA DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.
- KRASILNIKOV, P. AND TABOR, J. 2010. ETHNOPEDOLOGY AND FOLK SOIL TAXONOMIES. *ENCYCLOPEDIA SOILS, PLANT GROWTH AND CROP PRODUCTION, VOL. III. ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS (EOLSS) / UNESCO*. EOLSS PUBLISHER CO. OXFORD, UNITED KINGDOM.
- LICONA V., A. L., ORTIZ-SOLORIO, C.A., PÁJARO H., D. Y ORTEGA P., R. 1992. METODOLOGÍA PARA EL LEVANTAMIENTO DE TIERRAS CAMPESINAS A NIVEL REGIONAL EN EJIDOS DEL CENTRO DE VERACRUZ. *REV. AGROCIENCIA. SERIE: AGUA-SUELO-CLIMA*, 3-4: 91-105. ISSN: 1405-3195
- LICONA V., A. L., ORTIZ SOLORIO, C. A. Y PÁJARO H., D. 1993. EL USO DE LA FOTOINTERPRETACIÓN EN LA CARTOGRAFÍA DE CLASES DE TIERRAS CAMPESINAS. *REV. GEOGRAFÍA AGRÍCOLA*, 18:8 5-93.
- LICONA V., A. L., ORTIZ-SOLORIO, C. A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA. DEL C., MANZO RAMOS, F. 2006. CLASIFICACIÓN LOCAL DE TIERRAS Y TECNOLOGÍA DEL POLICULTIVO CAFÉ-PLÁTANO PARA VELILLO-SOMBRA EN COMUNIDADES CAFETALERAS. *TERRA LATINOAMERICANA*, 24 (1):1-7. E-ISSN: 2395-8030
- LUCENA DE ARAUJO, J., CUNHA DOS ANJOS, L. H. Y PEREIRA, M.G. 2009. ATRIBUTOS DO SOLO E DISTINCAO DE PEDOAMBIENTES PARA A AGRICULTURA NA TERRA INDÍGENA MBYA EM UBATUBA (SP). *REV. BRAS. DE CI. DO SOLO*, 33: 1765 – 1776.
- LUNA O., P. 1980. CLASIFICACIÓN CAMPESINA DE LOS TERRENOS DEL EX-LAGO DE TEXCOCO Y SU RELACIÓN CON EL LEVANTAMIENTO DE SUELOS. TESIS DE LICENCIATURA. *DEPTO. DE SUELOS. UNIV. AUTÓNOMA CHAPINGO*. CHAPINGO, MÉXICO.
- LUNA O., P. 1982. ESTUDIO COMPARATIVO SOBRE LA CLASIFICACIÓN CAMPESINA EN DOS COMUNIDADES DEL VALLE DE MÉXICO. *TESIS DE MAESTRÍA. CENTRO DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. CHAPINGO, MÉXICO.
- LUNA O., P., ORTIZ-SOLORIO, C. A. Y PÁJARO H., D. 1988. CLASIFICACIÓN CAMPESINA DE SUELOS EN DOS COMUNIDADES DEL VALLE DE MÉXICO. *AGROCIENCIA*, 73: 159-170. ISSN: 1405-3195

- LLEVERINO G., E., ORTIZ-SOLORIO, C. A. Y GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. 2000. CALIDAD DE LOS MAPAS DE SUELOS EN EL EJIDO DE ATENCO, ESTADO DE MÉXICO. *TERRA*, 18-2: 103-113. ISSN: 1870 - 9982
- MARILES, F.V., ORTIZ-SOLORIO, C.A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C., SÁNCHEZ, G. P. Y CANO, G.M.A. 2016. LAS CLASES DE TIERRAS PRODUCTORAS DE MAGUEY MEZCALERO EN SOLEDAD SALINAS OAXACA. *REV. MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS*, 7-5: 1199-1210.
- MARTÍNEZ M., J. F. Y ORTIZ-SOLORIO, C. A. 1992. CARTOGRAFÍA CAMPESINA DE TIERRAS EN VILLA HIDALGO, ZACATECAS Y SU COMPARACIÓN CON LA CARTA EDAFOLÓGICA DEL INEGI. *REV. ETR*, 10 (2): 140-150.
- MARTÍNEZ M., J. F., ORTIZ-SOLORIO, C.A., PÁJARO H., D., OJEDA T., E. Y VARGAS P., E. 2003. CLAVE DE FOTOINTERPRETACIÓN PARA LA CARTOGRAFÍA DE TIERRAS CAMPESINAS A ESCALA REGIONAL. *TERRA*, 21 (3):301-309. E-ISSN: 2395-8030
- MORALES E., I. DEL C., ORTIZ-SOLORIO, C. A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. Y GUTIÉRREZ-CASTORENA, E.V. 2021. ESTUDIO ETNOEDAFOLÓGICO PARA EL RECONOCIMIENTO DE LOS TIPOS DE USO ASOCIADOS CON CADENAS PRODUCTIVAS EN EL EJIDO DE SANTA CRUZ, DURANGO. *TERRA LATINOAMERICANA* 39: 1-11. E-ISSN: 2395-8030
- ORTIZ-SOLORIO, C. A., ESTRADA B., J.W. Y CUANALO DE LA C., H. E. 1973. METODOLOGÍA DE UN LEVANTAMIENTO DE SUELOS PARA DAR RECOMENDACIONES A NIVEL PARCELARIO. *AGROCIENCIA*, 14:59-65. ISSN: 1405-3195
- ORTIZ-SOLORIO, C.A Y CUANALO DE LA C., H. E. 1981. INTRODUCCIÓN A LOS LEVANTAMIENTOS DE SUELOS. CHAPINGO. *COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. TEXCOCO, MÉXICO.
- ORTIZ-SOLORIO, C. A., PÁJARO H., D. Y ORDAZ-CHAPARRO, V. M. 1990. MANUAL PARA LA CARTOGRAFÍA DE CLASES DE TIERRAS CAMPESINAS. *SERIE CUADERNOS DE EDAFOLOGÍA 15. CENTRO DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*, MONTECILLO, MÉXICO.
- 59 P
- ORTIZ-SOLORIO, C.A. 1995. ETHNOPEDOLOGICAL STUDIES IN MEXICO. *INTERNATIONAL WORKSHOP ON NATIONAL SOIL REFERENCE COLLECTION AND DATABASES*. ISRIC, THE NETHERLANDS.
- ORTIZ-SOLORIO, C. A. Y MA DEL C. GUTIÉRREZ-CASTORENA. 1999. EVALUACIÓN TAXONÓMICA DE SISTEMAS LOCALES DE CLASIFICACIÓN DE TIERRAS. *TERRA LATINOAMERICANA* VOL. 17, NÚM. 4: 277-286 ISSN 1870-9982
- ORTIZ-SOLORIO, C.A. Y GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. 2001. LA ETNOEDAFOLOGÍA EN MÉXICO: UNA VISIÓN RETROSPECTIVA. *ETNOBIOLOGÍA*, 1: 44- 62.
- ORTIZ SOLORIO, C.A. AND GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. 2001. MEXICAN ETHNOPEDOLOGY: THE EXPERIENCE ON SOIL MAPPING. CONFERENCE ON SCIENCES AND TRADITIONS. *ROOTS AND WINGS FOR DEVELOPMENT*. ROYAL ACADEMY OF OVERSEAS SCIENCES AND UNESCO. PP. 107-136.
- ORTIZ SOLORIO, C.A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C., LICONA V., A. L. AND SÁNCHEZ G., P. 2005. CONTEMPORARY INFLUENCE OF INDIGENOUS SOIL (LAND) CLASSIFICATION IN MEXICO. *EURASIAN SOIL SCI*. VOL. 38; SUPPL. 1: S89-S94.
- ORTIZ SOLORIO, C.A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. Y SÁNCHEZ-GUZMÁN, P. 2014. ESTUDIOS ETNOEDAFOLÓGICOS; CARTOGRAFÍA DE TIERRAS CAMPESINAS. *FOLLETO DIVULGATIVO. PROGRAMA DE EDAFOLOGÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. MONTECILLO, MÉXICO. 9 PÁG.
- ORTIZ SOLORIO, C. A. 2019. EDAFOLOGÍA. *ED. TRILLAS S. A. DE C. V.* MÉXICO. ISBN 978-607-17-5577-5
- PÉREZ-POOL, J. M. 1984. CARACTERIZACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN MAYA DE SUELOS EN EL MUNICIPIO DE OXKUTZKAB, YUCATÁN. *TESIS DE LICENCIATURA*. DEPTO. DE SUELOS, UNIV. AUTÓNOMA CHAPINGO. CHAPINGO, MÉXICO.
- QUIROZ M., J. 1984. CLASIFICACIÓN CAMPESINA DE SUELOS DE DOS SISTEMAS TERRESTRES DEL VALLE DEL MEZQUITAL, ESTADO DE HIDALGO. *TESIS DE LICENCIATURA*. DEPTO. DE SUELOS, UNIV. AUTÓNOMA CHAPINGO. CHAPINGO, MÉXICO.
- RESÉNDIZ P., MA. DE LA L., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DE C., GUTIÉRREZ-CASTORENA, E.V., ORTIZ-SOLORIO, C.A., CAJUSTE-BONTEMPTS L., SÁNCHEZ-GUZMÁN, P. 2013. LOCAL SOIL KNOWLEDGE AND MANAGEMENT OF ANTHROSOLS: A CASE STUDY IN TEOLUYUCAN, MEXICO. *GEODERMA* 193-194. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.09.004
- RODRÍGUEZ M., A. 1990. CARACTERIZACIÓN DE LOS MÉTODOS EMPÍRICOS DE RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS EN SAN SALVADOR ATENCO Y SAN FRANCISCO ACUEXCOMAC, MÉXICO. *TESIS DE LICENCIATURA*. DEPTO. DE SUELOS. UNIV. AUTÓNOMA CHAPINGO. CHAPINGO, MÉXICO.
- ROJAS P., L. 2017. CONOCIMIENTO LOCAL DE LA PRO-

- PRODUCCIÓN DE PIMIENTA DIOICA EN SUELOS DE LA REGIÓN TOTONACA EN PUEBLA. *TESIS DE MAESTRÍA. COLEGIO DE POSTGRADUADOS*. MONTECILLO, MÉXICO.
- SAHAGÚN, B. 2016. HISTORIA GENERAL DE LAS COSAS DE NUEVA ESPAÑA. DÉCIMA PRIMERA EDICIÓN. SEGUNDA REIMPRESIÓN. *EDITORIAL PORRÚA*. MÉXICO. ISBN 978-970-07-6492-3
- SÁNCHEZ G., P., ORTIZ SOLORIO, C. A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C. y GÓMEZ D., J. D. 2002. LA CLASIFICACIÓN DE TIERRAS Y SU RELACIÓN CON LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN EL SUR DE VERACRUZ. *TERRA*, 20(4): 359-369. E-ISSN: 2395-8030
- SOIL SURVEY STAFF. 2014. CLAVES DE LA TAXONOMÍA DE SUELOS. TRADUCCIÓN DE C. A. ORTIZ SOLORIO, MA DEL C. GUTIÉRREZ CASTORENA Y E. V. GUTIÉRREZ CASTORENA. *DECIMA SEGUNDA EDICIÓN*. USDA – NRCS.
- TORRES-GUERRERO, C.A., GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA DEL C., ORTIZ-SOLORIO, C.A., HERRERA J.M., GUTIÉRREZ-CASTORENA, E. V., ETCHEVERS B., J.D. 2019. TASA DE DESCOMPOSICIÓN DE RAÍCES DE MAÍZ EN PARCELAS Y REGIONES USANDO CONOCIMIENTO LOCAL DE TIERRAS. *AGROCIENCIA*, 53:661-680. ISSN: 1405-3195.
- VERHEYER, W. 2009. SOILS AND SOIL SCIENCES. *ENCYCLOPEDIA OF LAND USE, LAND COVER AND SOIL SCIENCES*, VOL. VI pp. 1-39. *ENCYCLOPEDIA OF LIFE SUPPORT SYSTEMS (EOLSS) / UNESCO. EOLSS PUBLISHERS CO., LTD*; OXFORD, UNITED KINGDOM.
- VILLAFUERTE, G.R. J., ORTIZ-SOLORIO, C.A. GUTIÉRREZ-CASTORENA, MA. DEL C., GARCÍA, H.J., LEYVA, G.G. y PERALES, H.L. 2021. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA ESTUDIOS ETNOEDAFOLÓGICOS EN ZONAS CON POCA O NULA ACTIVIDAD AGRÍCOLA. *ETNOBIOLOGÍA*, 19-1: 63-80.
- VILLALÓN, R.J.M. y TAVAREZ, E.C.A. 1990. RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS POR MÉTODOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOS EN LA DELEGACIÓN TLAHUAC, D. F. *TESIS DE LICENCIATURA*. DEPTO. DE SUELOS. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO. CHAPINGO, MÉXICO.
- WILLIAMS, B. J. AND ORTIZ-SOLORIO, C.A. 1981. MIDDLE AMERICAN FOLK SOIL TAXONOMY. *ANNALS OF ASSOC. OF AM. GEOG.* 71: 335-358.
- WILLIAMS, B. J. AND HARVEY, H.R. 1997. THE CODICE DE SANTA MARÍA ASUNCIÓN: FACSIMILE AND COMMENTARY: HOUSEHOLDS AND LANDS IN SIXTEENTH – CENTURY TEPETLAOZTOC (*ENGLISH AND SPANISH EDITION*). *EDITORIAL UNIV. OF UTAH PRESS*. SALT LAKE CITY UT.
- VILLALÓN, R.J.M. y TAVAREZ, E.C.A. 1990. RECUPERACIÓN DE SUELOS SALINOS POR MÉTODOS BIOLÓGICOS Y FÍSICOS EN LA DELEGACIÓN TLAHUAC, D. F. *TESIS DE LICENCIATURA*. DEPTO. DE SUELOS. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO. CHAPINGO, MÉXICOTOC (*ENGLISH AND SPANISH EDITION*). *EDITORIAL UNIV. OF UTAH PRESS*. SALT LAKE CITY UT.



Retos y perspectivas del sector acuícola rumbo al 2050

Carlos Cristian Martínez-Chávez, Pamela Navarrete-Ramírez, Luciana Raggi, María Gisela Ríos-Durán, Jorge Fonseca-Madrigal, María Cristina Chávez-Sánchez, Jesús Mateo Amillano-Cisneros, Carlos Antonio Martínez-Palacios

Para citar este artículo: [Martínez-Chávez, C. C., Navarrete-Ramírez, P., Raggi, L., Ríos-Durán, M. G., Fonseca-Madrigal, J., Chávez-Sánchez, M.C., Amillano-Cisneros, J.M., Martínez-Palacios, C.A. 2022. Retos y perspectivas del sector acuícola rumbo al 2050. Ciencia Nicolaita, número 153-182. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.572>](#)

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Retos y perspectivas del sector acuícola rumbo al 2050

Carlos Cristian Martínez-Chávez^{1*}, Pamela Navarrete-Ramírez², Luciana Raggi², María Gisela Ríos-Durán¹, Jorge Fonseca-Madrigal¹, María Cristina Chávez-Sánchez³, Jesús Mateo Amillano-Cisneros¹, Carlos Antonio Martínez-Palacios¹

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales, México

²CONACYT- Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF), México.

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 18 de septiembre de 2021

Aceptado: 19 de noviembre de 2021

RESUMEN

La biotecnología acuícola se basa en el conocimiento generado por investigaciones científicas multidisciplinarias aplicadas a la producción de organismos acuáticos. Las enfermedades infecciosas, el cambio climático y la sostenibilidad, son los principales retos actuales de la acuicultura. En este trabajo se hace una revisión de las posibles soluciones biotecnológicas a estos retos, a través del mejoramiento de las dietas, del uso de nuevas tecnologías de análisis, como son las ciencias ómicas y finalmente se discute la integración de especies nativas a la acuicultura. Todas estas actividades, con políticas públicas adecuadas, promoverán el desarrollo de una acuicultura más rentable, sostenible y acorde con las condiciones regionales, garantizando la seguridad alimentaria.

PALABRAS CLAVE: acuicultura, investigación multidisciplinaria, seguridad alimentaria sustentable

ABSTRACT

Aquaculture biotechnology is based on the knowledge generated by multidisciplinary scientific research applied to the production of aquatic organisms. Infectious diseases, climate change and sustainability are the main current challenges for aquaculture. In this work, a review of possible biotechnological solutions to these challenges is made, through the improvement of diets, the use of new analysis technologies, such as omics sciences, and finally the integration of native species into aquaculture is discussed. All these activities, with appropriate public policies, will promote the development of a more profitable, sustainable aquaculture in line with regional conditions, guaranteeing food security.

KEYWORDS: aquaculture, multidisciplinary research, sustainability, food security

1. Introducción y contexto

La acuicultura moderna es una biotecnología que ha venido avanzado con la inclusión de múltiples ciencias desde la década de los 50 del siglo XX a la fecha, con la aplicación del conocimiento de la biología, fisiología, reproducción, nutrición, patología, parasitología y más recientemente de ciencias “ómicas” como la nutrigenómica y microbiómica de las especies acuáticas cultivadas, ya sean peces, crustáceos, moluscos, equinodermos o algas. Características como la demanda y el precio en el mercado, el crecimiento acelerado, la calidad nutricional del producto, la resistencia a enfermedades, la capacidad de reproducirse en cautiverio y, en el caso de las algas, el contenido de compuestos de alta calidad para la industria, son algunos de los factores que permiten la selección de las especies a ser cultivadas.

Sin embargo, los sistemas acuícolas actuales dependen de la elaboración de alimentos balanceados a base de harinas y aceites de pescado para cubrir los requerimientos de las especies cultivadas. Es decir, se está utilizando el producto de las pesquerías para alimentar peces y otros organismos acuáticos, cuando podrían ser utilizados para la alimentación humana, al ser fuentes importantes de proteína y especialmente de ácidos grasos esenciales. Lamentablemente los recursos pesqueros están sobreexplotados y es urgente buscar nuevas alternativas, como el uso de ingredientes no convencionales para los alimentos de las especies acuícolas o nuevas estrategias de cultivo que hagan esta actividad más sustentable y reducir la demanda de alimentos balanceados (Duarte *et al.*, 2009; FAO 2014).

Dentro de los sistemas tradicionales de cultivo, encontramos los sistemas extensivos, para los cuales se utilizan lagunas, brazos de río o estanques en tierra de varias hectáreas,

por lo que se requiere controlar a los depredadores. Aunque en estos sistemas la producción por hectárea es baja (alrededor de 500 kg/ha), no se requiere alimentación suplementaria y los organismos cultivados crecen con la alimentación natural que les ofrece la cadena trófica, con los nutrientes del mismo cuerpo de agua. De esta manera los organismos cultivados tienen muy bajas probabilidades de enfermar, debido a la baja densidad de cultivo y como no se requiere infraestructura y/o mano de obra especializada, el costo de cultivo es bajo. Por tal razón, este tipo de cultivo es altamente eficiente y puede ofrecer buenas ganancias con poca inversión, además de tener un bajo impacto ambiental.

En estos sistemas de cultivo se pueden producir diferentes especies de peces, principalmente aquellos que se alimentan de organismos que ocupan eslabones bajos en la cadena alimenticia, como los herbívoros (que consumen plantas), los bentófagos (que consumen organismos de los fondos) y los planctófagos (que consumen plancton: pequeños organismos de la columna del agua ya sean vegetales o animales). También se pueden producir moluscos (la mayoría de los moluscos cultivados son filtradores), macroalgas y esponjas, entre otros organismos acuáticos (Funge-Smith y Phillips, 2001).

Otro sistema tradicional es el cultivo semi-intensivo, en el cual se puede producir mayor cantidad de organismos por unidad de área que en un sistema extensivo. Se caracteriza por utilizar estanques de 0.5 ha o de mayor tamaño, en los cuales se puede producir una especie particular (monocultivo) o varias especies (policultivo) con hábitos alimenticios diferentes (bentófagos, malacófagos, herbívoros, fitoplantófagos y zooplantófagos), dentro de las cuales se encuentran tanto peces como crustáceos y en algunos casos, moluscos y pelecípodos. Para hacer un uso más racional e

intensivo de la cadena trófica, en estos sistemas se adicionan nutrientes exógenos, como fertilizantes orgánicos e inorgánicos.

En muchos casos se adicionan los llamados fertilizantes verdes, que se colocan en digestores para su fermentación hasta obtener los nutrientes en su forma más básica. Con estos nutrientes se trata de impactar a la cadena trófica de tal manera que los organismos cultivados tengan disponibilidad de alimento por la productividad del cuerpo de agua, ayudada por la adición de nutrientes. En el caso de los policultivos, peces y/o crustáceos pueden consumir tanto los organismos del fondo, como los de la columna del agua, sin competir por el alimento. En estos sistemas es necesario mantener un equilibrio entre la fertilización y la cantidad de oxígeno, sobre todo en las madrugadas cuando el consumo de oxígeno es máximo. De esta manera, se requiere personal con mediana especialización para manejar adecuadamente la fertilización, monitorear el crecimiento de los peces y en el caso necesario, incrementar la aireación en el estanque o realizar recambios de agua. En estos sistemas se puede proporcionar alimentación suplementaria, con productos como gramíneas o pastas de oleaginosas para incrementar los carbohidratos o proteínas de origen vegetal y con ello incrementar la biomasa del estanque.

Estos cultivos semi-intensivos pueden generar producciones de 0.5 a 30 Ton/Ha, lo cual va a depender directamente de las especies a utilizar, el manejo del estanque, la fertilización y desde luego los alimentos suplementarios. Son sistemas altamente productivos, de bajo costo, sustentables y que generan una baja contaminación de agua, al no utilizarse alimentos balanceados, que poseen cantidades apreciables de fósforo, nitrógeno y otros nutrientes que impactan la cadena trófica en aguas abiertas.

Los sistemas de cultivo semi-intensivo de

China la han posicionado como el primer productor de peces de agua dulce (Carpas) a nivel mundial. Esta es una industria sustentable y productiva con especies que alimentan al pueblo chino y al mundo.

Sin embargo, los sistemas extensivos y semi-intensivos actualmente son utilizados por pequeños productores o son utilizados en menor escala y los productores mayores utilizan sistemas de cultivo intensivos, en los cuales, aunque se produce una mayor cantidad de organismos por unidad de área, tienen una alta demanda de alimentos balanceados y, a su vez, no son sistemas sustentables ni son amigables con el ambiente, al producir desechos nitrogenados que se descargan a los cuerpos de agua naturales (Funge-Smith y Phillips, 2001).

Los sistemas intensivos se han caracterizado por ser monocultivos que producen una especie en altas o muy altas densidades (50-150 Kg/m³), por lo que se requieren, además de una infraestructura compleja, grandes cantidades de alimentos balanceados, que significan entre el 60 y el 70% de los costos de producción. Por consiguiente son los que tienen mayor demanda de harinas y aceites de pescado, a tal grado que se ha redirigido la industria harinera para suplir las demandas de la acuicultura. Peces marinos como la anchoeta, la sardina del pacífico, caballas, capelines y anguilas de arena son sobreexplotados para la producción de harinas, lo cual, aunado al calentamiento global, ha causado el colapso de sus pesquerías, haciendo que cada vez haya más escasez de harina y aceites de pescado a nivel mundial. Los monocultivos intensivos a gran escala producen cientos de toneladas por hectárea y requieren de mano de obra especializada, actualmente son sistemas poco sustentables, extremadamente contaminantes, en términos de los desechos que se arrojan al medio ambiente, que eutrofizan las aguas y pueden generar mareas rojas que producen

efectos de gran mortalidad en los organismos. En muchos casos las especies cultivadas tienen hábitos carnívoros, lo que incrementa la demanda de fuentes ricas en proteína, como las harinas de pescado. Por otro lado, en estos sistemas los organismos cultivados son más susceptibles a enfermedades y parásitos debido a las altas densidades de cultivo. Otro problema de los cultivos intensivos, por ejemplo en el caso de los cultivos de especies exóticas, es la liberación accidental de los organismos cultivados al medio ambiente, que puede tener efectos catastróficos en los ecosistemas, incluyendo el desplazamiento de las especies nativas. Adicionalmente el movimiento de especies de un país a otro para su cultivo, ha acarreado epizootias de virus, bacterianas y parasitarias, que pueden acabar con la producción acuícola de toda una región (Funge-Smith y Phillips, 2001).

Los cultivos intensivos altamente productivos con altos costos ecológicos, siguen siendo mantenidos por las grandes empresas transnacionales para un mercado cada vez más demandante. La industria pecuaria ha tenido que buscar otras fuentes alimenticias, como harinas y aceites vegetales, con el fin de utilizarlos como ingredientes alternativos de los alimentos para los organismos cultivados. Sin embargo, una limitante de muchos productos de origen vegetal es la presencia de antinutrientes, lo que ha limitado su uso en la alimentación acuícola. Por esta razón, en la actualidad se pueden aplicar diferentes técnicas para la eliminación de antinutrientes, ya sea con tratamiento térmico, extracción de los aceites, inhibición de productos tóxicos o modificación genética de líneas vegetales. Proteínas de origen vegetal, como las de la pasta de soya, pasta de cacahuate, ajonjolí, girasol, cártamo y harinas de concentrados proteínicos, harinas de hojas, concentrados de destilería y microalgas, así como materiales de origen

animal, como ensilados de pescado, desperdicios de la pesca y de la ganadería así como de la avicultura, están hoy en la lista de alimentos no convencionales, en uso o con potencial uso para dietas en la acuicultura intensiva.

Sin embargo, el no poder disponer de harina de pescado es un gran reto, pues esta harina posee perfiles de aminoácidos ideales, que cubren los requerimientos de muchas especies. Por otro lado, la búsqueda de otros materiales proteínicos para sustituir la harina de pescado en dietas para peces, sigue avanzando, sobre todo dentro de las leguminosas, que son acumuladoras de proteínas y aceites. Para algunas especies se ha logrado una total sustitución de harinas de pescado en los alimentos, sin embargo, para peces carnívoros como los salmónidos se ha sustituido sólo en forma parcial, pues la sustitución total de las harinas de pescado reducen el crecimiento. En el caso de los aceites de pescado (de origen marino), para lograr sustituir ácidos grasos esenciales como el ácido docosahexaenoico (DHA) y el ácido eicosapentanoico (EPA), se ha logrado la modificación genética de la planta oleaginosa *Camelina sativa* para la producción de EPA como precursor de DHA (Betancor *et al.*, 2015).

2. Retos y perspectivas de la acuicultura

Con el incremento de la productividad de alimentos a través de la acuicultura estamos comenzando con lo que hoy se conoce como “revolución azul” (Vela y Ojeda, 2007), análoga a lo que fue la “revolución verde” en agricultura. Sin embargo, esta “revolución azul” deberá estar bien orientada para evitar mayores impactos al ambiente. La acuicultura bien manejada, con la aplicación de nuevas tecnologías, es una opción para la producción de alimentos altamente nutritivos, que podrá contribuir de manera importante a cubrir los

retos de seguridad alimentaria en el mundo. Por lo anterior y debido al incremento de la demanda de productos acuáticos, es urgente el uso y desarrollo de tecnologías más eficaces y sustentables en la producción acuícola (Funge-Smith y Phillips, 2001).

Ejemplos de ello son los sistemas de recirculación acuícola (RAS, por sus siglas en inglés), los sistemas agro acuícolas integrados como la acuaponia y los sistemas con tecnología Biofloc. En los sistemas de recirculación, el agua con los desechos producidos por los animales no se vierte al ambiente, sino que es reutilizada dentro del mismo sistema después de ser tratada gracias a la acción de sedimentadores, filtros biológicos, tratamiento con luz ultravioleta, etc. En estos sistemas los recambios de agua son mínimos y al no vertirse desechos nitrogenados al ambiente, son más sustentables que un sistema de cultivo intensivo tradicional. Son sistemas altamente tecnificados y se requiere tener un control estricto de las condiciones del sistema y de la calidad de agua para garantizar las condiciones óptimas para los organismos en cultivo (Funge-Smith y Phillips, 2001, Timmons y Ebeling, 2010, Espinal y Matuli'c, 2019). Mientras tanto, en los sistemas de acuaponia, se combinan técnicas de acuicultura con técnicas de hidroponia, pudiendo producir organismos acuáticos y plantas para consumo humano, como frutas y hortalizas. El agua con los desechos de los organismos acuáticos aporta nutrientes a las plantas que se producen y de manera similar a los sistemas de recirculación, el agua de desecho, puede reutilizarse dentro del sistema después de ser tratada. En estos sistemas también se debe tener un control estricto de la calidad del agua y de las proporciones de nutrientes aportados a las plantas, por lo que en ocasiones es necesario añadir nutrientes para tener un balance adecuado de los mismos y que las plantas puedan llevar a cabo su proceso de fotosíntesis de manera adecuada

(Goddek *et al.*, 2019, Joyce *et al.*, 2019, Lennard *et al.*, 2019). Por otro lado, en los sistemas con tecnología Biofloc, también se pueden producir grandes biomásas de organismos, de una manera sustentable. Estos sistemas se basan en la producción de flóculos microbianos, en los que se encuentran diferentes microorganismos asociados entre sí (bacterias aeróbicas, microalgas, organismos zooplanctónicos, nemátodos, etc.), asociados a su vez a un sustrato. Estos flóculos microbianos, son beneficiosos para el cultivo porque pueden servir como fuente alimenticia para los organismos cultivados, como peces o camarones, son ricos en proteína y además pueden tener un efecto probiótico. Esto permite que se pueda disminuir la demanda de alimento balanceado, reduciendo los costos de alimentación. De la misma manera, los recambios de agua son mínimos, no se vierten desechos nitrogenados al ambiente y estos son utilizados por los microorganismos que componen los flóculos. Sin embargo, el mantenimiento de estos sistemas debe llevarse a cabo con riguroso control de los factores ambientales para evitar el desarrollo de bacterias anaeróbicas o la invasión de microorganismos antagónicos que afecten el equilibrio del sistema. De no mantener las condiciones adecuadas podría ser desastroso para el cultivo (Hernández-Mancipe *et al.*, 2019).

Por otro lado, la FAO reconoce que el futuro de la acuicultura para el 2050 se encuentra en las especies que se alimentan de organismos de la parte baja de las cadenas alimenticias, como son los bentófagos, fitoplanctófagos, zooplanctófagos y herbívoros que tienen un gran potencial acuícola. Por lo anterior se tendrá que incentivar el cultivo de nuevas especies menos demandantes de harinas y aceites de pescado.

El futuro de la acuicultura, además de la aplicación de tecnologías eficientes, requie-

re de especies de peces y crustáceos nativas, evitando la translocación de especies (Funge-Smith y Phillips, 2001, Bibus 2015). También es necesario el establecimiento de más cultivos extensivos y semi-intensivos, en donde se produzcan especies con ítems alimenticios de niveles bajos en la cadena trófica y en los que no se demanden las harinas y los aceites de pescado. Estos sistemas pueden incrementar notablemente la producción con la utilización de diferentes especies en policultivos, que permitan la utilización de los productos de la cadena alimenticia (bentos, fito y zooplancton), de una manera más integral, que permita la transferencia de nutrientes y energía hacia los productos de la acuicultura que serán consumidos en los mercados locales. Estos sistemas de cultivo para cada región permitirán un adecuado uso de las especies nativas y de los insumos regionales para la producción de especies para el autoconsumo y la exportación. Actualmente existen muchas especies nativas con potencial de cultivo a lo largo del mundo, que pueden producirse en policultivos regionales (Funge-Smith y Phillips, 2001, Béné *et al.*, 2015, Grafton *et al.*, 2015). Para lo anterior, es menester establecer políticas públicas que impulsen la investigación sobre la biología y el cultivo de diferentes especies nativas con potencial acuícola, así como el desarrollo de los procedimientos y metodologías para incrementar la producción acuícola, por medio de sistemas de cultivo extensivos, semi-intensivos o sistemas más eficientes como los sistemas RAS, acua-pónicos o sistemas biofloc, de manera que se produzcan alimentos de manera sustentable, que permitan generar empresas que puedan mantener estos cultivos a escalas crecientes y utilizando insumos regionales para el cultivo comercial. El futuro de la acuicultura tendrá necesariamente que basarse en la producción de organismos acuáticos en sistemas que per-

mitan aprovechar la productividad natural de las cadenas tróficas, sin competir por los productos pesqueros que deberían ser usados para la alimentación humana.

3. Las enfermedades infecciosas como limitante principal en la producción acuícola

La actividad acuícola enfrenta numerosos retos tales como el cambio climático, la contaminación, pobre planeación y malas prácticas de manejo que resultan en impactos negativos al ecosistema y comunidades. Además, pueden influenciar en la abundancia y los impactos de las enfermedades (FAO/NACA 2000, Bagum *et al.*, 2013). Se considera que las enfermedades son el principal factor que detiene el sano y sostenible desarrollo de la actividad acuícola, por lo que se requiere cambiar de paradigma para enfrentar los riesgos de la bioseguridad (Leung y Bates, 2013, Bernoth *et al.*, 2008, FAO 2020), especialmente porque la mayor producción acuícola proviene de países en desarrollo (Assefa y Abunna, 2018, FAO 2020).

Las pérdidas anuales por enfermedades infecciosas son causantes particularmente de impactos económicos y sociales devastadores y alcanzan los 6 billones de dólares causando daños al sustento de los productores, pérdidas de empleo, reducción de ingresos y seguridad alimentaria (Assefa y Abbuna, 2018). Por ejemplo, India se ha convertido en el segundo productor de acuicultura en el mundo después de China, sin embargo, se reportó un billón de dólares de pérdidas debido solamente a enfermedades del camarón cultivado (Briggs *et al.*, 2004) y China perdió el 15% de la producción total debido a enfermedades (Leung y Bates, 2013). La anemia infecciosa del salmón costó 2 billones de dólares y causó la pérdida de 20,000 trabajos en Chile (Mardones *et al.*, 2009, 2011). La enfermedad del

páncreas del salmón del Atlántico ocasionó pérdidas estimadas en 55.4 millones de Coronas Noruegas (Pettersen *et al.*, 2015). Pérdidas del orden de US \$650 millones en Tailandia y más de \$6 billones en India a causa de enfermedades en acuicultura, éstos son impactos importantes en la producción y economía de estos países asiáticos (Mishra *et al.*, 2017). Shinn *et al.* (2014) realizaron una revisión de 69 especies de organismos que se cultivan en aguas salobres y marinas y de las pérdidas asociadas a parásitos reportadas en el mundo, demostrando claramente la importancia de las enfermedades parasitarias, sus efectos en la producción de alimentos y en la economía regional.

En México, la industria del camarón es la más importante debido a las fuentes de empleo, divisas y alimento que aporta al país. La camaronicultura ocupaba en 2009 el noveno lugar de producción en el mundo con 133,282 toneladas y representó el 71.6% del total nacional de camarón; ocupó también el primer lugar por valor en la producción total de la pesca y la acuicultura nacional y el primero como generador de divisas. Su tasa de crecimiento fue de 4.7% y en cuanto a exportaciones, ocupó también el primer lugar enviando productos a Estados Unidos, Japón y España (CONAPESCA 2011). Sin embargo, las enfermedades asociadas al virus de la mancha blanca, principalmente en el estado de Sonora, ocasionaron que para 2010 la producción se redujera de 133,282 toneladas a 49,717 toneladas (CONAPESCA 2011). Posteriormente, en 2013 por introducciones de camarón de Asia a México sin control sanitario, se diagnosticó la enfermedad emergente conocida como Enfermedad Aguda de la Necrosis del Hepatopáncreas (AHPND por sus siglas en inglés) generando mortalidades hasta del 90% (Lightner *et al.*, 2013, Nunan *et al.*, 2014, Soto-Rodríguez *et al.*, 2015).

Estos son sólo algunos ejemplos que indican que sin las cuantiosas pérdidas tanto económicas como en toneladas de alimentos, causadas por las enfermedades infecciosas, las cifras de producción en el mundo señaladas por la FAO año con año, hubieran alcanzado niveles más altos en producción y reducción millonaria en la pérdida de dólares. Lo anterior confirma que las enfermedades son el factor más importante que restringe la expansión de la acuicultura hacia el 2050 (Stentiford *et al.*, 2012). La Tabla 1 muestra las pérdidas ocasionadas tan sólo por el virus de la mancha blanca, de 1993 al 2000, en diversos países. Lo anterior debido a diversos factores pero principalmente al movimiento irresponsable de organismos acuáticos, sin seguir las reglas sanitarias internacionales para el movimiento transfronterizo de organismos acuáticos.

El movimiento transfronterizo de animales acuáticos vivos, material genético y productos de animales acuáticos conlleva un riesgo inherente de translocar patógenos de los mismos, al introducirlos y propagarlos a países hasta ahora libres de estos patógenos (Bernoth *et al.*, 2008, Krkošek 2017). La transmisión depende de la densidad, la cual crea un umbral de efectos en los que la enfermedad puede cambiar abruptamente de una dinámica endémica a una epizootica y la hidrodinámica por su lado, permite que los patógenos se dispersen ampliamente, interconectando las granjas y afectando organismos silvestres locales (Krkošek 2017). Para reducir estos riesgos, la FAO y muchos gobiernos de los principales países productores han desarrollado diversos documentos como códigos, protocolos, pautas y manuales, dirigidos a gobiernos, productores y en general a toda la cadena de valor de las especies, para reducir el riesgo de introducir y propagar patógenos de peces y mariscos. Hace pocas décadas los productores acuícolas con algún tipo de economía y bajo

TABLA 1. Pérdidas económicas ocasionadas por el virus de la mancha blanca (WSSV) en diversos países*.

País	Año	Pérdidas económicas
República Popular China	1993	\$250 millones US
India	1994/1995	\$17.6 millones US**
Malasia	1995-1999	\$25 millones anuales US
Bangladesh	1995	\$10 millones US
Tailandia	1996	\$210-250 millones US
Tailandia	1997	\$600 millones US
Shri Lanka	1998-1999	RS 1 billón
Ecuador	Abril-Agosto 1999	\$280.5 millones US
Ecuador	2000	\$400 millones US
Panamá	Principio de 1999	\$40 millones US
México	1999	\$44.8 millones US***
México	2000	\$30.2 millones US***

*Cortesía Dr. Richard Arthur. **Incluye pérdidas debidas a YHV *** (SAGARPA 2000)

nivel de educación, no conocían el impacto económico y social que podían producir con la introducción de especies de un lugar a otro, pero actualmente la información actualizada de sus efectos es muy bien conocida en el medio acuícola.

Sin embargo, los productores continúan moviendo organismos, a pesar de conocer el riesgo de introducir patógenos. Existen numerosos ejemplos de este fenómeno en peces, crustáceos y moluscos que se cultivan. En ocasiones los productores de más alto nivel económico y de educación, incluso con conocimiento de este problema, ignoran las normas nacionales e internacionales cuando quieren traer nuevas líneas genéticas de las especies que cultivan, con lo que finalmente introducen patógenos altamente virulentos de otros países.

Como resultado de estos problemas, el número de patógenos introducidos y dispersados continúa alrededor del mundo. Las enfermedades de animales acuáticos transfronterizos se propagan con mucha rapidez a otras granjas y aldeas locales, distritos y finalmente a todo el país; el problema, por lo tanto, debe ser abordado de manera co-responsable por los productores, autoridades locales, au-

toridades del país, en base regional e internacional (Bernoth *et al.*, 2008). Es necesario aceptar que, una vez que un patógeno entra a un nuevo medio acuático, es prácticamente imposible erradicarlo, por lo que aquí se aplica el viejo adagio “es mejor prevenir que curar”. El comercio seguirá existiendo y a pesar de todas las precauciones, las enfermedades seguirán propagándose internacionalmente. Sin embargo, para poder reducir este riesgo y que sus efectos pueden mitigarse, se requiere que todas las partes de la cadena de comercio, desde el productor a las organizaciones internacionales, acepten su responsabilidad de cooperar para proporcionar una cadena ininterrumpida de bioseguridad (Bernoth *et al.*, 2008).

Las enfermedades emergentes (nuevas) en particular, son un reto cuando aparecen por primera vez, porque se desconoce todo o se conoce muy poco de las mismas y las respuestas para su control o erradicación son lentas, costosas y a menudo no efectivas. La aparición de estas enfermedades en acuicultura es debida a factores multifacéticos altamente interconectados como el comercio globalizado de animales acuáticos y sus productos, la intensificación de la acuicultura, el movimiento

de reproductores, huevos, crías, juveniles y la expansión del comercio de organismos para la acuariofilia (Subasinghe *et al.*, 2001). Otros factores como el cambio climático, interacciones negativas entre organismos silvestres y cultivados, la no aplicación de medidas de bioseguridad, la falta de programas de vigilancia y monitoreo efectivos, carencia o no implementación de planes de preparación, en caso de la surgencia de una enfermedad emergente y planes de contingencia. El control de las enfermedades endémicas ocasiona importantes costos año tras año a los productores, de tal manera que la aparición de enfermedades emergentes ocasiona importantes y serios impactos a los productores y a las poblaciones silvestres (Murray y Peeler, 2005). Para reducir estos impactos la NACA/FAO (2000) sugiere seguir las estrategias de bioseguridad establecidas en la Conferencia Mundial de Acuicultura del Tercer Milenio como sigue:

i) Normas nacionales e internacionales.

No se logrará controlar la dispersión de las enfermedades emergentes si no se desarrollan las leyes, normas, reglamentos o códigos a nivel nacional y éstas no se armonizan con las políticas regionales e internacionales sobre introducción y movimiento de animales acuáticos vivos y sus productos, para reducir los riesgos de introducción, establecimiento y propagación de animales acuáticos y sus patógenos e impactos resultantes sobre la biodiversidad acuática. Para ello existen documentos que pueden servir tanto a los políticos encargados de la salud animal de cada país, como a los mismos productores, dentro de los cuales encontramos: a) “Acuerdo Sanitario y Fitosanitario” (SPS por sus siglas en inglés) establecido por la Organización Mundial de Comercio (WTO) en enero de 1995, que establece las reglas básicas para la inocuidad y la salud de plantas y animales; b) Los “estánda-

res de la Organización para la Salud Animal” (OIE), que establecen las normas para proteger la salud de los animales pero sin imponer barreras de comercio injustificables; c) El “Código de la Salud” de los animales acuáticos de la OIE, que garantiza la seguridad sanitaria del comercio internacional de animales acuáticos y sus productos; y d) Las “Directrices Técnicas Regionales sobre Gestión de la Salud y el Movimiento Responsable de Organismos Acuáticos” desarrollado por la FAO/NACA (Bernoth *et al.*, 2008). Sin embargo, el problema en muchos países en desarrollo es que a veces aunque se encuentren establecidas las legislaciones, las instancias gubernamentales que tienen que dar seguimiento a las mismas, no cuentan con los recursos ni el personal necesario para su cumplimiento y/o los productores hacen caso omiso de dichas reglas nacionales e internacionales y sucede lo que ha pasado en México, con la bacteria AHPND.

ii) Educación

Es necesario que los acuicultores (tanto productores de alimentos para consumo humano, de peces ornamentales y otros productos de origen acuático), reciban la información con el fin de adquirir conocimiento y conciencia para evitar la introducción de especies exóticas y que entiendan que las zonas libres de enfermedades emergentes comienzan con granjas libres de patógenos (Subasinghe *et al.*, 2004). Por lo tanto, el énfasis en las medidas preventivas para evitar la introducción y dispersión de patógenos debe estar en la concientización de las personas. El desafío es enseñar a los productores con diferentes niveles de educación, la necesidad de seguir los códigos, protocolos y pautas, lo cual no es fácil. Para ello se requiere del desarrollo de capacidades tanto a nivel institucional como de acuicultores a través de la educación y la extensión.

iii) Implementación de sistemas de información
Los países deben desarrollar e implementar sistemas de reportes y bases de datos efectivos sobre mecanismos de colecta y análisis de la información de las enfermedades y patógenos existentes en el país. Sin el conocimiento de las enfermedades con las que se enfrenta la acuicultura regional, así como de su distribución, prevalencia en las granjas y la biología del patógeno o parásito, es difícil llevar a cabo planes de monitoreo, vigilancia y contingencias por todas las instancias involucradas.

iv) Investigación y desarrollo tecnológico

Es necesario mejorar la tecnología a través de la investigación para desarrollar, estandarizar, armonizar y validar técnicas de diagnóstico sensibles, así como métodos terapéuticos libres de peligro y metodologías efectivas para el control de las enfermedades emergentes.

4. El cambio climático y sus efectos en la acuicultura

Los efectos del cambio climático sobre la acuicultura han ganado considerable interés debido a la significativa contribución del sector a la seguridad alimentaria, nutrición y medios de vida (Ahmed *et al.*, 2019, FAO 2020, Maulu *et al.*, 2021). El cambio climático afectará la pesca y la acuicultura por múltiples factores, ya sean positivos o negativos, como: la acidificación de los mares, cambios en la temperatura del mar y en los patrones de circulación, así como en la frecuencia y severidad de los eventos como huracanes, el aumento del nivel medio del mar, cambios en la salinidad de la superficie del mar, florecimiento de algas dañinas, cambios en los patrones de lluvia y la incertidumbre en el abastecimiento de insumos como los productos pesqueros (De Silva y Soto, 2009, De Young *et al.*, 2012, Maulu *et al.*, 2021). Lo anterior causará impactos directos e indirectos a la producción de alimentos,

a las cadenas alimenticias y altos costos a pescadores y acuicultores (Daw *et al.*, 2009, Badjeck *et al.*, 2010, Shelton 2014). Cerca de 200 millones de personas están directa e indirectamente empleadas en la industria acuícola a lo largo de la cadena de valor, desde la cosecha hasta la distribución (Vannuccini *et al.*, 2019, FAO 2020).

Se estima que una de las repercusiones indirectas más importantes se derivaría de la escasa disponibilidad de harina y aceite de pescado para los alimentos acuícolas (De Silva y Soto, 2009). Por su parte, los ecosistemas se verán fuertemente afectados y las especies tendrán que migrar hacia aguas más favorables, la mayoría hacia los polos (Shelton 2014). El aumento del nivel del mar, las tormentas e inundaciones causarán estragos devastadores en la infraestructura acuícola, tal como sucedió con el tsunami del sudeste asiático del 2004, en al menos 7 países (Indonesia, Malasia, Maldivas, Myanmar, Sri Lanka, Tailandia, Bangladesh). En Indonesia, por dar un ejemplo, se reportan pérdidas por infraestructura acuícola de alrededor de \$210,935,555 millones de dólares y en acuicultura de agua salobre, un área de 36,597 ha se perdieron totalmente, con una pérdida en la producción de \$480,821,782 millones de dólares. A estas pérdidas, falta sumar los costos millonarios de la reconstrucción (FAO 2005).

Por lo anterior, cada país debe prepararse para responder a los impactos del cambio climático a través de reducir su vulnerabilidad (De Young *et al.*, 2012), puesto que ésta varía de región a región dependiendo de las zonas climáticas, áreas geográficas (tierra adentro o costeras), los tipos de sistemas acuícolas y las especies que se cultivan (Islam *et al.*, 2019). Por lo tanto, es un pre-requisito entender los efectos del cambio climático sobre las respuestas biológicas, recursos y economía en la acuicultura. Lo anterior propiciará el desarro-

llo de enfoques innovadores de adaptación y ayudará a elaborar planes estratégicos para definir las necesidades e investigaciones necesarias. Un aspecto importante a considerar, es la capacidad de la acuicultura para adaptarse al cambio climático, llevando a cabo cambios en el manejo o soluciones biotecnológicas y de ingeniería, para con ello adaptarse a un nuevo medio ambiente, lo cual es una ventaja que puede ser capitalizada (Reid *et al.*, 2019). Sin embargo, se requiere experiencia y conocimiento acerca de la vulnerabilidad de cada país, con el fin de optimizar las adaptaciones y reducir la incertidumbre a todos los niveles, comenzando con los procesos de los ecosistemas y apoyando todas las formas de pesca y producción acuícola, así como evaluar los factores socioeconómicos que pueden afectar la prioridad de esas adaptaciones (Bell *et al.*, 2013).

Para reducir dichas vulnerabilidades, se cuenta con el Código de Conducta para la Pesca Responsable (FAO 1995), que demuestra los principios y estándares aplicables a la conservación, manejo y desarrollo de la pesca y la acuicultura así como prevenir la sobrepesca, minimizar los impactos negativos al ecosistema acuático y comunidades locales, la protección de los derechos humanos y asegurar medios de vida justos (De Young *et al.*, 2012). Hay muchas opciones para la adaptación de la acuicultura, desde cambios en la gestión hasta ingeniería compleja o soluciones biotecnológicas, y todo esto respaldado por la investigación a todos los niveles (academia, gobierno e industria) así como prueba y error de parte de los productores (Reid *et al.*, 2019). Los efectos del cambio climático han sido ampliamente estudiados y revisados tanto a nivel regional como a escala global. Sin embargo, los estudios derivan especialmente en los efectos negativos y no en los positivos los cuales son muy críticos para las estrategias de adaptación

(Maulu *et al.*, 2021). Ejemplo de casos positivos del cambio climático, es que se puede impulsar el desarrollo de la acuicultura de agua dulce, mientras se deteriora el de las aguas salobres y marinas (Bell *et al.*, 2013), siempre y cuando se cuente con las fuentes de agua libres de contaminación y en cantidad suficiente para otras actividades, incluyendo el agua para el consumo humano. Un aspecto que no se analiza frecuentemente son los cambios en las tasas de crecimiento de bacterias patógenas o la incidencia de parásitos y virus transmitidos por los alimentos. Tampoco se estudia la posibilidad del incremento en la virulencia de patógenos de los animales acuáticos y cambios en su susceptibilidad a patógenos e infecciones, por lo que planes de bioseguridad son esenciales (Vannuccini *et al.*, 2019). Desafortunadamente en México las instancias gubernamentales no han implementado ningún programa sobre la investigación de los efectos del cambio climático en la acuicultura.

5. Uso de pre- y probióticos en la nutrición acuícola

La implementación de estrategias de alimentación es otro de los retos del sector acuícola y debe estar enfocada a optimizar la inversión. La mortalidad causada principalmente por infecciones bacterianas y virales, es una variable importante a considerar, aunada al estrés causado por el mismo sistema de cultivo. El uso desmedido de antibióticos para mitigar infecciones es preocupante, puesto que puede ocasionar resistencia en los distintos patógenos presentes en peces y humanos. Una de las alternativas viables para aumentar la salud y desempeño de los peces en cultivo, es el uso de alimentos suplementados con prebióticos y probióticos.

Los prebióticos han sido definidos como sustratos que incrementan el crecimiento y la actividad benéfica de la microbiota intes-

tinal, y por lo tanto promueven la salud del hospedero (Gibson *et al.*, 2017). Se ha reportado que los prebióticos modulan el sistema inmunológico, disminuyen el estrés oxidativo y mejoran la morfología intestinal de los peces (Dimitroglou *et al.*, 2011, Merrifield y Ringo, 2014), así como incrementan el crecimiento, la eficiencia alimenticia, modulan la microbiota intestinal y la actividad de las enzimas digestivas (Guerreiro *et al.*, 2017). En la acuicultura los prebióticos más utilizados son la inulina (Mahious *et al.*, 2006, Hoseinifar *et al.*, 2015, Tiengtam *et al.*, 2015, Oliveira *et al.*, 2020), los β -glucanos (Vetvicka *et al.*, 2013, Ghaedi *et al.*, 2015, Cao *et al.*, 2019), los mananooligosacáridos (MOS) (Torrecillas *et al.*, 2007, Zhou *et al.*, 2010, Hoseinifar *et al.*, 2015, Hahor *et al.*, 2019) y la pared celular de *Saccharomyces cerevisiae* (Hoseinifar *et al.*, 2011, Abu-Elala *et al.*, 2013, 2018, Zhang *et al.*, 2020). Los distintos prebióticos pueden ser metabolizados por bacterias ácido lácticas como *Bifidobacterium* spp. y *Lactobacillus* spp., que se encuentran en el tracto digestivo del hospedero y forman ácidos grasos de cadena corta, que pueden ser absorbidos por el mismo, para utilizarse como fuentes de energía (Guerreiro *et al.*, 2017) o como activadores de diversas vías de señalización (He *et al.*, 2020).

Los probióticos son microorganismos vivos que en ciertas cantidades (al menos 10^6 - 10^9 UFC/g) proporcionan beneficios al hospedero (FAO 2006, Behboudi-Jobbehdar *et al.*, 2013). Existen distintos efectos benéficos derivados de la aplicación de probióticos, tales como el incremento del crecimiento, el aumento de la producción de enzimas digestivas (amilasas, lipasas, proteasas) (Tovar-Ramírez *et al.*, 2002, 2004, Wang y Xu, 2006, Essa *et al.*, 2010, Wu *et al.*, 2012, Mohammadian *et al.*, 2017) y la estimulación de la respuesta inmune, que conlleva a la supresión de enfermeda-

des infecciosas (Akhter *et al.*, 2015), las cuales llegan a causar mortalidad masiva de peces y grandes pérdidas económicas en sistemas acuícolas.

Entre los probióticos más utilizados en la acuicultura, destacan las bacterias de los géneros *Lactobacillus* spp., *Lactococcus* spp., *Bacillus* spp., *Clostridium* spp. y *Streptococcus* spp., así como la levadura *Saccharomyces cerevisiae* (Lara-Flores *et al.*, 2003, Mohapatra *et al.*, 2012, Ayyat *et al.*, 2014, Gao *et al.*, 2016, Munirasu *et al.*, 2017, Xia *et al.*, 2018, Akter *et al.*, 2019, Zhang *et al.*, 2019). La mayoría de estos probióticos se utilizan como aislados comerciales provenientes del tracto digestivo humano y otros provenientes de organismos acuáticos usados en la acuicultura. Sin embargo, existen probióticos (*Bacillus* spp., *Lactobacillus* spp. y *Carnobacterium* spp.) aislados de organismos silvestres (e.g. peces como *Salmo salar*, *Oncorhynchus mykiss*, *Cyprinus carpio*, *Oreochromis niloticus*, *Tor grypus*, *Colossoma macropomum* y *Labeo rohita*), utilizados como suplemento alimenticio de organismos acuáticos en cautiverio, con óptimos resultados, mejorando incluso la eficiencia de los probióticos comerciales (Robertson *et al.*, 2000, Kim y Austin, 2006, Wang y Xu, 2006, Essa *et al.*, 2010, Mohammadian *et al.*, 2017, Dias *et al.*, 2018, Mukherjee *et al.*, 2019).

En distintos trabajos se ha observado que géneros bacterianos y levaduras del género *Saccharomyces* sp., usados como probióticos, producen una variedad de nutrientes como ácidos grasos de cadena corta y aminoácidos. En el área acuícola se ha determinado que estos metabolitos están directamente relacionados con la mejora en el crecimiento, incremento del sistema inmune, inducción de la metamorfosis y la pigmentación así como la producción de hormonas importantes, que intervienen en el desarrollo adecuado de los organismos que consumen dichos metabolitos

TABLA 2. Probióticos, metabolitos que producen y ejemplos de sus efectos en peces.

Probiótico	Metabolito(s) producido(s)	Ejemplo de uso	Efecto en hospedero	Referencia
<i>Saccharomyces</i> spp. (Gong et al., 2013)	Butirato y propionato	Ciprinidos (ej. <i>Cyprinus carpio</i>) <i>Oncorhynchus mykiss</i>	Incremento crecimiento (hormona del crecimiento) y expresión de genes del sistema inmune	Hoseinifar et al., 2016
<i>Lactobacillus</i> spp. (Toe et al., 2019, Mutaguchi et al., 2018)	Alanina, arginina, fenilalanina, glicina, glutamato, isoleucina, leucina, lisina, metionina, serina, triptófano y valina	<i>Oncorhynchus mykiss</i> <i>Cirrhinus mrigala</i> <i>Solea senegalensis</i>	Incremento hormonas del páncreas, glucagón e insulina y crecimiento	Mommsen et al., 2001, Ahmed y Khan, 2006, Pinto et al., 2009
<i>Lactococcus</i> spp. (Hernandez-Valdes et al., 2020)	Glutamato, histidina, isoleucina, leucina, metionina y valina	<i>Paralichthys olivaceus</i>	Incremento crecimiento	Wang et al., 2017
<i>Bacillus</i> spp. (Stahmann et al., 2000)	Vitaminas B	<i>Lutjanus guttatus</i>	Incremento crecimiento	Chávez-Sánchez et al., 2018
<i>Lactobacillus</i> spp. (Santos et al., 2008, LeBlanc et al., 2017)	Vitaminas B	<i>Oreochromis niloticus</i>	Incremento crecimiento	Sarker et al., 2012

(Tabla 2).

Una alternativa interesante en cuanto a la adición de suplementos, es el uso de los llamados sinbióticos (del inglés synbiotic; Cerezuela *et al.*, 2011) o sintróficos, que son combinaciones de al menos un microorganismo probiótico y una sustancia prebiótica. Se ha encontrado que la utilización de pre- y probióticos en conjunto inducen un incremento en los efectos benéficos, comparado con la utilización de los mismos de forma separada (Rodríguez-Estrada *et al.*, 2009, Hasan *et al.*, 2018, Lee *et al.*, 2018, Rahimnejad *et al.*, 2018).

La obtención de microorganismos autóctonos (específicos de cada especie) como probióticos será un objetivo básico para aumentar la producción acuícola. Pues uno de los retos limitantes en la acuicultura es encontrar los pre- y probióticos más eficientes para cada una de las especies acuáticas en particular, e incluirlos como parte de la dieta, además de los nutrientes esenciales, con el fin de llegar a tener formulaciones más eficientes y reducir los costos de los alimentos. Las investigaciones deberán estar enfocadas en el estudio de los microorganismos y los metabolitos aso-

ciados a la salud, que permitan el mejor crecimiento de las especies en cultivo.

6. Biología de sistemas en la acuicultura

La biología de sistemas es una rama multidisciplinaria de la ciencia que se basa en el estudio holístico de los organismos vivos que, a través de las ciencias “ómicas” (Figura 1), conducen a una mejor comprensión de cómo las propiedades biológicas emergen de las interacciones entre los componentes de los sistemas vivos (Horgan y Kenny, 2011). Las ciencias “ómicas” como la genómica, transcriptómica, proteómica y metabolómica, han venido a revolucionar el estudio, conocimiento y desarrollo de biotecnologías en el cultivo de las especies acuáticas más importantes a nivel mundial (Alfaro y Young, 2016, Rise *et al.*, 2019).

En la actualidad existen más de 1,000 genomas ensamblados de diferentes especies de peces en la plataforma del Centro Nacional de Información Biotecnológica (NCBI, por sus siglas en inglés), a partir de los cuales se pueden realizar un sin número de análisis, incluyendo, la identificación de genes, selección

de caracteres y mejoramiento genético, con el objetivo de predecir con precisión rasgos poligénicos complejos, como la resistencia a enfermedades, el aumento de las tasas de ganancia genética y minimizar la endogamia, así como los posibles efectos limitantes del genotipo por las interacciones ambientales (Zenger *et al.*, 2019).

Por otro lado, las últimas tecnologías, como la transcriptómica (secuenciación de ARNm de alto rendimiento, RNA-seq), han facilitado el entendimiento de la complejidad funcional de la expresión de genes de un organismo, en un principio, por la rápida identificación de genes clave involucrados en la reproducción, el crecimiento, estrés y enfermedades de es-

pecies de interés. Sin embargo, el potencial de estas aplicaciones hoy en día va dirigido además a generar recursos genéticos y lograr un entendimiento más completo, al identificar la expresión diferencial y correlacionada de genes, con las vías moleculares y de transducción de señales (Chandhini y Kumar, 2018, Heras 2020). Además, estas herramientas tendrán un papel importante para prever los efectos del cambio climático en la actividad acuícola, al poder, por ejemplo, evaluar genes de estrés en escenarios hipotéticos o actuales de incrementos de temperatura (Heras 2020, Natnan *et al.*, 2021).

De manera similar, la proteómica y metabolómica tienen aplicaciones

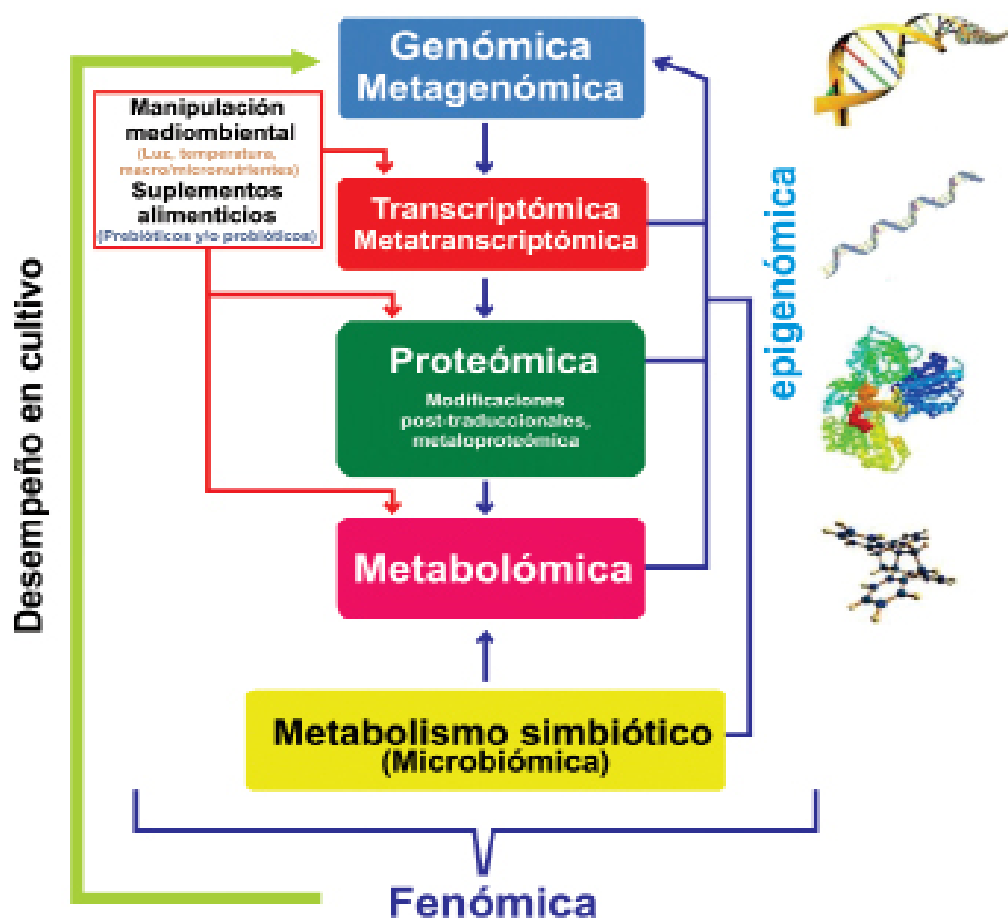


FIGURA 1. Ciencias ómicas y su interacción (Integrado y modificado de Dettmer *et al.*, 2007, Ramires-Ferreira *et al.*, 2010, Horgan y Kenny, 2011).

muy importantes para el sector acuícola. La proteómica por ejemplo, implica la extracción, separación y digestión de proteínas para con ello caracterizar los productos y subproductos acuícolas. Sin embargo, también se puede utilizar la proteómica dirigida a identificar proteínas específicas como alérgenos, o cualquier proteína asociada a la trazabilidad y calidad de los productos, por lo que esta ciencia tiene amplias aplicaciones en la acuicultura yendo desde la salud de los peces hasta la calidad y seguridad alimentaria de los productos (Nissa *et al.*, 2021). En este sentido, la metabolómica también ha sido utilizada para el estudio de aspectos medioambientales en peces, su salud y, especialmente, el estatus nutricional y la nutrición de peces en cultivo (Roque *et al.*, 2018, Alfaro y Young, 2016). Por ejemplo, recientemente, un análisis metabolómico encontró diferencias positivas de metabolitos del pez *Siniperca chuatsi* cultivados en un sistema de recirculación acuícola (RAS) contra peces cultivados en estanques tradicionales (Xiao *et al.*, 2020), abriendo una nueva línea de conocimiento y aplicación previamente inexplorada en la acuicultura.

En acuicultura actualmente se realizan un gran número de estudios integrales para comprender el vínculo entre nutrición, respuesta inmune y resistencia a enfermedades, por lo que el estudio del efecto de los nutrientes y el esquema alimenticio en el estado general de los organismos acuáticos en cultivo es de gran relevancia. Lo anterior es posible gracias a la nutrigenómica, la cual es otra ciencia ómica que integra a la biología de sistemas en la investigación nutricional, abordando el efecto de los nutrientes sobre el transcriptoma, proteoma, metaboloma, etcétera.

6.1 La nutrigenómica en la acuicultura

La industria de la acuicultura ha despertado especial interés en la nutrición de los peces

puesto que es necesario mejorar la producción de organismos acuáticos para obtener un crecimiento rápido y óptimo. Además, existe el desafío de formular alimentos balanceados adecuados para cada especie y buscar nuevas fuentes de ingredientes alimenticios, debido a que algunos de estos ingredientes actualmente provienen de fuentes que no serán sostenibles en el futuro.

La nutrigenómica se ha convertido en un área de investigación novedosa y multidisciplinaria, constituyendo una herramienta útil para evaluar las implicaciones asociadas o derivadas de una intervención alimentaria y sus componentes a nivel genómico (García-Cañas 2010, Ulloa *et al.*, 2011). Dicho en otras palabras, esta ciencia estudia a los nutrientes como señales químicas para incidir en la expresión genética y de esta forma modificar la síntesis de proteínas y el funcionamiento de las diversas rutas metabólicas (Coronado *et al.*, 2011).

El uso de la nutrigenómica en acuicultura es relativamente nuevo, sin embargo, es relevante identificar componentes dietéticos que ofrezcan un beneficio a los organismos acuáticos, también para el entendimiento de vías metabólicas específicas y así incrementar la producción de organismos, reduciendo pérdidas y teniendo poblaciones más saludables dentro de la acuicultura. La nutrigenómica utiliza diferentes herramientas como perfiles de expresión génica (transcriptoma, qPCR, microarreglos), biosíntesis de proteínas o cuantificación de metabolitos, que permiten detectar cambios fisiológicos sutiles, efectos nocivos y su impacto en el fenotipo por modificaciones dietéticas. Dentro de la acuicultura, los estudios de nutrigenómica van avanzando en un creciente número de especies acuícolas, gracias a las tecnologías de alto rendimiento y al desarrollo de los recursos genómicos (Martin *et al.*, 2016).

Se han realizado algunas investigaciones nutrigenómicas al realizar algunas modificaciones en la dietas para organismos acuáticos, como la sustitución de harina o aceite de pescado por ingredientes vegetales. En el salmón del Atlántico (*Salmo salar*), se caracterizó el perfil nutrigenómico del estrés nutricional inducido por la inclusión de harina de soya; en el hígado se encontró una mayor expresión de genes involucrados con la digestión de proteínas, el metabolismo energético y las funciones inmunes en respuesta al estrés nutricional, mientras que en el tejido del intestino se encontraron genes específicos en respuesta a la enteritis (De Santis *et al.*, 2015). Con estos resultados se pudo demostrar que la inclusión de soya en la dieta conlleva a problemas en la salud de los organismos en cultivo, por lo tanto no es viable su utilización en esta especie.

En trucha arcoiris se realizó un análisis del estado nutricional después de un periodo de restricción alimenticia. Se observó una reducción en la expresión de genes asociados a la capacidad de síntesis de proteínas, al metabolismo y transporte de lípidos, a la respiración aeróbica, a las funciones sanguíneas y a la respuesta inmune. Este análisis nutrigenómico permitió concluir que la disminución general de la expresión génica, es una respuesta metabólica que permite conservar las reservas energéticas para mejorar la capacidad de supervivencia de los peces en ayuno (Salem *et al.*, 2007).

La nutrigenómica también ha sido muy útil para determinar la salud de los organismos, utilizando diferentes frecuencias alimenticias en las especies de cultivo. Por ejemplo, en el Bagre amarillo (*Pelteobagrus fulvidraco*), a través de la expresión génica, fue posible determinar que la frecuencia de alimentación óptima para esta especie es 4 veces al día, en donde se obtuvo no sólo un mejor desempeño, sino también una mejora en la homeostasis li-

pídica, sin afectar el requerimiento energético de estos organismos (Zhang *et al.*, 2018).

Recientemente se ha determinado la relevancia de la nutrigenómica en una especie nativa de México, el pez blanco de Pátzcuaro. En este estudio se observó que larvas alimentadas con microdietas presentaron un bajo crecimiento respecto a aquellas que consumieron sólo alimento vivo, asimismo genes relacionados con el estrés, la inestabilidad del genoma y algunas marcas epigenéticas se encuentran sobre-expresadas, lo cual podría explicar el bajo rendimiento larvario observado con la microdieta. Por lo tanto, este enfoque nutrigenómico es una herramienta importante para evaluar el rendimiento de la dieta artificial en peces y la necesidad de modificar la formulación, tipo y proporción de los ingredientes en la elaboración de dietas para el pez blanco de Pátzcuaro (Juárez-Gutiérrez *et al.*, 2021).

Como ya se ha mencionado, el uso de probióticos en peces de cultivo ha ido incrementando debido a los buenos resultados en el desempeño de los organismos. Los estudios de evaluación del efecto de probióticos a nivel nutrigenómico en los peces son escasos y en la mayoría de ellos se han enfocado en la respuesta a nivel del sistema inmune, debido a los efectos encontrados por el uso de probióticos como el aumento de la inmunidad, la digestibilidad y la resistencia a enfermedades bacterianas patógenas infecciosas (Biswas *et al.*, 2013, Beck *et al.*, 2015, Nguyen *et al.*, 2017, Hasan *et al.*, 2018, 2019, Niu *et al.*, 2019).

De manera general, la suplementación probiótica aumenta los niveles de transcripción de genes que tienen que ver con procesos pro-inflamatorios, como las citocinas (Hasan *et al.*, 2018). El aumento en la expresión de citocinas pro-inflamatorias es asociado a un mejor estado inmunológico en peces y por lo tanto se presenta una mejor resistencia contra patógenos (Kim y Austin, 2006, Panigrahi *et*

al., 2007, Pirarat *et al.*, 2011, Hasan *et al.*, 2018, 2019, Jang *et al.*, 2019).

Algunos probióticos, como las bacterias ácido lácticas, han sido estudiados de manera individual debido a que hay un incremento en las actividades enzimáticas del sistema digestivo, aumentan el crecimiento de los organismos y hay una mejor utilización del alimento, lo cual se ha correlacionado con la expresión de algunos genes puntuales (Jami *et al.*, 2019). Sin embargo, también se ha observado que la combinación de cepas probióticas presenta resultados relevantes e incluso mejores, a nivel de expresión génica, que al usar una sola cepa (Giri *et al.*, 2014, Beck *et al.*, 2015, Lazado *et al.*, 2015). Esto ha dado lugar al incremento en el uso de consorcios bacterianos para mejorar la salud de los peces en cultivo.

Aunque a la fecha se ha logrado analizar algunos de los efectos de la suplementación de probióticos en los peces, aún no está claro cómo es el mecanismo de acción dentro del organismo. Trabajos en donde se evalúe el transcriptoma de los organismos proporcionarán la información necesaria para un mejor entendimiento de la acción y resultados de los probióticos en los peces. Lo anterior para una mejor selección y funcionamiento de las cepas probióticas para un cultivo exitoso de diferentes especies de peces.

La interacción de las investigaciones entre la nutrición, el estado energético animal y la función inmunológica aún está lejos de ser clara en organismos acuáticos. En la acuicultura los alimentos formulados son significativamente diferentes de la dieta natural de los organismos cultivados, y actualmente se están buscando nuevas fuentes de nutrientes (proteínas y aceites) para la sustitución de los ingredientes de origen animal por materiales de origen vegetal (Jobling 2016). Además, ahora se incorporan aditivos funcionales, que mejoran la salud de los peces, reducen los brotes

de enfermedades y mejoran la capacidad de recuperación por infecciones. Usando nuevas tecnologías ómicas, como la nutrigenómica, los impactos de la nutrición en el sistema inmunológico se están volviendo más claros, puesto que es posible determinar alteraciones en la función inmunológica local y sistémica. Aunque se ha avanzado en la investigación para definir los cambios en la función inmune del huésped, los estudios acerca de la interacción entre la nutrición de los peces, el microbioma intestinal y el sistema inmunológico apenas están comenzando a emerger (Martin y Król, 2017).

6.2 La microbiómica en la acuicultura

En la actualidad los holo-estudios reconocen la asociación simbiótica y por lo tanto natural e imprescindible, de una especie animal con su microbiota endógena y su interacción con la microbiota ambiental (Limborg *et al.*, 2018). Las especies acuícolas, expuestas a una gran diversidad de bacterias y virus patógenos, no son la excepción y su microbiota se vislumbra como una barrera de defensa contra dichos patógenos (Chiu *et al.*, 2017).

Los peces nacen y mueren en un medio acuático que es muy denso en microorganismos ($\sim 10^6$ bacteria y 10^9 virus por mL de agua, Whitman *et al.*, 1998), en comparación con el medio aéreo, aunque las condiciones ambientales suelen ser más estables en el medio acuático y por lo tanto también la carga y diversidad microbiana. Por consiguiente, el sistema inmune de los organismos acuáticos se desarrolla junto con esta alta densidad de microorganismos y concreta así una relación interdependiente entre el hospedero y su microbiota (Kogut *et al.*, 2020), que de hecho se co-regulan y co-evolucionan. El conocimiento de las reglas de interacción hospedero-huésped es aún incompleto, sin embargo algunos de los nichos que provee un organis-

mo complejo son colonizados densamente por microbiota endógena (Medzhitov 2007), al contrario de los sitios sistémicos que permanecen generalmente estériles. Uno de los sitios predilectos de colonización microbiana es el tracto digestivo tanto de vertebrados como de invertebrados. En la actualidad son amplios los estudios sobre caracterización de la microbiota intestinal de peces y otros organismos, que se llevan a cabo en todo el mundo, gracias al avance tecnológico que ha posibilitado realizar estudios “microbiómicos”, basados en los análisis ómicos de la microbiota, a partir del desarrollo de técnicas de secuenciación de DNA, RNA y proteínas, concretando en el entendimiento de la función que tiene la microbiota sobre los organismos acuáticos: digestión, homeostasis energética, síntesis de vitaminas, aminoácidos y ácidos grasos y la ya mencionada interacción directa con el sistema inmune.

Se sabe que un sistema inmune depende de una interrelación con microorganismos y sus moléculas, en consecuencia, en la actualidad se estudia el paradigma de crecer a los animales con un sistema inmune fortalecido gracias a la continua exposición a microorganismos, contrariamente a mantenerlos en un medio estéril y con un sistema inmune deprimido.

Hay muchos eventos microbiológicos de los cuales sacar partido con los análisis microbiómicos. Por un lado, se da la posibilidad de diferenciar las pérdidas de diversidad microbiana, ocasionadas por la domesticación de los organismos al comparar organismos silvestres contra cultivados. Por otro lado, en la actualidad se han realizado muchos estudios en diversas especies de peces alimentados con dietas adicionadas con suplementos prebióticos y/o probióticos con la finalidad de observar la influencia de éstos sobre el holobionte.

Finalmente, es interesante observar cómo la microbiota se torna en un “proxy” o mar-

cador tanto ambiental como de salud, es decir se empiezan a reconocer patrones y comunidades de la microbiota intestinal, de los biofiltros en los sistemas acuícolas de recirculación, de los flóculos microbianos en los sistemas biofloc y del agua como tal, que nos estarían indicando el estado de cada ambiente, mostrando por ejemplo una posible disbiosis en los organismos cultivados, causada por estrés o contaminación del sistema (Perry *et al.*, 2020).

7. La cultura del consumo del pescado

En el período 1961-2017, la tasa media de crecimiento anual del consumo total de pescado aumentó un 3.1%, superando la tasa de crecimiento anual de la población humana (1.6%). En valores *per cápita*, el consumo de pescado comestible aumentó de 9 kg (equivalente en peso vivo) en 1961 a 20.3 kg en 2017. Las estimaciones preliminares del consumo de pescado *per cápita* en 2018 se sitúan actualmente en 20.5 kg (FAO 2020). El aumento en la demanda de pescados y mariscos promueve la exportación e importación de productos pesqueros entre países. Es necesaria una trazabilidad para darle certeza al consumidor sobre el origen y manejo de los productos pesqueros y acuícolas. Sin embargo, debido al poco conocimiento y falta de cultura de consumo de pescados y mariscos en nuestro país, generalmente esto no se implementa. La falta de trazabilidad provoca diversos problemas, siendo el principal, el que el consumidor desconozca si el producto es de origen nacional o importado, acuícola o pesquero, si es inocuo, saludable y, en ocasiones, si es de origen marino o de agua dulce (Sterling y Chiasson, 2014, Goulding 2016).

En México a la falta de cultura gastronómica de pescados y mariscos, debe sumarse el poco interés por conocer lo que se consume. Por lo general se conoce con el nombre

“pescado” a todas las especies de peces disponibles en el mercado, dando por sentado que todas las especies son iguales en origen, manejo, calidad nutricional, etc., ignorando completamente su trazabilidad. Este desconocimiento por parte del consumidor, fomenta la sustitución de especies, provocando “estafas” por parte del comerciante, que sirve o vende al consumidor una especie exótica barata y de mala calidad, en lugar de la especie ofrecida, nativa y con alto valor comercial (Sameera *et al.*, 2021). Los pescados y mariscos en general, son propensos a prácticas ilegales en su captura y comercialización (Spink y Moyer, 2011). Esta sustitución de especies ocurre en todo el mundo pero desgraciadamente es una práctica común en México (Sarmiento-Camacho y Valdez-Moreno, 2018, OCEANA 2021).

Aunado a esto existe un problema más que aqueja el mercado de productos pesqueros: la práctica de la pesca ilegal no declarada y no reglamentada que también se realiza para satisfacer la creciente demanda de pescado y productos pesqueros (Sterling y Chiasson, 2014). Uno de los retos más importantes de México es evitar la entrada de productos no inocuos, sin trazabilidad, que comúnmente ocasionan una competencia desleal con especies mexicanas y un alto riesgo de enfermedades agudas y crónicas. Para ello, se requeriría de un monitoreo constante por parte de las autoridades de sanidad así como de certificados de inocuidad, calidad y buenas prácticas. Sin embargo, nada de lo anterior será posible mientras el consumidor no lo solicite, por lo que esfuerzos de divulgación y grupos como COMEPESCA (<http://comepesca.com/>) serán muy importantes en el futuro.

Desde el año 2014 la producción a través de la acuicultura de pescados y mariscos para consumo humano alcanzó a la producción obtenida a través de la pesca (FAO 2020), siendo un registro histórico por su importancia para

la seguridad alimentaria mundial. Sin embargo, la misma FAO, en un documento llamado “*Directrices técnicas para la certificación en acuicultura*”, menciona que se tienen huecos reglamentarios en aspectos relativos al bienestar de los animales, los asuntos ambientales y las cuestiones socioeconómicas, puesto que no han sido sometidos al cumplimiento o la certificación. La producción y el comercio de la acuicultura han aumentado, pero han surgido preocupaciones en relación con los posibles impactos negativos sobre el ambiente, las comunidades y los consumidores. Las soluciones a muchos de estos asuntos se han identificado y tratado. La aplicación de la certificación en la acuicultura se ve ahora como una herramienta basada en el mercado y con un gran potencial para minimizar los virtuales impactos negativos, aumentar los beneficios sociales y del consumidor, así como la confianza en el proceso productivo y de comercialización de la acuicultura.

8. Perspectivas y oportunidades regionales

La soberanía alimentaria de los países, especialmente aquellos en vías de desarrollo, en términos de la acuicultura, necesariamente deberá transitar hacia el cultivo de las especies nativas de importancia regional. Por ejemplo, en la región del Altiplano de México, las condiciones climatológicas limitan el desempeño en cultivo de varias de las especies exóticas cultivadas. Esto es, que las temperaturas del agua (típicamente entre los 17 y 24 °C) son subóptimas para el crecimiento de especies, como la trucha y la tilapia (altas para la primera y bajas para la segunda). Los productores comúnmente llaman a este intervalo “temperaturas incómodas” puesto que condiciona el rendimiento de estas especies y por tanto la rentabilidad de las granjas. Aunado a esto, se encuentra la baja escala de producción por

unidad acuícola, así como los precios y competencia de mercado de estas especies. Michoacán, por ejemplo, es el estado con mayor número de unidades dulceacuícolas; sin embargo, al igual que ocurre en gran parte del país, la actividad es considerada de subsistencia o de pequeña escala, debido a que un alto porcentaje de estas unidades producen menos de 5 toneladas por año. La gran competencia con productos iguales o similares importados a menor costo, necesariamente hace que la producción sea muy local o de autoconsumo. Por tanto, la mala selección de especies de cultivo, la baja escala de producción y los precios marginales, limitan el desarrollo y crecimiento de la actividad, dependiendo en muchos casos de otras actividades y apoyos gubernamentales para mantenerse.

Es aquí donde las especies nativas de peces entre ellas, los peces blancos, las acúmaras, mojarra nativas, robalos y pejelagartos, por mencionar a algunos, tienen un gran potencial para reactivar las cadenas de valor a través de su producción, generando mayores utilidades para los productores. Esto, sin embargo, no podrá realizarse sin el apoyo gubernamental y políticas públicas que promuevan la transferencia y el cultivo de estas especies así como se ha hecho para las especies exóticas. Se requieren además, extensionistas entrenados en las técnicas modernas de cultivo de peces, que apoyen a los productores y que no solo sometan proyectos, sino que les den seguimiento, para hacerlos exitosos.

Otra oportunidad de aplicación de la acuicultura de las especies nativas de peces, es el repoblamiento de embalses, especialmente a lo largo del Pacífico mexicano, en donde la construcción de presas sin escaleras para las especies migratorias han generado que varias de ellas (catádrumas o anádrumas), como los robalos, lisas, langostinos, hayan desaparecido de nuestros ríos.

Esta grave pérdida de especies ha generado lo que se denomina “violencia ambiental”, creando un desbalance ecológico, con implicaciones graves para las comunidades que anteriormente se nutrían y vivían de ellas. A pesar de que no existe ningún estudio al respecto de los impactos económicos, ecológicos y sociales, se prevé que estos efectos estén contribuyendo en gran medida a las actividades ilícitas y la migración, así como un aumento de pobreza y desnutrición de estas comunidades. Por lo anterior, el repoblamiento de embalses con algunas de estas especies, tendrían un impacto directo e inmediato, no sólo en el balance ecológico sino también en mantener la identidad y aumentar la salud y calidad de vida actual de los pobladores ribereños.

En México existe un uso indiscriminado e inapropiado de los recursos hídricos. Lo anterior, principalmente debido a que la producción agropecuaria se ha basado en monocultivos tradicionales, que no comparten recursos para hacer más eficiente su uso. Aunado a esto, se encuentra el hecho de que actualmente ya existe un déficit hídrico, lo cual limita los permisos y concesiones para su utilización, mientras que el agua disponible se encuentra en su mayoría contaminada. En este contexto, las alternativas de producción que reutilicen el agua, como los sistemas agroacuícolas integrados, serán fundamentales para ampliar la capacidad productiva y las necesidades de alimentación y, en medida de lo posible, el desarrollo de tecnologías para el cultivo de especies nativas bajas en la cadena trófica, ya sean marinas o dulceacuícolas.

Referencias

- ABU-ELALA, N., MARZOUK, M., AND MOUSTAFA, M., 2013, USE OF DIFFERENT *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* BIOTIC FORMS AS IMMUNE-MODULATOR AND GROWTH PROMOTER FOR *OREOCHROMIS NILOTICUS* CHALLENGED WITH SOME FISH PATHOGENS, *INTERNATIONAL JOURNAL OF VETERINARY SCIENCE AND MEDICINE* [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.IJVSM.2013.05.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijvsm.2013.05.001)

- ABU-ELALA, N.M., YOUNIS, N.A., ABUBAKR, H.O., RAGAA, N.M., BORGES, L.L., AND BONATO, M.A., 2018, EFFICACY OF DIETARY YEAST CELL WALL SUPPLEMENTATION ON THE NUTRITION AND IMMUNE RESPONSE OF NILE TILAPIA, *EGYPTIAN JOURNAL OF AQUATIC RESEARCH*, 44 (4), 333-341.
[HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.EJAR.2018.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ejar.2018.11.001)
- AHMED, I., AND KHAN, M.A., 2006, DIETARY BRANCHED-CHAIN AMINO ACID VALINE, ISOLEUCINE AND LEUCINE REQUIREMENTS OF FINGERLING INDIAN MAJOR CARP, *CIRRHINUS MRIGALA* (HAMILTON), *BRITISH JOURNAL OF NUTRITION*, 96, 450-460. DOI: 10.1079/BJN20061845
- AHMED, N., THOMPSON, S., AND GLASER, M., 2019, GLOBAL AQUACULTURE PRODUCTIVITY, ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY, AND CLIMATE CHANGE ADAPTABILITY, *ENVIRONMENTAL MANAGEMENT*, 63, 159-172.
[HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S00267-018-1117-3](https://doi.org/10.1007/s00267-018-1117-3)
- AKHTER, N., WU, B., MAHMOOD-MEMON, A., AND MOHSIN, M., 2015, PROBIOTICS AND PREBIOTICS ASSOCIATED WITH AQUACULTURE: A REVIEW, *FISH & SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 45, 733-741.
[HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.FSI.2015.05.038](http://dx.doi.org/10.1016/j.fsi.2015.05.038)
- AKTER, M.N., HASHIM, R., SUTRIANA, A., SITI-AZIZAH, M.N., AND ASADUZZAMAN, M., 2019, EFFECT OF *LACTOBACILLUS ACIDOPHILUS* SUPPLEMENTATION ON GROWTH PERFORMANCES, DIGESTIVE ENZYME ACTIVITIES AND GUT HISTOMORPHOLOGY OF STRIPED CATFISH (*PANGASIANODON HYPOPHTHALMUS* SAUVAGE, 1878) JUVENILES, *AQUACULTURE RESEARCH*, 1-12. DOI: 10.1111/ARE.13938
- ALFARO, A.C., AND YOUNG, T., 2016 SHOWCASING METABOLOMIC APPLICATIONS IN AQUACULTURE: A REVIEW, *REVIEWS IN AQUACULTURE*, 10(1), 135-152. DOI:10.1111/RAQ.12152
- ASSEFA, A., AND ABBUNA, F., 2018, MAINTENANCE OF FISH HEALTH IN AQUACULTURE: REVIEW OF EPIDEMIOLOGICAL APPROACHES FOR PREVENTION AND CONTROL OF INFECTIOUS DISEASES OF FISH, *HINDAWI VETERINARY MEDICINE INTERNATIONAL*, 1-10. [HTTPS://DOI.ORG/10.1155/2018/5432497](https://doi.org/10.1155/2018/5432497)
- AYYAT, M.S., LABIB, H.M., AND MAHMOUD, H.K.A., 2014, PROBIOTIC COCKTAIL AS A GROWTH PROMOTER IN NILE TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*), *JOURNAL OF APPLIED AQUACULTURE*, 26, 208-215. DOI: 10.1080/10454438.2014.934164
- BADJECK, M.-C., ALLISON, E., HALLS, A., AND DULVY, N., 2010, IMPACTS OF CLIMATE VARIABILITY AND CHANGE ON FISHERY BASED LIVELIHOODS, *MARINE POLICY*, 34, 375-383.
- BAGUM, N., MONIR, M.S., AND KHAN, M.H., 2013, PRESENT STATUS OF FISH DISEASES AND ECONOMIC LOSSES DUE TO INCIDENCE OF DISEASE IN RURAL FRESHWATER AQUACULTURE OF BANGLADESH, *JOURNAL OF INNOVATION AND DEVELOPMENT STRATEGY*, 7(3), 48-53. ISSN-1997-2571
- BECK, B.R., KIM, D., JEON, J., LEE, S.M., KIM, H.K., AND KIM, O.J., 2015, THE EFFECTS OF COMBINED DIETARY PROBIOTICS *LACTOCOCCUS LACTIS* BFE920 AND *LACTOBACILLUS PLANTARUM* FGL0001 ON INNATE IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE IN OLIVE FLOUNDER (*PARALICHTHYS OLIVACEUS*), *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 42,177-183.
- BELL, J.D., GANACHAUD, A., GEHRKE, P.C., GRIFFITHS, S.P., HOBDAV, A.J., HOEGH-GULDBERG, O., JOHNSON, J.E., BORGNE, L.E., LEHODEY, P., LOUGH, J.M., MATEAR, R.J., PICKERING, T.D., PRATCHETT, M.S., GUPTA, A.S., SENINA, I., AND WAYCOTT, M., 2013, MIXED RESPONSES OF TROPICAL PACIFIC FISHERIES AND AQUACULTURE TO CLIMATE CHANGE, *NATURE CLIMATE CHANGE*, 3, 591-599.
 DOI: 10.1038/NCLIMATE1838
- BEHBOUDI-JOBBEHDAR, S., SOUKOULIS, C., YONEKURA, L., AND FISK, I., 2013, OPTIMIZATION OF SPRAY-DRYING PROCESS CONDITIONS FOR THE PRODUCTION OF MAXIMALLY VIABLE MICROENCAPSULATED *L. ACIDOPHILUS* NCIMB 701748, *DRYING TECHNOLOGY*, 31, 1274-1283.
 DOI:10.1080/07373937.2013.788509
- BÉNÉ, C., BARANGE, M., SUBASINGHE, R., PINS-TRUP-ANDERSEN, P., MERINO, G., HEMRE, G.I., AND WILLIAMS, M., 2015, FEEDING 9 BILLION BY 2050-PUTTING FISH BACK ON THE MENU, *FOOD SECURITY*, 7, 261-274.
- BERNETH, E.-M., CHAVEZ, C., CHINABUT S., AND MOHAN, C.V., 2008, "INTERNATIONAL TRADE IN AQUATIC ANIMALS - A RISK TO AQUATIC ANIMAL HEALTH STATUS?", BONDAD-REANTASO, M.G., MOHAN, C.V., CRUMLISH, M., AND SUBASINGHE, R.P., *DISEASES IN ASIAN AQUACULTURE VI*, MANILA, PHILIPPINES, FISH HEALTH SECTION, ASIAN FISHERIES, 2008, 53-70. ISBN 978-971-9
- BETANCOR, M.B., SPRAGUE, M., USHER, S., SAYANOVA, O., CAMPBELL, P.J., NAPIER, J.A., AND TOCHER, D.R., 2015, A NUTRITIONALLY-ENHANCED OIL FROM TRANSGENIC *CAMELINA SATIVA* EFFECTIVELY REPLACES FISH OIL AS A SOURCE OF EICOSAPENTAENOIC ACID FOR FISH, *SCIENTIFIC REPORTS*, 5(1), 1-10. DOI: 10.1038/srepo8104
- BIBUS, D.M., 2015, LONG-CHAIN OMEGA-3 FROM LOW-TROPHIC-LEVEL FISH PROVIDES VALUE TO

- FARMED SEAFOOD, *LIPID TECHNOLOGY*, 27(3), 55-58.
[HTTP://DOI.ORG/10.1002/LITE.201500006](http://doi.org/10.1002/LITE.201500006)
- BISWAS G., KORENAGA, H., NAGAMINE, R., TAKAYAMA, H., KAWAHARA, S., AND TAKEDA, S., 2013, CYTOKINE RESPONSES IN THE JAPANESE PUFFERFISH (*TAKIFUGU RUBRIPES*) HEAD KIDNEY CELLS INDUCED WITH HEAT-KILLED PROBIOTICS ISOLATED FROM THE MONGOLIAN DAIRY PRODUCTS, *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 34, 1170-1177.
- BRIGGS, M., FUNGE-SMITH, S., SUBASINGHE, R., AND PHILLIPS, M., 2004, INTRODUCTION AND MOVEMENT OF *PENAEUS VANNAMEI* AND *PENAEUS STYLIROSTRIS* IN ASIA AND THE PACIFIC. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS REGIONAL OFFICE FOR ASIA AND THE PACIFIC BANGKOK. RAP PUBLICATION 2004/10
- CAO, H., YU, R., ZHANG, Y., HU, B., JIAN, S., WEN, C., KAJBAF, K., KUMAR, V., AND YANG, G., 2019, EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION WITH β -GLUCAN AND *BACILLUS SUBTILIS* ON GROWTH, FILLET QUALITY, IMMUNE CAPACITY, AND ANTIOXIDANT STATUS OF PENGZE CRUCIAN CARP (*CARASSIUS AURATUS* VAR. *PENGZE*), *AQUACULTURE*, 508, 106-112.
[HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.AQUACULTURE.2019.04.064](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.04.064)
- CEREZUELA, R., MESEGUER, J., AND ESTEBAN, M.A., 2011, CURRENT KNOWLEDGE IN SYMBIOTIC USE FOR FISH AQUACULTURE: A REVIEW, *JOURNAL OF AQUACULTURE RESEARCH & DEVELOPMENT*, 1, 1-7. [HTTPS://DOI.ORG/10.4172/2155-9546.S1-008](https://doi.org/10.4172/2155-9546.s1-008)
- CHÁVEZ-SÁNCHEZ, M.C., PIMENTEL-ACOSTA, C.A., OLIVERA-NOVOA, M.A., HERNÁNDEZ, C., DEL RÍO-ZARAGOZA, O.B., ABAD-ROSALES, S.M., AND MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ, I., 2018, THE PANTOTHENIC ACID REQUIREMENT IN JUVENILE SPOTTED ROSE SNAPPER *LUTJANUS GUTTATUS* (STEINDACHNER, 1869), *LATIN AMERICAN JOURNAL OF AQUATIC RESEARCH* 46(5), 1001-1010.
 DOI: 10.3856/VOL46-ISSUE5-FULLTEXT-13
- CHANDHINI, S., AND REJISH-KUMAR, V.J., 2018, TRANSCRIPTOMICS IN AQUACULTURE: CURRENT STATUS AND APPLICATIONS, *REVIEWS IN AQUACULTURE*, 11, 1379-1397. DOI:10.1111/RAQ.12298
- CHIU, J.M.Y., LI, S., LI, A., PO, B., ZHANG, R., SHIN, P.K.S., AND QIU, J.-W., 2012, BACTERIA ASSOCIATED WITH SKELETAL TISSUE GROWTH ANOMALIES IN THE CORAL *PLATYGYRA CARNOSUS*, *FEMS MICROBIOLOGY ECOLOGY*, 79(2), 380-391.
[HTTPS://DOI.ORG/10.1111/J.1574-6941.2011.01225.X](https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01225.x)
- CONAPESCA 2011. COMISIÓN NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA. ANUARIO ESTADÍSTICO DE PESCA Y ACUICULTURA 2011. EDITORIAL COMISIÓN NACIONAL DE ACUICULTURA Y PESCA. PRIMERA EDICIÓN, MAZATLÁN, MÉXICO. 305 PP.
- CORONADO, H.M., VEGA Y LEÓN, S., GUTIÉRREZ, T.R., PÉREZ, G.J., AND PELÁEZ, M.K., 2011, NUTRIGENÉTICA APLICADA: DIETA PERSONALIZADA Y FORMACIÓN ACADÉMICA PARA LA PRÁCTICA PROFESIONAL, *REVISTA CHILENA DE NUTRICIÓN*, 38(4), 492-500.
[HTTPS://DOI.ORG/10.4067/S0717-75182011000400013](https://doi.org/10.4067/S0717-75182011000400013)
- DAW, T., ADGER, W.N., BROWN, K., AND BADJECK, M.-C., 2009, "CLIMATE CHANGE AND CAPTURE FISHERIES: POTENTIAL IMPACTS, ADAPTATION AND MITIGATION", IN: COCHRANE, K., DE YOUNG, C., SOTO, D., AND BAHRI, T., *CLIMATE CHANGE IMPLICATIONS FOR FISHERIES AND AQUACULTURE: OVERVIEW OF CURRENT SCIENTIFIC KNOWLEDGE*, ROME, ITALY, FAO FISHERIES AND AQUACULTURE TECHNICAL PAPER No. 530., 2009, 107-150. [WWW.FAO.ORG/DOCREP/012/I0994E/I0994E00.HTM](http://www.fao.org/docrep/012/i0994e/i0994e00.htm)
- DETTMER, K., ARONOV, P.A., AND HAMMOCK, B.D., 2007, Mass SPECTROMETRY-BASED METABOLOMICS, *MASS SPECTROMETRY REVIEWS*, 26(1), 51-78. DOI: 10.1002/MAS.20108.
- DE SANTIS, C., BARTIE, K.L., OLSEN, R.E., TAGGART, J.B., AND TOCHER, D.R., 2015, NUTRIGENOMIC PROFILING OF TRANSCRIPTIONAL PROCESSES AFFECTED IN LIVER AND DISTAL INTESTINE IN RESPONSE TO A SOYBEAN MEAL-INDUCED NUTRITIONAL STRESS IN ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR*), *COMPARATIVE BIOCHEMISTRY AND PHYSIOLOGY PART D: GENOMICS AND PROTEOMICS*, 15, 1-11.
[HTTP://DOI:10.1016/J.CBD.2015.04.001](http://doi:10.1016/j.cbd.2015.04.001)
- DE SILVA, S.S., AND SOTO, D., 2009, "EL CAMBIO Y LA ACUICULTURA: REPERCUSIONES POTENCIALES, ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN", COCHRANE, K., DE YOUNG, C., SOTO, D., AND BAHRI, T., *CONSECUENCIAS DEL CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA PESCA Y LA ACUICULTURA: VISIÓN DE CONJUNTO DEL ESTADO ACTUAL DE LOS CONOCIMIENTOS CIENTÍFICOS*, ROME, ITALY, FAO DOCUMENTO TÉCNICO DE PESCA Y ACUICULTURA, No 530, 2009.
- DE YOUNG, C., SOTO, D., BAHRI, T., AND BROWN, D., 2012, "BUILDING RESILIENCE FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN THE FISHERIES AND AQUACULTURE SECTOR", MEYBECK, A., LANKOSKI, J., REDFERN, S., AZZU, N., AND GITZ, V., *BUILDING RESILIENCE FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN THE AGRICULTURE SECTOR: PROCEEDINGS OF A JOINT FAO/OECD WORKSHOP*, ROME, ITALY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2012, 23-24.

- RESILIENCE FOR ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE IN THE AGRICULTURE SECTOR: PROCEEDINGS OF A JOINT FAO/OECD WORKSHOP, ROME, ITALY, FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, 2012, 23–24.
- DIAS, J.A.R., ABE, H.A., SOUSA, N.C., COUTO, M.V.S., CORDEIRO, C.A.M., MENESES, J.O., CUNHA, F.S., MOURIÑO, J.L.P., MARTINS, M.L., BARBAS, L.A.L., CARNEIRO, P.C.F., MARIA, A.N., AND FUJIMOTO, R.Y., 2018, DIETARY SUPPLEMENTATION WITH AUTOCHTHONOUS *BACILLUS CEREUS* IMPROVES GROWTH PERFORMANCE AND SURVIVAL IN TAMBACUI *COLOSSOMA MACROPOMUM*, *AQUACULTURE RESEARCH*, 49, 3063–3070. DOI: 10.1111/ARE.13767
- DIMITROGLOU, A., MERRIFIELD, D.L., CARNEVALI, O., PICCHIETTI, S., AVELLA, M., DANIELS, C., GÜROY, D., AND DAVIES, S.J., 2011, MICROBIAL MANIPULATIONS TO IMPROVE FISH HEALTH AND PRODUCTION – A MEDITERRANEAN PERSPECTIVE, *FISH & SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 30, 1–16. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FSI.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2010.08.009)
- DUARTE, C.M., HOLMER, M., OLSEN, Y., SOTO, D., MARB, N., GUIU, J., BLACK, K., AND KARAKASSIS, I., 2009, WILL THE OCEANS HELP FEED HUMANITY? *BIOSCIENCE*, 59(11), 967–976. [HTTPS://DOI.ORG/10.1525/BIO.2009.59.11.8](https://doi.org/10.1525/BIO.2009.59.11.8)
- ESSA, M.A., EL-SERAFY, S.S., EL-EZABI, M.M., DABOOR, S.M., ESMAEL, S.M., AND LALL, S.P., 2010, EFFECT OF DIFFERENT DIETARY PROBIOTICS ON GROWTH, FEED UTILIZATION AND DIGESTIVE ENZYMES ACTIVITIES OF NILE TILAPIA, *OREOCHROMIS NILOTICUS*, *JOURNAL OF THE ARABIAN AQUACULTURE SOCIETY*, 5, 143–162.
- ESPINAL, C.A., AND MATULIĆ, D., 2019, “RECIRCULATING AQUACULTURE TECHNOLOGIES”, GODDEK, K.S., JOYCE, A., KOTZEN, B., AND BURNELL, G.M., *AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS. COMBINED AQUACULTURE AND HYDROPONIC PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR THE FUTURE*, CHAM, SWITZERLAND, SPRINGER OPEN, 2019, 35–76. ISBN 978-3-030-15942-9
- FAO, 1995, “CÓDIGO DE CONDUCTA PARA LA PESCA RESPONSABLE. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACIÓN”, ROME, ITALY, P.53.
- FAO, 2005, “IMPACTS OF THE TSUNAMI ON FISHERIES, AQUACULTURE AND COASTAL LIVELIHOODS”, [HTTP://WWW.FAO.ORG/FISHERY/DOCS/DOCUMENT/TSUNAMIS_05/JAN_05_2005/TSUNAMI_5_1_05.PDF](http://www.fao.org/fishery/docs/DOCUMENT/TSUNAMIS_05/JAN_05_2005/TSUNAMI_5_1_05.PDF)
- FAO, 2006, “PROBIOTICS IN FOOD HEALTH AND NUTRITIONAL PROPERTIES AND GUIDELINES FOR EVALUATION”, FAO FOOD AND NUTRITION PAPER NO. 85, FAO, ROME, ITALY. ISBN 92-5-105513-0.
- FAO, 2014, “THE STATE OF WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE 2014”, ROME, ITALY, P. 223.
- FAO, 2020, “EL ESTADO MUNDIAL DE LA PESCA Y LA ACUICULTURA 2020”, LA SOSTENIBILIDAD EN ACCIÓN”, ROME, ITALY, [HTTPS://DOI.ORG/10.4060/CA9229ES](https://doi.org/10.4060/CA9229ES)
- FUNGE-SMITH, S., AND PHILLIPS, M.J., 2001, “AQUACULTURE SYSTEMS AND SPECIES”, SUBASINGHE, R.P., BUENO, P., PHILLIPS, M.J., HOUGH, C., MCGLADDERY, S.E., AND ARTHUR, J.R., *AQUACULTURE IN THE THIRD MILLENNIUM. TECHNICAL PROCEEDINGS OF THE CONFERENCE ON AQUACULTURE IN THE THIRD MILLENNIUM*, BANGKOK, THAILAND, NACA, 2001, 129–135. ISBN: 9747313553 9789747313550
- GAO, Q., XIAO, C., MIN, M., ZHANG, C., PENG, S., AND SHI, Z., 2016, EFFECTS OF PROBIOTICS DIETARY SUPPLEMENTATION ON GROWTH PERFORMANCE, INNATE IMMUNITY AND DIGESTIVE ENZYMES OF SILVER POMFRET, *PAMPUS ARGENTEUS*, *INDIAN JOURNAL OF ANIMAL RESEARCH*, 50(6), 936–941. DOI:10.18805/IJAR.9640
- GARCÍA-CAÑAS, V., SIMÓ, C., LEÓN, C., AND CIFUENTES, A., 2010, ADVANCES IN NUTRIGENOMICS RESEARCH: NOVEL AND FUTURE ANALYTICAL APPROACHES TO INVESTIGATE THE BIOLOGICAL ACTIVITY OF NATURAL COMPOUNDS AND FOOD FUNCTIONS, *JOURNAL OF PHARMACEUTICAL AND BIOMEDICAL ANALYSIS*, 51(2), 290–304. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.JPBA.2009.04.019](https://doi.org/10.1016/j.jpba.2009.04.019)
- GHAEDI, G., KEYVANSHOKOOL, S., AZARM, H.M., AND AKHLAGHI, M., 2015, EFFECTS OF DIETARY β -GLUCAN ON MATERNAL IMMUNITY AND FRY QUALITY OF RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*), *AQUACULTURE*, 441, 78–83. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.AQUACULTURE.2015.02.023](http://dx.doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.02.023)
- GIBSON, G.R., HUTKINS, R., SANDERS, M.E., PRESCOTT, S.L., REIMER, R.A., SALMINEN, S.J., SCOTT, K., STANTON, C., SWANSON, K.S., CANI, P.D., VERBEKE, K., AND REID, G., 2017, EXPERT CONSENSUS DOCUMENT: THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC ASSOCIATION FOR PROBIOTICS AND PREBIOTICS (ISAPP) CONSENSUS STATEMENT ON THE DEFINITION AND SCOPE OF PREBIOTICS, *NATURE REVIEWS GASTROENTEROLOGY & HEPATOLOGY*, 14, 491–502. [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/NRGASTRO.2017.75](https://doi.org/10.1038/NRGASTRO.2017.75)
- GIRI, S.S., SUKUMARAN, V., SEN, S.S., AND JENA, P.K.,

- 2014, EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION OF POTENTIAL PROBIOTIC *BACILLUS SUBTILIS* VSG1 SINGULARLY OR IN COMBINATION WITH *LACTOBACILLUS PLANTARUM* VSG3 OR/AND *PSEUDOMONAS AERUGINOSA* VSG2 ON THE GROWTH, IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE OF *LABEO ROHITA*, *AQUACULTURE NUTRITION*, 20, 163–171.
- GODDEK, S., JOYCE, A., KOTZEN, B., AND DOS-SANTOS, M., 2019, “ACUAPONICS AND GLOBAL FOOD CHALLENGES”, GODDEK, K.S., JOYCE, A., KOTZEN, B., AND BURNELL, G.M., *AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS. COMBINED AQUACULTURE AND HYDROPONIC PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR THE FUTURE*, CHAM, SWITZERLAND, SPRINGER OPEN, 2019, 3-17. ISBN 978-3-030-15942-9
- GONG, Y.L., LIAO, X.D., LIANG, J.B., JAHROMI, M.F., CAO, W.Z., AND WU, Y.B., 2013, SACCHAROMYCES CEREVISIAE LIVE CELLS DECREASED IN VITRO METHANE PRODUCTION IN INTESTINAL CONTENT OF PIGS, *ASIAN AUSTRALAS. JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE*, 26(6), 856-863. [HTTP://DX.DOI.ORG/10.5713/AJAS.2012.12663](http://dx.doi.org/10.5713/AJAS.2012.12663)
- GOULDING, I.C., 2016, “MANUAL ON TRACEABILITY SYSTEMS FOR FISH AND FISHERY PRODUCTS”, CRFM SPECIAL PUBLICATION No.13, p. 17, ISBN: 978-976-8257-37-6.
- GRAFTON, R.Q., DAUGBJERG, C., AND QURESHI, M.E., 2015, TOWARDS FOOD SECURITY BY 2050, *FOOD SECURITY*, 7, 179-183. DOI 10.1007/s12571-015-0445-x
- GUERREIRO, I., OLIVA-TELES, A., AND ENES, P., 2017, PREBIOTICS AS FUNCTIONAL INGREDIENTS: FOCUS ON MEDITERRANEAN FISH AQUACULTURE, *REVIEWS IN AQUACULTURE*, 10, 800-832. DOI: 10.1111/RAQ.12201
- HAHOR, W., THONGPRAJUKAEW, K., AND SUANYUK, N., 2019, EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION OF OLIGOSACCHARIDES ON GROWTH PERFORMANCE, GUT HEALTH AND IMMUNE RESPONSE OF HYBRID CATFISH (*PANGASIANODON GIGAS* × *PANGASIANODON HYPOPHthalmus*), *AQUACULTURE*, 507, 97-107. DOI: 10.1016/j.aquaculture.2019.04.010
- HASAN, M.T., JANG, W.J., KIM, H., LEE, B.J., KIM, K.W., HUR, S.W., LIM, S.G., BAI, S.C., AND KONG, I.S., 2018, SYNERGISTIC EFFECTS OF DIETARY *BACILLUS* SP. SJ-10 PLUS β-GLUCOOLIGOSACCHARIDES AS A SYMBIOTIC ON GROWTH PERFORMANCE, INNATE IMMUNITY AND STREPTOCOCCOSIS RESISTANCE IN OLIVE FLOUNDER (*PARALICHTHYS OLIVACEUS*), *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 82, 544–553.
- HASAN, M.T., JANG, W.J., LEE, B.J., KIM, K.W., HUR, S.W., LIM, S.G., BAI, S.C., AND KONG, I.S., 2019, HEAT-KILLED *BACILLUS* SP. SJ-10 PROBIOTIC ACTS AS A GROWTH AND HUMORAL INNATE IMMUNITY RESPONSE ENHANCER IN OLIVE FLOUNDER (*PARALICHTHYS OLIVACEUS*), *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 88, 424–431.
- HE, J., ZHANG, P., SHEN, L., NIU, L., TAN, Y., CHEN, L., ZHAO, Y., BAI, L., HAO, X., LI, X., ZHANG, S., AND ZHU, L., 2020, SHORT-CHAIN FATTY ACIDS AND THEIR ASSOCIATION WITH SIGNALLING PATHWAYS IN INFLAMMATION, GLUCOSE AND LIPID METABOLISM, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MOLECULAR SCIENCES*, 21, 1-16. DOI:10.3390/IJMS21176356.
- HERAS, J., 2020, FISH TRANSCRIPTOMICS: APPLIED TO OUR UNDERSTANDING OF AQUACULTURE. PREPRINTS 2020010332 DOI: 10.20944/PREPRINTS202001.0332.V1.
- HERNÁNDEZ-MANCIPE, L.E., LONDOÑO-VÉLEZ, J.I., HERNÁNDEZ-GARCÍA, K.A., AND TORRES-HERNÁNDEZ, L.C., 2019, LOS SISTEMAS BIOFLOC: UNA ESTRATEGIA EFICIENTE EN LA PRODUCCIÓN ACUÍCOLA, *CES MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA*, 14(1), 70-99.
- HERNANDEZ-VALDES, J.A., STEGGE, M. ANN DE, HERMANS, J., TEUNIS, J., TATENHOVE-PEL, R.J. VAN, TEUSINK, B., BACHMANN, H. AND KUIPERS, O.P., 2020, ENHANCEMENT OF AMINO ACID PRODUCTION AND SECRETION BY LACTOCOCCUS LACTIS USING A DROPLET-BASED BIOSENSING AND SELECTION SYSTEM, *METABOLIC ENGINEERING COMMUNICATIONS*, 11, 1-12. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.MEC.2020.E00133](https://doi.org/10.1016/j.mec.2020.E00133)
- HORGAN, R.P., AND KENNY, L.C., 2011, SAC REVIEW ‘OMIC’ TECHNOLOGIES: GENOMICS, TRANSCRIPTOMICS, PROTEOMICS AND METABOLOMICS, *THE OBSTETRICIAN & GYNAECOLOGIST*, 13,189–195. [HTTPS://DOI.ORG/10.1576/TOAG.13.3.189.27672](https://doi.org/10.1576/TOAG.13.3.189.27672)
- HOSEINIFAR, S.H., MIRVAGHEFI, A., MOJAZI-AMIRI, B., ROSTAMI, H.K., AND MERRIFIELD, D.L., 2011, THE EFFECTS OF OLIGOFRUCTOSE ON GROWTH PERFORMANCE, SURVIVAL AND AUTOCHTHONOUS INTESTINAL MICROBIOTA OF BELUGA (*HUSO HUSO*) JUVENILES, *AQUACULTURE NUTRITION*, 17, 498-504. [HTTPS://DOI.ORG/10.1111/J.1365-2095.2010.00828.X](https://doi.org/10.1111/j.1365-2095.2010.00828.x)
- HOSEINIFAR, S.H., ESTEBAN, M.A., CUESTA, A., AND SUN, Y.-Z., 2015, PREBIOTICS AND FISH IMMUNE RESPONSE: A REVIEW OF CURRENT KNOWLEDGE AND FUTURE PERSPECTIVES, *REVIEWS IN FISHERIES SCIENCE & AQUACULTURE*, 23, 315-328. DOI: 10.1080/23308249.2015.1052365

- HOSEINIFAR, S.H., RINGØ, E., MASOULEH, A.S., ESTEBAN, M.A., 2016, PROBIOTIC, PREBIOTIC AND SYMBIOTIC SUPPLEMENTS IN STURGEON AQUACULTURE: A REVIEW, *REVIEWS IN AQUACULTURE*, 8, 89-102. DOI: 10.1111/RAQ.12082
- ISLAM, M.M., BARMANB, A., KUNDUC, G.K., KABIRB, M.A., AND PAULB, B., 2019, VULNERABILITY OF inland AND COASTAL AQUACULTURE TO CLIMATE CHANGE: EVIDENCE FROM A DEVELOPING COUNTRY, *AQUACULTURE AND FISHERIES*, 4, 183-189. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.AAF.2019.02.007](https://doi.org/10.1016/j.aaf.2019.02.007)
- JAMI, M.J., KENARI, A.A., PAKNEJAD, H., AND MOHSENI, M., 2019, EFFECTS OF DIETARY B-GLUCAN, MANNAN OLIGOSACCHARIDE, LACTOBACILLUS PLANTARUM AND THEIR COMBINATIONS ON GROWTH PERFORMANCE, IMMUNITY AND IMMUNE RELATED GENE EXPRESSION OF CASPIAN TROUT, *SALMO TRUTTA CASPIUS* (KESSLER, 1877), *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 91, 202-208. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FSI.2019.05.024](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2019.05.024).
- JANG, W.J., LEE, J.M., HASAN, M.T., LEE, B.J., LIM, S.G., AND KONG, I.S., 2019, EFFECTS OF PROBIOTIC SUPPLEMENTATION OF A PLANT-BASED PROTEIN DIET ON INTESTINAL MICROBIAL DIVERSITY, DIGESTIVE ENZYME ACTIVITY, INTESTINAL STRUCTURE, AND IMMUNITY IN OLIVE FLOUNDER (*PARALICHTHYS OLIVACEUS*), *FISH & SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 92, 719-727.
- JOBLING, M., 2016, FISH NUTRITION RESEARCH: PAST, PRESENT AND FUTURE, *AQUACULTURE INTERNATIONAL*, 24, 767-786.
- JOYCE, A., GODDEK, S., KOTZEN, B., AND WUERTZ, S., 2019, "AQUAPONICS: CLOSING THE CYCLE ON LIMITED WATER, LAND AND NUTRIENT RESOURCES", GODDEK, K.S., JOYCE, A., KOTZEN, B., AND BURNELL, G.M., *AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS. COMBINED AQUACULTURE AND HYDROPONIC PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR THE FUTURE*, CHAM, SWITZERLAND, SPRINGER OPEN, 2019, 19-34. ISBN 978-3-030-15942-9
- JUÁREZ-GUTIÉRREZ, M.E., NAVARRETE-RAMÍREZ, P., MONROY DE LA PEÑA, F.A., LLERA-HERRERA, R.A., MARTÍNEZ-CHÁVEZ, C.C., RÍOS-DURÁN, M.G., PALOMERA-SANCHEZ, Z., RAGGI, L., LOZANO-OLVERA, R., PEDROZA-ISLAS, R., AND MARTÍNEZ-PALACIOS, C.A., 2021, USING NUTRIGENOMICS TO EVALUATE MICRODIET PERFORMANCE IN PIKE SILVERSIDE LARVAE, *AQUACULTURE NUTRITION*, 00, 1-12. [HTTPS://DOI.ORG/10.1111/ANU.13305](https://doi.org/10.1111/ANU.13305)
- KIM, D., AND AUSTIN, B., 2006A, INNATE IMMUNE RESPONSES IN RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*, WALBAUM) INDUCED BY PROBIOTICS, *FISH & SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 21, 513-524. DOI:10.1016/J.FSI.2006.02.007
- KIM, D.H., AND AUSTIN, B., 2006B, CYTOKINE EXPRESSION IN LEUKOCYTES AND GUT CELLS OF RAINBOW TROUT, *ONCORHYNCHUS MYKISS* WALBAUM, INDUCED BY PROBIOTICS, *VETERINARY IMMUNOLOGY AND IMMUNOPATHOLOGY*, 114, 297-304.
- KOGUT, M.H., LEE, A., AND SANTIN, E., 2020, MICROBIOME AND PATHOGEN INTERACTION WITH THE IMMUNE SYSTEM, *POULTRY SCIENCE*, 99(4), 1906-1913. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.PSJ.2019.12.011](https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.12.011)
- KRKOŠEK, M., 2017, POPULATION BIOLOGY OF INFECTIOUS DISEASES SHARED BY WILD AND FARMED FISH, *CANADIAN JOURNAL OF FISHERIES AND AQUATIC SCIENCES* ISSN: 0706-652X. DOI: 10.1139/CJFAS-2016-0379
- LARA-FLORES, M., OLVERA-NOVOA, M.A., GUZMÁN-MÉNDEZ, B.E., AND LÓPEZ-MADRID, W., 2003, USE OF THE BACTERIA *STREPTOCOCCUS FAECIUM* AND *LACTOBACILLUS ACIDOPHILUS*, AND THE YEAST *SACCHAROMYCES CEREVISIAE* AS GROWTH PROMOTERS IN NILE TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*), *AQUACULTURE*, 216, 193-201.
- LAZADO, C.C., CAIPANG, C.A.A., AND ESTANTE, E.G., 2015, PROSPECTS OF HOST-ASSOCIATED MICROORGANISMS IN FISH AND PENAEIDS AS PROBIOTICS WITH IMMUNOMODULATORY FUNCTIONS, *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 45: 2-12.
- LEBLANC, J.G., CHAIN, F., MARTÍN, R., BERMÚDEZ-HUMARÁN, L.G., COURAU, S. AND LANGELLA, P., 2017, BENEFICIAL EFFECTS ON HOST ENERGY METABOLISM OF SHORT-CHAIN FATTY ACIDS AND VITAMINS PRODUCED BY COMMENSAL AND PROBIOTIC BACTERIA, *MICROBIAL CELL FACTORIES*, 16 (79), 1-10. DOI 10.1186/s12934-017-0691-z
- LEE, S., KATYA, K., HAMIDOGHLI, A., HONG, J., KIM, D.-J., AND BAI S.C., 2018, SYNERGISTIC EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION OF *BACILLUS SUBTILIS* WB60 AND MANNANOLIGOSACCHARIDE (MOS) ON GROWTH PERFORMANCE, IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE IN JAPANESE EEL, *ANGUILLA JAPONICA*, *FISH AND SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 83, 283-291. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FSI.2018.09.031](https://doi.org/10.1016/j.fsi.2018.09.031)
- LENNARD, W., AND GODDEK, S., 2019, "AQUAPONICS: THE BASICS", GODDEK, K.S., JOYCE, A., KOTZEN, B., AND BURNELL, G.M., *AQUAPONICS FOOD PRODUCTION SYSTEMS. COMBINED AQUACULTURE AND HYDROPONIC PRODUCTION TECHNOLOGIES FOR THE FUTURE*, CHAM, SWITZERLAND, SPRINGER OPEN, 2019, 113-143. ISBN 978-3-030-15942-9

- LEUNG, T.L.F., AND BATES, A.E., 2013, MORE RAPID AND SEVERE DISEASE OUTBREAKS FOR AQUACULTURE AT THE TROPICS: IMPLICATIONS FOR FOOD SECURITY, *JOURNAL OF APPLIED ECOLOGY*, 50(1), 215–222.
- LIGHTNER, D.V., REDMAN, R.M., PANTOJA, C.R., NOBLE, B.L., NUNAN, L.M., AND TRAN, L., 2013, “DOCUMENTATION OF AN EMERGING DISEASE (EARLY MORTALITY SYNDROME) IN SE ASIA & MEXICO”, [HTTP://WWW.ENACA.ORG/PUBLICATIONS/HEALTH/AHPNS-TERMINALWORKSHOP/PRESENTATION%2002_LIGHTNER_DIAGNOSTIC%20STUDIES.PDF](http://www.enaca.org/publications/health/ahpns-terminalworkshop/presentation%2002_LIGHTNER_DIAGNOSTIC%20STUDIES.PDF), [CONSULTADO EL 21 DE MARZO DE 2016].
- LIMBORG, M.T., ALBERDI, A., KODAMA, M., ROGGENBUCK, M., KRISTIANSEN, K., AND GILBERT, M.T.P., 2018, APPLIED HOLOGENOMICS: FEASIBILITY AND POTENTIAL IN AQUACULTURE, *TRENDS IN BIOTECHNOLOGY*, 36(3), 252–264. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.TIBTECH.2017.12.006](https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2017.12.006)
- MAHIOUS, A.S., GATESOUE, F.J., HERVI, M., METAILLER, R., AND OLLEVIER, F., 2006, EFFECT OF DIETARY INULIN AND OLIGOSACCHARIDES AS PREBIOTICS FOR WEANING TURBOT, *PSETTA MAXIMA* (LINNAEUS, C. 1758), *AQUACULTURE INTERNATIONAL*, 14, 219–229. DOI 10.1007/s10499-005-9003-4
- MARDONES, F.O., PEREZ, A.M., AND CARPENTER, T.E., 2009, EPIDEMIOLOGIC INVESTIGATION OF THE RE-EMERGENCE OF INFECTIOUS SALMON ANEMIA VIRUS IN CHILE, *DISEASES OF AQUATIC ORGANISMS*, 84, 105–114. DOI: 10.3354/dao02040
- MARDONES, F.O., PEREZ, A.M., VALDES-DONOSO, P., AND CARPENTER, T.E., 2011, FARM-LEVEL REPRODUCTION NUMBER DURING AN EPIDEMIC OF INFECTIOUS SALMON ANEMIA VIRUS IN SOUTHERN CHILE IN 2007–2009, *PREVENTIVE VETERINARY MEDICINE*, 102, 175–84. DOI: 10.1016/j.prevetmed.2011.07.005
- MARTIN, S.A.M., DEHLER, C.E., AND KRÓL, E., 2016, TRANSCRIPTOMIC RESPONSES IN THE FISH INTESTINE, DEVELOPMENTAL & COMPARATIVE IMMUNOLOGY, 64, 103–117. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.DCI.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.dci.2016.03.014)
- MARTIN, S.A.M., AND KRÓL, E., 2017, NUTRIGENOMICS AND IMMUNE FUNCTION IN FISH: NEW INSIGHTS FROM OMICS TECHNOLOGIES, *DEVELOPMENTAL & COMPARATIVE IMMUNOLOGY*, 75, 86–98.
- MAULU, S., HASIMUNA, O.J., HAAMBIYA, L.H., MONDE, C., MUSUKA, C.G., MAKORWA, T.H., MUNGANGA, B.P., PHIRI, K.J., AND NSEKANABO, J.D., 2021, CLIMATE CHANGE EFFECTS ON AQUACULTURE PRODUCTION: SUSTAINABILITY IMPLICATIONS, MITIGATION, AND ADAPTATIONS, *FRONTIERS IN SUSTAINABLE FOOD SYSTEMS*, 5, 609097. DOI: 10.3389/FSUFS.2021.609097
- MEDZHITOV, R., 2007, RECOGNITION OF MICROORGANISMS AND ACTIVATION OF THE IMMUNE RESPONSE, *NATURE*, 449, 819–826. [HTTPS://DOI.ORG/10.1038/NATURE06246](https://doi.org/10.1038/NATURE06246)
- MERRIFIELD, D., AND RINGO, E., 2014, AQUACULTURE NUTRITION: GUT HEALTH, PROBIOTICS, AND PREBIOTICS: *CHICHESTER: JOHN WILEY & SONS*, p. 465. ISBN: 978-0-470-67271-6
- MISHRA, S.S., DAS, R., DHIMAN, M., CHOUDHARY, P., AND DEBBARMA, J., 2017, PRESENT STATUS OF FISH DISEASE MANAGEMENT IN FRESHWATER AQUACULTURE IN INDIA: STATE-OF-THE-ART-REVIEW, *JOURNAL OF AQUACULTURE & FISHERIES* DOI:10.24966/AAF-5523/100003
- MOHAMMADIAN, T., ALISHAHI, M., TABANDEH, M.R., GHORBANPOOR, M., AND GHARIBI, D., 2017, EFFECT OF *LACTOBACILLUS PLANTARUM* AND *LACTOBACILLUS DELBRUECKII* SUBSP. *BULGARICUS* ON GROWTH PERFORMANCE, GUT MICROBIAL FLORA AND DIGESTIVE ENZYMES ACTIVITIES IN *TOR GRYPUS* (KARAMAN, 1971), *IRANIAN JOURNAL OF FISHERIES SCIENCES*, 16, 296–317.
- MOHAPATRA, S., CHAKRABORTY, T., PRUSTY, A.K., DAS, P., PANIPRASAD, K., AND MOHANTA, K.N., 2012, USE OF DIFFERENT MICROBIAL PROBIOTICS IN THE DIET OF ROHU, *LABEO ROHITA* FINGERLINGS: EFFECTS ON GROWTH, NUTRIENT DIGESTIBILITY AND RETENTION, DIGESTIVE ENZYME ACTIVITIES AND INTESTINAL MICROFLORA, *AQUACULTURE NUTRITION*, 18, 1–11. DOI: 10.1111/J.1365-2095.2011.00866.X
- MOMMSEN, T.P., MOON, T.W., AND PLISETSKAYA, E.M., 2001, EFFECTS OF ARGININE ON PANCREATIC HORMONES AND HEPATIC METABOLISM IN RAINBOW TROUT, *PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL ZOOLOGY*, 74 (5), 668–678.
- MUKHERJEE, A., CHANDRA, G., AND GHOSH, K., 2019, SINGLE OR CONJOINT APPLICATION OF AUTOCHTHONOUS BACILLUS STRAINS AS POTENTIAL PROBIOTICS: EFFECTS ON GROWTH, FEED UTILIZATION, IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE IN ROHU, *LABEO ROHITA* (HAMILTON), *AQUACULTURE*, 512, 1–15. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.AQUACULTURE.2019.734302](https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734302)
- MUNIRASU, S., RAMASUBRAMANIAN, V., AND ARUNKUMAR, P., 2017, EFFECT OF PROBIOTICS DIET ON GROWTH AND BIOCHEMICAL PERFORMANCE OF FRESHWATER FISH *LABEO ROHITA* FINGERLINGS, *JOURNAL OF ENTOMOLOGY AND ZOOLOGY STUDY*

- MURRAY, A.G., AND PEELER, E.J., 2005. A FRAMEWORK FOR UNDERSTANDING THE POTENTIAL FOR EMERGING DISEASES IN AQUACULTURE, *PREVENTIVE VETERINARY MEDICINE*, 67(2-3), 223-235.
- MUTAGUCHI, Y., KASUGA, K., AND KOJIMA, I., 2018, PRODUCTION OF D-BRANCHED-CHAIN AMINO ACIDS BY LACTIC ACID BACTERIA CARRYING HOMOLOGS TO ISOLEUCINE 2-EPIMERASE OF *LACTOBACILLUS BUCHNERI*, *FRONTIERS IN MICROBIOLOGY*, 9, 1-8. DOI: 10.3389/fmicb.2018.01540
- NACA/FAO, 2000, "AQUACULTURE DEVELOPMENT BEYOND 2000: THE BANGKOK DECLARATION AND STRATEGY", BANGKOK AND FAO, *CONFERENCE ON AQUACULTURE IN THE THIRD MILLENNIUM*, BANGKOK, THAILAND, NACA, 2000, P. 27.
- NATNAN, M.E., CHEN-FEI, L., CHOU-MIN, C., HAMIDUN, B., AND BAHARUM, S.N., 2021, INTEGRATION OF OMICS TOOLS FOR UNDERSTANDING THE FISH IMMUNE RESPONSE DUE TO MICROBIAL CHALLENGE, *FRONTIERS IN MARINE SCIENCE*, 8, 1-17. DOI=10.3389/fmars.2021.668771 URL=HTTPS://WWW.FRONTIERSIN.ORG/ARTICLE/10.3389/fmars.2021.668771
- NGUYEN, T.L., PARK, C.I., AND KIM, D.H., 2017, IMPROVED GROWTH RATE AND DISEASE RESISTANCE IN OLIVE FLOUNDER, *PARALICHTHYS OLIVACEUS*, BY PROBIOTIC *LACTOCOCCUS LACTIS* WFLU12 ISOLATED FROM WILD MARINE FISH, *AQUACULTURE*, 471, 113-120.
- NIU, K.M., KHOSRAVI, S., KOTHARI, D., LEE, W.D., LIM, J.M., LEE, B.J., KIM, K.W., LIM, S.G., LEE, S.M., AND KIM, S.K., 2019, EFFECTS OF DIETARY MULTI-STRAIN PROBIOTICS SUPPLEMENTATION IN A LOW FISH-MEAL DIET ON GROWTH PERFORMANCE, NUTRIENT UTILIZATION, PROXIMATE COMPOSITION, IMMUNE PARAMETERS, AND GUT MICROBIOTA OF JUVENILE OLIVE FLOUNDER (*PARALICHTHYS OLIVACEUS*), *FISH SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 93, 258-268.
- NUNAN, L., LIGHTNER, D.V., PANTOJA, C.R., AND GOMEZ-JIMENEZ, S., 2014. DETECTION OF ACUTE HEPATOPANCREATIC NECROSIS DISEASE (AHPND) IN MEXICO, *DISEASES OF AQUATIC ORGANISMS*, 111, 81-86. DOI:10.3354/dao02776
- OCEANA, 2021, GATO X LIEBRE 2.0: DIME QUÉ PESCA DO COMES Y TE DIRÉ CÓMO TE ENGAÑARON, P.31 DOI: 10.5281/ZENODO.4592494
- OLIVEIRA, F., DICHOFF-KASAI, R.Y., EURICO-FERNANDES, C., SOUZA, W., AND MELDAU DE CAMPOS, C., 2020, PROBIOTIC, PREBIOTIC AND SYNBIOTICS SUPPLEMENTATION ON GROWTH PERFORMANCE AND INTESTINAL HISTOMORPHOMETRY *PSEUDOPLATYSTOMA RETICULATUM* LARVAE, *JOURNAL OF APPLIED AQUACULTURE*, 1-15. DOI: 10.1080/10454438.2020.1841060
- PANIGRAHI A., KIRON, V., SATOH, S., HIRONO, I., KOBAYASHI, T., SUGITA, H., PUANGKAEW, J., AND AOKI, T., 2007, IMMUNE MODULATION AND EXPRESSION OF CYTOKINE GENES IN RAINBOW TROUT *ONCORHYNCHUS MYKISS* UPON PROBIOTIC FEEDING, *DEVELOPMENTAL & COMPARATIVE IMMUNOLOGY*, 31, 372-382.
- PERRY, W.B., LINDSAY, E., PAYNE, C.J., BRODIE, C., AND KAZLAUSKAITE, R., 2020, THE ROLE OF THE GUT MICROBIOME IN SUSTAINABLE TELEOST AQUACULTURE, *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B: BIOLOGICAL SCIENCES*, 287: 1-10. HTTPS://DOI.ORG/10.1098/RSPB.2020.0184
- PETTERSEN, J.M., RICH, K.M., JENSEN B.B., AND AUNSMO, A., 2015, THE ECONOMIC BENEFITS OF DISEASE TRIGGERED EARLY HARVEST: A CASE STUDY OF PANCREAS DISEASE IN FARMED ATLANTIC SALMON FROM NORWAY, *PREVENTIVE VETERINARY MEDICINE*, 1(3-4), 314-24. DOI: 10.1016/J.PREVETMED.2015.08.003.
- PINTO, W., FIGUEIRA, L., DINIS, M.T., AND ARA-GAO, C., 2009, HOW DOES FISH METAMORPHOSIS AFFECT AROMATIC AMINO ACID METABOLISM?, *AMINO ACIDS*, 36, 177-183. DOI 10.1007/s00726-008-0045-6
- PIRARAT, N., PINPIMAI, K., ENDO, M., KATAGIRI, T., PONPORNPIST, A., CHANSUE, N., AND MAITA, M., 2011, MODULATION OF INTESTINAL MORPHOLOGY AND IMMUNITY IN NILE TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*) BY *LACTOBACILLUS RHAMNOSUS* GG, *RESEARCH IN VETERINARY SCIENCE*, 91, 92-97.
- RAHIMNEJAD, S., GUARDIOLA, F.A., LECLERCQ, E., ESTEBAN, M.A., CASTEX, M., SOTOUDEH, E., LEE, S.-M., 2018, EFFECTS OF DIETARY SUPPLEMENTATION WITH *PEDIOCOCCUS ACIDILACTICI* MA18/5M, GALACTOOLIGOSACCHARIDE AND THEIR SYNBIO-TIC ON GROWTH, INNATE IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE OF ROCKFISH (*SEBASTES SCHLEGELI*), *AQUACULTURE*, 482, 36-44. DOI: 10.1016/J.AQUACULTURE.2017.09.020
- RAMIRES-FERREIRA, C., GUIMARÃES LO TURCO, E., SARAIVA, S.A., PIMENTA-BERTOLLA, R., PERECIN, F., MARTINS-FERREIRA-SOUZA, G.H., MURGU, M., GARCIA, J.S., SANCHES-CORTEZZI, S., VIEIRA-MEIRELLES, F., FERNANDO-KLITZKE, C., CABRAL, E.C., MIGLINO, M.A., MARAFON-PORCIUNCULA, P., VERDE-LEAL, C.L., BORGES JR., E., DOS SANTOS MARTINS, D., AMBRÓSIO, C.E., D'ALEXANDRI,

- 591-603.
- REID, G.K., GURNEY-SMITH, H.J., FLAHERTY, M., GARBER, A.F., FORSTER, I., BREWER-DALTON, K., KNOWLER, D., MARCOGLIESE, D.J., CHOPIN, T., MOCCIA, R.D., SMITH, C.T., AND DE SILVA, S., 2019, CLIMATE CHANGE AND AQUACULTURE: CONSIDERING ADAPTATION POTENTIAL, *AQUACULTURE ENVIRONMENT INTERACTIONS*, 11, 603-624. [HT-TPS://DOI.ORG/10.3354/AEI00333](https://doi.org/10.3354/AEI00333)
- RISE, M.L., MARTYNIUK, C.J., AND CHEN, M., 2019, COMPARATIVE PHYSIOLOGY AND AQUACULTURE: TOWARD OMICS-ENABLED IMPROVEMENT OF AQUATIC ANIMAL HEALTH AND SUSTAINABLE PRODUCTION, *COMPARATIVE BIOCHEMISTRY AND PHYSIOLOGY PART D: GENOMICS AND PROTEOMICS*, 100603. DOI:10.1016/J.CBD.2019.100603
- ROBERTSON, P., O'DOWD, C., BURRELLS, C., WILLIAMS, P., AND AUSTIN, B., 2000, USE OF *CARNOBACTERIUM* SP. AS A PROBIOTIC FOR ATLANTIC SALMON (*SALMO SALAR* L.) AND RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*, WALBAUM), *AQUACULTURE*, 185, 235-243.
- RODRÍGUEZ-ESTRADA, U., SATOH, S., HAGA, Y., AND FUSHIMI, H.J.S., 2009, EFFECTS OF SINGLE AND COMBINED SUPPLEMENTATION OF *ENTEROCOCCUS FAECALIS*, MANNAN OLIGOSACCHARIDE AND POLYHYDROXYBUTYRATE ACID ON GROWTH PERFORMANCE AND IMMUNE RESPONSE OF RAINBOW TROUT *ONCORHYNCHUS MYKISS*, *AQUACULTURE SCIENCE*, 57, 609-617. [HTTPS://DOI.ORG/10.11233/AQUACULTURESCI.57.609](https://doi.org/10.11233/AQUACULTURESCI.57.609)
- ROQUES S., DEBORDE, C., RICHARD, N., SKIBA-CASSY, S., AND MOING, A., 2018 METABOLOMICS AND FISH NUTRITION: A REVIEW IN THE CONTEXT OF SUSTAINABLE FEED DEVELOPMENT, *REVIEWS IN AQUACULTURE*, 112(1): 261-282. DOI: 10.1111/RAQ.12316
- SAMEERA, S., JOSE, D., HARIKRISHNAN, M., AND RAMACHANDRAN, A., 2021, SPECIES SUBSTITUTIONS REVEALED THROUGH GENOTYPING: IMPLICATIONS OF TRACEABILITY LIMITATIONS AND UNREGULATED FISHING, *FOOD CONTROL*, 123, 107779. [HT-TPS://DOI.ORG/10.1016/J.FOODCONT.2020.107779](https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2020.107779)
- SALEM, M., SILVERSTEIN, J., REXROAD, C.E., AND YAO, J., 2007, EFFECT OF STARVATION ON GLOBAL GENE EXPRESSION AND PROTEOLYSIS IN RAINBOW TROUT (*ONCORHYNCHUS MYKISS*), *BMC GENOMICS*, 8(1), 1-16. [HTTP://DOI: 10.1186/1471-2164-8-328](http://doi:10.1186/1471-2164-8-328)
- SANTOS, F., WEGKAMP, A., DE VOS, W.M., SMID, E.J., AND HUGENHOLTZ, J., 2008, HIGH-LEVEL FOLATE PRODUCTION IN FERMENTED FOODS BY THE B12 PRODUCER *LACTOBACILLUS REUTERI* JCM1112, *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 74(10), 3291-3294. DOI:10.1128/AEM.02719-07
- SARKER, P.K., YOSSA, R., KARANTH, S., EKKER, M., AND VANDENBERG G.W., 2012, INFLUENCES OF DIETARY BIOTIN AND AVIDIN ON GROWTH, SURVIVAL, DEFICIENCY SYNDROME AND HEPATIC GENE EXPRESSION OF JUVENILE NILE TILAPIA *OREOCHROMIS NILOTICUS*, *FISH PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 38, 1183-1193. DOI 10.1007/s10695-012-9604-6
- SARMIENTO-CAMACHO, S., AND VALDEZ-MORENO, M., 2018, DNA BARCODE IDENTIFICATION OF COMMERCIAL FISH SOLD IN MEXICAN MARKETS, *GENOME*, 61(6), 457-466. DOI: 10.1139/GEN-2017-0222
- SHELTON, C., 2014, "CLIMATE CHANGE ADAPTATION IN FISHERIES AND AQUACULTURE - COMPILATION OF INITIAL EXAMPLES", FAO FISHERIES AND AQUACULTURE CIRCULAR No. 1088, ROME, ITALY, FAO, P. 34.
- SHINN, A.P., PRATOOMYOT, J., BRON, J.E., PALADINI, G., BROOKER, E.E. AND BROOKER, A.J., 2014, SPECIAL ISSUE ARTICLE. ECONOMIC COSTS OF PROTISTAN AND METAZOAN PARASITES TO GLOBAL MARICULTURE, *PARASITOLOGY*, 142, 196-270. DOI:10.1017/S0031182014001437
- SOTO-RODRIGUEZ, S.A., GOMEZ-GIL, B., LOZANO-OLVERA, R., BETANCOURT-LOZANO, M., AND MORALES-COVARRUBIAS, M.S., 2015, FIELD AND EXPERIMENTAL EVIDENCE OF *VIBRIO PARAHAEMOLYTICUS* AS THE CAUSATIVE AGENT OF ACUTE HEPATOPANCREATIC NECROSIS DISEASE OF CULTURED SHRIMP (*LITOPENAEUS VANNAMEI*) IN NORTHWESTERN MEXICO, *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 81 (5), 1689-1699
- SPINK, J., AND MOYER, D.C., 2011, DEFINING THE PUBLIC HEALTH THREAT OF FOOD FRAUD, *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, 76(9), 157-163. DOI: 10.1111/J.1750-3841.2011.02417.X
- STAHMANN, K.-P., REVUELTA, J.L., AND SEULBERGER, H., 2000, THREE BIOTECHNICAL PROCESSES USING *ASHBYA GOSSYPIL*, *CANDIDA FAMATA*, OR *BACILLUS SUBTILIS* COMPETE WITH CHEMICAL RIBOFLAVIN PRODUCTION, *APPLIED MICROBIOLOGY AND BIOTECHNOLOGY*, 53, 509-516.
- STENTIFORD, G.D., NEIL, D.M., PEELER, E.J., SHIELDS, J.D., SMALL, H.J., FLEGEL, T.W., VLAK, J.M., JONES, B., MORADO, F., MOSS, S., LOTZ, J., BARTHOLOMAY, L., BEHRINGER, D.C., HAUTON, C., AND LIGHTNER, D.V., 2012, DISEASE WILL LIMIT FUTURE FOOD SUPPLY FROM GLOBAL CRUSTACEAN FISHERY AND AQUACULTURE SECTORS, *JOURNAL OF INVERTEBRATE PATHOLOGY*, 110, 141-147. DOI: 10.1016/J.

- JIP.2012.03.013
- STERLING, B., AND CHIASSON, M., 2014, ENHANCING SEAFOOD TRACEABILITY ISSUES BRIEF, *GLOBAL FOOD TRACEABILITY CENTER*, DOI: 10.13140/2.1.1884.3526
- SUBASINGHE, R.P., BUENO, P.B., PHILLIPS, M.J., HOUGH, C., MCGLADDERY, S.E., AND ARTHUR, J.R., 2000, AQUACULTURE IN THE THIRD MILLENNIUM, AQUACULTURE IN THE THIRD MILLENNIUM: BANGKOK, THAILAND: NACA, P. 25. ISBN 974-7313-55-3.
- SUBASINGHE, R.P., MCGLADDERY, S.E. AND HILL, B.J., 2004, SURVEILLANCE AND ZONING FOR AQUATIC ANIMAL DISEASES: ROME, ITALY: FAO FISHERIES TECHNICAL PAPER No. 451, P. 73.
- TIENGAM, N., KHEMPAKA, S., PAENGKOU, P., AND BOONANUNTANASARN, S., 2015, EFFECTS OF INULIN AND JERUSALEM ARTICHOKE (*HELIANTHUS TUBEROSUS*) AS PREBIOTIC INGREDIENTS IN THE DIET OF JUVENILE NILE TILAPIA (*OREOCHROMIS NILOTICUS*), *ANIMAL FEED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, [HTTP://DX.DOI.ORG/10.1016/J.ANIFEEDSCI.2015.05.008](http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2015.05.008)
- TIMMONS, M.B., AND EBELING, J.M., 2010, RECIRCULATING AQUACULTURE: ITHACA, NY: NRAC: CAYUGA AQUA VENTURES, P. 948.
- TOE, C.J., FOO, H.L., LOH, T.C., MOHAMAD, R., RAHIM, R.A., AND IDRUS, Z., 2019, EXTRACELLULAR PROTEOLYTIC ACTIVITY AND AMINO ACID PRODUCTION BY LACTIC ACID BACTERIA ISOLATED FROM MALAYSIAN FOODS, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MOLECULAR SCIENCES*, 20,1-22. DOI:10.3390/IJMS20071777
- TORRECILLAS, S., MAKOL, A., CABALLERO, M.J., MONTERO, D., ROBAINA, L., REAL, F., SWEETMAN, J., TORT, L. AND IZQUIERDO, M.S., 2007, IMMUNE STIMULATION AND IMPROVED INFECTION RESISTANCE IN EUROPEAN SEA BASS (*DICENTRARCHUS LABRAX*) FED MANNAN OLIGOSACCHARIDES, *FISH & SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 23, 969-981. DOI:10.1016/J.FSI.2007.03.007
- TOVAR-RAMÍREZ, D., ZAMBONINO, J., CAHU, C., GATESOUBE, F.J., VÁZQUEZ-JUÁREZ, R., AND LÉSEL, R., 2002, EFFECT OF LIVE YEAST INCORPORATION IN COMPOUND DIET ON DIGESTIVE ENZYME ACTIVITY IN SEA BASS (*DICENTRARCHUS LABRAX*) LARVAE, *AQUACULTURE*, 204, 113-123.
- TOVAR-RAMÍREZ, D., ZAMBONINO-INFANTE, J., CAHU, C., GATESOUBE, F.J., AND VÁZQUEZ-JUÁREZ, R., 2004, INFLUENCE OF DIETARY LIVE YEAST ON EUROPEAN SEA BASS (*DICENTRARCHUS LABRAX*) LARVAL DEVELOPMENT, *AQUACULTURE*, 234, 415-427. DOI:10.1016/J.AQUACULTURE.2004.01.028
- ULLOA, P.E., ITURRA, P., NEIRA, R., AND ARANEDA, C., 2011, ZEBRAFISH AS A MODEL ORGANISM FOR NUTRITION AND GROWTH: TOWARDS COMPARATIVE STUDIES OF NUTRITIONAL GENOMICS APPLIED TO AQUACULTURED FISHES, *REVIEWS IN FISH BIOLOGY AND FISHERIES*, 21(4), 649-666. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/S11160-011-9203-0](https://doi.org/10.1007/s11160-011-9203-0)
- VANNUCCINI, S., KAVALLARI, A., BELLÙ, L.G., MÜLLER, M., AND WISSER, D., 2019, "UNDERSTANDING THE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE FOR FISHERIES AND AQUACULTURE: GLOBAL AND REGIONAL SUPPLY AND DEMAND TRENDS AND PROSPECTS", BARANGE, M., BAHRI, T., AND BEVERIDGE, M.C.M., *IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON FISHERIES AND AQUACULTURE. SYNTHESIS OF CURRENT KNOWLEDGE, ADAPTATION AND MITIGATION OPTIONS*, ROME, ITALY, FAO FISHERIES AND AQUACULTURE DEPARTMENT, 2019, P. 654.
- VELA, S., AND OJEDA, J., 2007, ACUICULTURA: LA REVOLUCIÓN AZUL, OBSERVATORIO ESPAÑOL DE ACUICULTURA; CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS; MINISTERIO DE AGRICULTURA, PESCA Y ALIMENTACIÓN. PUBLICACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS DEL OBSERVATORIO ESPAÑOL DE ACUICULTURA. MADRID, P. 364.
- VETVICKA, V., VANNUCCI, L., AND SIMA, P., 2013, THE EFFECTS OF B-GLUCAN ON FISH IMMUNITY, *NORTH AMERICAN JOURNAL OF MEDICAL SCIENCES*, 5(10), DOI:10.4103/1947-2714.120792
- WANG, Y., AND XU, Z., 2006, EFFECT OF PROBIOTICS FOR COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO*) BASED ON GROWTH PERFORMANCE AND DIGESTIVE ENZYME ACTIVITIES, *ANIMAL FEED SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 127, 283-292. DOI:10.1016/J.ANIFEEDSCI.2005.09.003
- WANG, L., HAN, Y., JIANG, Z., SUN, M., SI, B., CHEN, F., AND BAO, N., 2017, INTERACTIVE EFFECTS OF DIETARY LEUCINE AND ISOLEUCINE ON GROWTH, BLOOD PARAMETERS, AND AMINO ACID PROFILE OF JAPANESE FLOUNDER *PARALICHTHYS OLIVACEUS*, *FISH PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 43, 1265-1278. DOI: 10.1007/s10695-017-0370-3
- WHITMAN, W.B., COLEMAN, D.C., AND WIEBE, W.J., 1998, PROKARYOTES: THE UNSEEN MAJORITY, *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES*, 95(12), 6578-6583. [HTTPS://DOI.ORG/10.1073/PNAS.95.12.6578](https://doi.org/10.1073/pnas.95.12.6578)
- WU, Z.X., FENG, X., XIE, L.L., PENG, X.Y., YUAN, J., AND CHEN, X.X., 2012, EFFECT OF PROBIOTIC *BACILLUS SUBTILIS* CH9 FOR GRASS CARP, *CTE-*

- NOPHARYNGODON IDELLA* (VALENCIENNES, 1844), ON GROWTH PERFORMANCE, DIGESTIVE ENZYME ACTIVITIES AND INTESTINAL MICROFLORA, *JOURNAL OF APPLIED ICHTHYOLOGY*, 28, 721–727. DOI: 10.1111/J.1439-0426.2012.01968.X
- XIA, Y., LU, M., CHEN, G., CAO, J., GAO, F., WANG, F., LIU, Z., ZHU, H., AND YI, M., 2018, EFFECTS OF DIETARY *LACTOBACILLUS RHAMNOSUS* JCM1136 AND *LACTOCOCCUS LACTIS* SUBSP. *LACTIS* JCM5805 ON THE GROWTH, INTESTINAL MICROBIOTA, MORPHOLOGY, IMMUNE RESPONSE AND DISEASE RESISTANCE OF JUVENILE NILE TILAPIA, *OREOCHROMIS NILOTICUS*, *FISH AND SHELLFISH IMMUNOLOGY*, 76, 368–379. DOI: 10.1016/J.FSI.2018.03.020.
- XIAO, M., QIAN, K., WANG, Y., AND BAO F., 2020. GC-MS METABOLOMICS REVEALS METABOLIC DIFFERENCES OF THE FARMED MANDARIN FISH *SINIPERCA CHUATSI* IN RECIRCULATING PONDS AQUACULTURE SYSTEM AND POND, *SCIENTIFIC REPORTS* 10, DOI.ORG/10.1038/S41598-020-63252-9
- ZENGER, K.R., KHATKAR, M.S., JONES, D.B., KHALILISAMANI, N., JERRY, D.R., AND RAADSMA H.W., 2019, GENOMIC SELECTION IN AQUACULTURE: APPLICATION, LIMITATIONS AND OPPORTUNITIES WITH SPECIAL REFERENCE TO MARINE SHRIMP AND PEARL OYSTERS, *FRONTIERS IN GENETICS*, 9, 1–19. DOI: 10.3389/FGENE.2018.00693
- ZHANG, M., HOU, C., LI, M., QIAN, Y., XU, W., MENG, F., AND WANG, R., 2018, MODULATION OF LIPID METABOLISM IN JUVENILE YELLOW CATFISH (*PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*) AS AFFECTED BY FEEDING FREQUENCY AND ENVIRONMENTAL AMMONIA, *FISH PHYSIOLOGY AND BIOCHEMISTRY*, 45, 115–122. HT-TPS://DOI.ORG/10.1007/S10695-018-0540-Y
- ZHANG, C., ZHANG, J., FAN, W., HUANG, M., AND LIU, M., 2019, EFFECTS OF DIETARY *LACTOBACILLUS DELBRUECKII* ON GROWTH PERFORMANCE, BODY COMPOSITION, DIGESTIVE AND ABSORPTIVE CAPACITY, AND GENE EXPRESSION OF COMMON CARP (*CYPRINUS CARPIO* HUANGHE VAR), *AQUACULTURE NUTRITION*, 25, 166–175. DOI: 10.1111/ANU.12840
- ZHANG, P., YANG, F., HU, J., HAN, D., LIU, H., JIN, J., YANG, Y., YI, J., ZHU, X., AND XIE, S., 2020, OPTIMAL FORM OF YEAST CELL WALL PROMOTES GROWTH, IMMUNITY AND DISEASE RESISTANCE IN GIBEL CARP (*CARASSIUS AURATUS GIBELIO*), *AQUACULTURE REPORTS*, 18, 1–7. HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.AQREP.2020.100465
- ZHOU, Q.C., BUENTELLO, J.A., AND GATLIN, D.M., 2010, EFFECTS OF DIETARY PREBIOTICS ON GROWTH PERFORMANCE, IMMUNE RESPONSE AND INTESTI-
NAL MORPHOLOGY OF RED DRUM (*SCIAENOPS OCELLATUS*), *AQUACULTURE*, 309, 253–257. HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.AQUACULTURE.2010.09.003



Assessment of the wind power generation uncertainty on the steady-state operation of electric power systems

Uriel F. Sandoval Pérez, Claudio R. Fuerte-Esquivel

Para citar este artículo: : Sandoval Pérez U.F., Fuerte-Esquivel C.R. 2022. Assessment of the wind power generation uncertainty on the steady-state operation of electric power systems. Ciencia Nicolaita, número 183-199. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.573>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Assessment of the wind power generation uncertainty on the steady-state operation of electric power systems

Uriel F. Sandoval Pérez *, Claudio R. Fuerte-Esquivel

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Eléctrica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 19 de septiembre de 2021

Aceptado: 2 de diciembre de 2021

RESUMEN

Hoy en día, la integración a gran escala de sistemas de conversión de energía eólica en las redes de energía eléctrica es una de las opciones más efectivas y prácticas para generar electricidad a partir de fuentes renovables. Sin embargo, el aumento en el desarrollo de la energía eólica hace que el funcionamiento de los sistemas de energía eléctrica se vuelvan más dependientes y vulnerables a las variaciones en la velocidad del viento. En este contexto, es necesario realizar estudios probabilísticos de flujo de potencia (PPF) para mantener la integridad del sistema frente a la generación estocástica de energía eólica. Este documento describe e implementa un método de flujo de energía que considera las incertidumbres que surgen del comportamiento de la generación eólica. Este enfoque PPF, basado en una técnica de estimación puntual, es validado frente a miles de simulaciones de Monte Carlo.

PALABRAS CLAVE: energía eólica, redes de generación, probabilística de flujo de energía

ABSTRACT

Nowadays, the large-scale integration of wind energy conversion systems in transmission networks is one of the most effective and practical options for generating electricity from renewable sources. However, the increase in wind energy penetration causes the operation of electrical power systems to become more dependent and vulnerable to variations in wind speed. Within this context, it is necessary to perform probabilistic power flow (PPF) studies to maintain system integrity in the face of stochastic wind power generation. This paper describes and implements a power flow method that considers the uncertainties that arise from wind generation behavior. This PPF approach, based on a point estimation technique, is validated against thousands of Monte Carlo simulations.

KEYWORDS: Grid-connected wind generation, probabilistic power flow, point estimate method

Introduction

Electrical generation based on wind energy is a well-established conversion process in modern electrical power systems. Over the last couple of decades, regulatory incentives such as subsidies, stronger environmental initiatives, and significant advances in the design, construction and operation of wind generators, have played a major role in reducing the cost associated with this technology and the increase of maximum nameplate capacity of single wind turbines: from around 50 kW in the 1980s to nearly 6 MW found in current commercially available models (IRENA, 2019). This rapid technological development is leading to a rapid increase in the number of wind power facilities worldwide. According to the Global Wind Energy Council (GWEC) statistics, the wind industry had the best year in history in 2020 with a growth of 53% year-over-year, so that the new installations of 93 GW result in the total wind power capacity up to 743 GW (GWEC, 2021).

Over the years, the use of large-scale wind energy conversion systems (WECS) has become the most rapidly growing renewable energy source utilized in electricity generation all over the world, such that the power generated by wind turbines accounts for a considerable percentage of the total power production in different countries (GWEC, 2021). Even though wind energy is beneficial from an environmental standpoint, the complex task of achieving the controllability of an electric power system is even more demanding. Consequently, quantifying how the large-scale integration of wind generation affects the operation and control of electric networks requires special attention (Ahmed *et al.*, 2020).

Arguably, power flow analysis is the most frequently performed computational calculation for the steady-state analysis of power

systems. Therefore, a suitable power flow algorithm considering steady-state models of wind generators is of paramount importance for the planning and operation of power networks. The earlier publications on this topic may be traced back to around 2000 (Feijoo and Cidras, 2000). Within this context, when the state variables of wind generators are not taken into account in the power flow formulation, these generators are modelled as conventional electric sources that inject a specified power into the transmission network, e.g., (Divya and Rao, 2006; Feijoo, 2009; Feijoo and Cidras, 2000; Padron and Lorenzo, 2010; Slootweg *et al.*, 2001). This approach is rather attractive because it is straightforward to consider wind-based power generation in existing power flow programs. Note also that this modelling approach is used in practice to assess the steady-state operating status of large-scale power systems.

The essential characteristic of wind energy exploitation is its intrinsic dependence on weather conditions. Consequently, the facilities devoted to produce electricity from the wind force constitute a new source of uncertainty in the power system operation and planning (Restrepo Hernandez, 2011). By using deterministic power flow routines, one must run them many times to encompass all, or at least the majority of, possible system states. In this context, the Monte Carlo (MC) simulation randomly generates values for uncertain input variables, and these values are then taken into account to solve a deterministic power flow. The main drawback of the MC method is the great number of simulations required to attain convergence. To reduce this computational burden, approximate methods can provide and approximate the statistical properties of random output variables without many simulations. Within these techniques, point estimate methods (PEMs)

stand out (Morales and Perez-Ruiz, 2007), where uncertainties associated with data employed in the power flow problem can be handled using the deterministic power flow formulation but with a much lower computational burden than the MC method.

In this case, the statistical properties of a random output variable are approximated by computing its statistical moments, i.e., mean, variance, skewness and kurtosis, as a function of a set of random input variables and the function relating both types of variables. The application of this method to the power flow problem has been reported in several works, where the uncertainties correspond to data associated with the nodal data and line parameters (Su, 2005), conventional power generation and load demands (Morales and Perez-Ruiz, 2007), load demands and wind power generation (Chen *et al.*, 2015; Gupta, 2016; Morales and Perez-Ruiz, 2007), wind farm power outputs (Ai *et al.*, 2012; Outcalt, 2009; Xiao *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2020) as well as load demands and outages of generators (Mohammadi *et al.*, 2013). The PEM uses a specified number of estimated points that match the moments of the probability distribution function (PDF) of the random input variable. Hence, the accuracy of the PEMs depends on the number of points used to estimate the statistical moments of the random output variables. However, using many points increases the method's computational burden and the probability of calculating points outside the region where random input variables with large standard deviations are defined.

Based on the information mentioned above, this paper applies the five-point estimation method (5PEM) reported in (Gupta, 2016; Outcalt, 2009) to assess how the stochastic behavior of wind generation affects the steady-state operation of electric power systems. Within

this context, the rest of the paper is structured as follows. For completeness, the power flow formulation to assess the steady-state operation of a power system is described in Section II, whereas the 5PEM is reported in Section III. Case studies associated with applying the developed PPF and comparing the numerical results against thousands of Monte Carlo simulations are presented in Section IV. This section also includes a flowchart of how the 5PEM and the power flow formulation are linked to formulating a probabilistic power flow (PPF) approach. Lastly, concluding remarks are given in Section V.

Conventional Power Flow Problem

Assuming that an electric power system is composed of a set of nodes $\mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ interconnected through a set of transmission elements, $\mathcal{T} = \{1, 2, \dots, N_T\}$ the system's steady-state operation values of all nodal voltages, which can be grouped to form the vectors of voltage magnitudes $V = [V_1 \dots V_N]^T \in \mathbb{R}^N$ and voltage phase angles, $\theta = [\theta_1 \dots \theta_N]^T \in \mathbb{R}^N$ respectively. The superindex T denotes transpose. Thus, the power flow problem calculates voltage magnitudes and phase angles at each system's node based on a pair of equality constraints called power flow mismatch equations, formulated according to how the node operating conditions are defined (Acha *et al.*, 2004).

The active and reactive power flow mismatch equations are given by (1) and (2), respectively, for nonregulated nodes $\mathcal{N}^{PQ} \subseteq \mathcal{N}$, referred to as PQ nodes:

$$\Delta P_i = P_i^{Gen} + P_{\theta j}^{Gen} - P_i^{Load} - V_i \sum_{j \in \mathcal{N}} V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] = 0, \forall i \in \mathcal{N}^{PQ}, (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{Gen} + Q_{\theta j}^{Gen} - Q_i^{Load} - V_i \sum_{j \in \mathcal{N}} V_j [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] = 0, \forall i \in \mathcal{N}^{PQ}, (2)$$

where P_i^{Gen} and Q_i^{Gen} denote active and reactive powers, respectively, injected by a conventional generator into the i -th node, whereas P_i^{Load}

and Q_i^{Load} correspond to the active and reactive powers demanded by loads embedded at the i -th node. Furthermore, G_{ij} and B_{ij} are the ij -th elements of the nodal conductance and susceptance matrices, respectively. Lastly, $P_{\omega,i}^{Gen}$ and $Q_{\omega,i}^{Gen}$ are active and reactive powers, respectively, injected by a wind farm into the i -th node. Note that these powers correspond to the random variables to be included in the power flow formulation.

The set of controlled voltage nodes $\mathcal{N}^{PV} \subseteq \mathcal{N}$, referred to as *PV* nodes, only consider the active power mismatch equation:

$$\Delta P_i = P_i^{Gen} + P_{\omega,i}^{Gen} - P_i^{Load} - V_i \sum_{j \in \mathcal{N}} V_j [G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] = 0, \forall i \in \mathcal{N}^{PV} \quad (3)$$

On the other hand, $\Delta Q_i = 0, \forall i \in \mathcal{N}^{PV}$ as long as the reactive power output of the generator connected at the i -th node is within limits. If limits violation occurs, the *PV* node is transformed into a *PQ* node.

Lastly, the slack node does not have power flow mismatch equations because the voltage magnitude and phase angle values are known.

Since the set of power flow mismatch equations are nonlinear, the nodal voltages are obtained by iteratively solving the set of linearized algebraic equations (4), which results from expanding (1)-(3) into Taylor series and neglecting the higher-order terms, where k denotes the iteration number,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}_{F(X^{(k+1)})}^{(k)} = - \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta P}{\partial V} \\ \frac{\partial \Delta Q}{\partial \theta} & \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} V}_{J(X^{(k+1)})}^{(k)} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix}_{\Delta X^{(k)}}^{(k)} \quad (4)$$

In this case, $\Delta P \in \mathbb{R}^{(N_{PQ} + N_{PV})}$, $\Delta Q \in \mathbb{R}^{N_{PQ}}$, whereas, $\Delta \theta \in \mathbb{R}^{(N_{PQ} + N_{PV})}$ and $\Delta V \in \mathbb{R}^{N_{PQ}}$ represent the adjustments of nodal voltage magnitudes and phase angles, respectively. Lastly, $X = [\theta \ V] \in \mathbb{R}^{(N_{PQ} + N_{PV})}$ and J is the Jacobian matrix.

The solution process of (4) for $\Delta X^{(k)} = [\Delta \theta \ \Delta V]^{(k)} \in \mathbb{R}^{(N_{PQ} + N_{PV})}$ starts from flat voltages, and the nodal voltages are updated at each k -th iteration, i.e., $X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)}$. This iterative solution continues until $\{\Delta P_i\}_{i=1}^{N_{PQ}}$ and $\{\Delta Q_i\}_{i=1}^{N_{PV}}$ are simultaneously less than a specified tolerance or the maximum number of iterations is achieved.

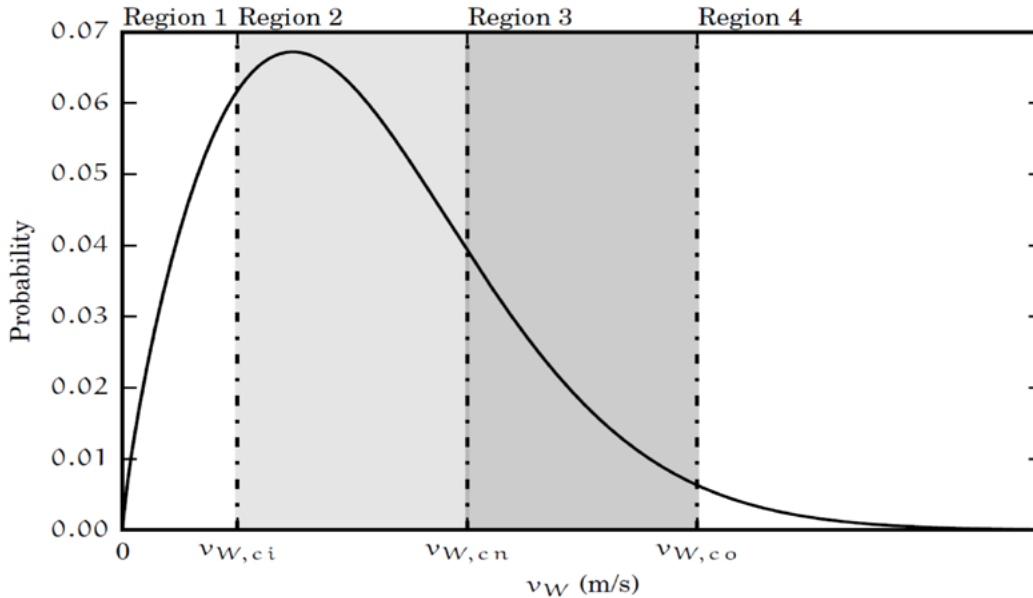


FIGURE 1. Weibull continuous PDF of wind speed.

Five-Point-Estimation

The direct approach for analyzing power flows under uncertainties is to use the well-known MC methods. These methods have a significant drawback: the better-desired accuracy, the more power flow simulations. In this context, it is necessary to have a tool that approaches the *exact* solution with less computational burden. (Outcalt, 2009) proposed the 5PEM, which discretizes wind power's continuous probability distribution function into five distinct points, each with its own probability.

This five-point distribution is calculated to have the same mean and standard deviation of the true power distribution generated by wind data.

Figure 1 displays a Weibull probability distribution function (PDF) that describes the probabilistic behavior of the wind speed for a particular location-time. For analysis purposes, this curve is divided into four regions. Regions 1 and 4 represent times when wind speed is either too low to generate electricity or too or too high, which

causes a safety shutdown of the wind generator. Hence, power in these regions is zero. In region 3, the wind is sufficient to produce full power; therefore, pitch control regulates this power. Finally, region 2 represents the region where the wind power generation truly varies.

These four regions can be translated into a wind power curve, as shown in Figure 2. This curve assumes that wind power linearly varies with the wind speed in region two, which is a valid approximation (Fu *et al.*, 2011). Based on the wind power curve, the active power supplied by the wind generator as a function of the wind speed is mathematically described by the following piecewise-defined function,

$$P_{\omega}^{Gen} = \begin{cases} 0 & v_{\omega} \leq v_{\omega,ci} \\ \alpha + \beta v_{\omega} & v_{\omega,ci} \leq v_{\omega} \leq v_{\omega,n} \\ P_{\omega}^{Gen,max} & v_{\omega,n} \leq v_{\omega} \leq v_{\omega,co} \\ 0 & v_{\omega} \geq v_{\omega,co} \end{cases} \quad (5)$$

where v_{ω} is the wind speed, $v_{\omega,ci}$ is the cut-in wind speed below which no power is generated, $v_{\omega,co}$ is the cut-out wind speed above which no power is generated and $v_{\omega,n}$ stands for the full power wind speed. The maximum

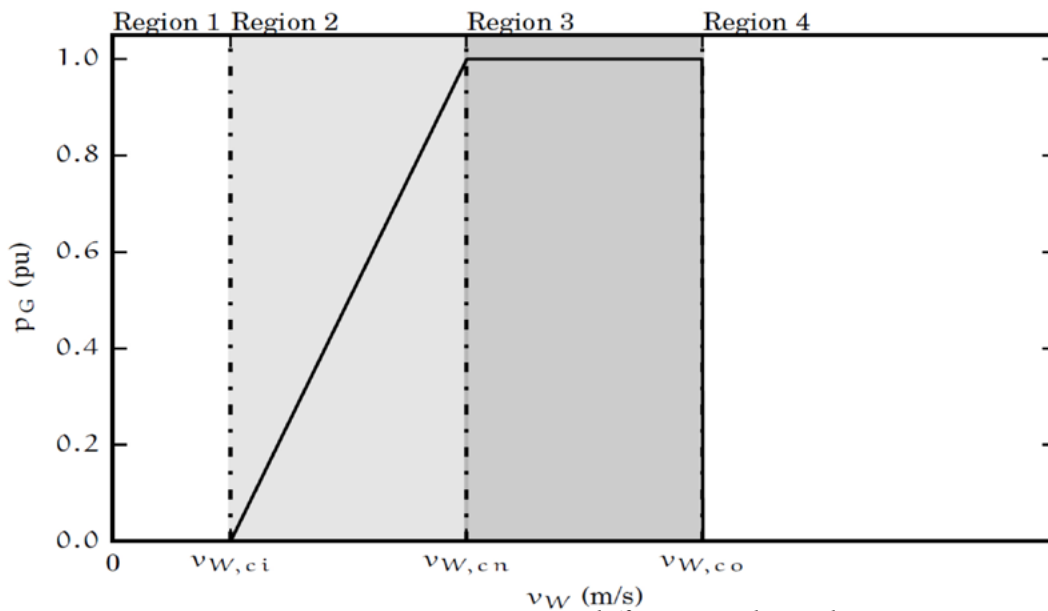


FIGURE 2. Output power at different wind speeds.

power generated by the wind farm is $p_{\omega}^{Gen,max}$. Lastly, constants α , and β are chosen to correspond with $v_{\omega,ci}$ and $v_{\omega,n}$ such that $\alpha + \beta v_{\omega,ci} = 0$ and $\alpha + \beta v_{\omega,n} = p_{\omega}^{Gen,max}$.

The core of the 5PEM is the approximation of the mixture of a discrete and continuous probability distribution by a discrete distribution with the whole probability mass concentrated at five points, as follows. The first point is determined from the tail areas under the Weibull distribution: regions 1 plus 4 producing zero power. Another point represents the full power region: region 3. Finally, the remaining three points represent the discretized version of region 2.

A. Algorithm

The variation of wind speed for a typical site is described by the analytical Weibull PDF function (Weibull, 1951) given by

$$f_{v_{\omega}}(v_{\omega}|\varphi, k) = \frac{k}{\varphi} \left(\frac{v_{\omega}}{\varphi} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_{\omega}}{\varphi} \right)^k} \quad (6)$$

where φ is the scale parameter, and k is the wind shape parameter. These constants may be determined from meteorological data at a specific site over a specified period. This work considers that these constants are known. For the reader interest, a few mathematical methods perform the Weibull curve fitting: (Jaramillo and Borja, 2004; Seguro and Lambert, 2000). On the other hand, the Weibull cumulative distribution function (CDF) is the area under the Weibull PDF and it is expressed as (Weibull, 1951)

$$F_{v_{\omega}}(v_{\omega}|\varphi, k) = \int_{-\infty}^{v_{\omega}} f_{v_{\omega}}(v_{\omega}|\varphi, k) dv_{\omega} = 1 - e^{-\left(\frac{v_{\omega}}{\varphi} \right)^k} \quad (7)$$

Having (6) and (7) defined, we will consi-

der them to discretize the wind power curve into five points $\Phi_i = (P_i, C_i) \forall i \in \{1, \dots, 5\}$, as follows. Note that each i -th point has its own wind power P_i and discrete probability C_i .

1) Point Φ_1

Point Φ_1 is associated with the probability that the wind power PI is equal to zero. This only happens when wind speed is very light such that the wind turbine cannot sustain any generation, or when wind speed is very high such that the wind turbine is safely turned off. Therefore, this point is calculated from the Weibull CDF as

$$P_1 = 0 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_1 &= P_r(P_{\omega}^{Gen} = 0) = P_r(v_{\omega} \leq v_{\omega,ci}) + P_r(v_{\omega} \geq v_{\omega,co}) \\ &= F_{v_{\omega}}(v_{\omega,ci}|\varphi, k) + (1 - F_{v_{\omega}}(v_{\omega,co}|\varphi, k)) \end{aligned} \quad (9)$$

2) Point Φ_5

The fifth point represents the rated power operation and it is similarly determined by using the Weibull CDF,

$$P_5 = P_{\omega}^{Gen,max} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} C_5 &= P_r(P_5 = P_{\omega}^{Gen,max}) = P_r(v_{\omega,n} \leq v_{\omega} \leq v_{\omega,co}) \\ &= (1 - F_{v_{\omega}}(v_{\omega,n}|\varphi, k)) - (1 - F_{v_{\omega}}(v_{\omega,co}|\varphi, k)) \end{aligned} \quad (11)$$

3) Points Φ_2 , Φ_3 and Φ_4

The procedure to obtain these last three points involves an extended algebraic procedure out of the scope of this paper. For the reader interest, however, the complete procedure is shown in (Outcalt, 2009; Sandoval Perez, 2015). The wind power and discrete probability of each point is computed as follows,

$$P_2 = \bar{\mu} + \bar{\sigma} z_2$$

$$C_2 = \rho_2(1 - C_1 - C_5) \quad , \quad (12)$$

$$P_3 = \bar{\mu} + \bar{\sigma} z_3$$

$$C_3 = \rho_3(1 - C_1 - C_5) \quad , \quad (13)$$

$$P_4 = \bar{\mu} + \bar{\sigma} z_4$$

$$C_4 = \rho_4(1 - C_1 - C_5) \quad , \quad (14)$$

In these equations, $\bar{\mu}$ and $\bar{\sigma}$ correspond to the mean and variance values of the PDF of the wind power defined in between in Region 2, respectively:

$$\bar{\mu} = \int_0^{P_{\omega}^{Gen, max}} P_{\omega}^{Gen} \tilde{f}_{P_{\omega}^{Gen}}(P_{\omega}^{Gen} | \varphi, k) dP_{\omega}^{Gen}$$

$$\bar{\sigma} = \int_0^{P_{\omega}^{Gen, max}} (P_{\omega}^{Gen} - \bar{\mu})^2 \tilde{f}_{P_{\omega}^{Gen}}(P_{\omega}^{Gen} | \varphi, k) dP_{\omega}^{Gen} \quad (15)$$

where the continuous PDF, which is given by (16) (Sandoval Perez, 2015), has an area under the curve equal to one,

$$\tilde{f}_{P_{\omega}^{Gen}}(P_{\omega}^{Gen} | \varphi, k) = \frac{f_{v_{\omega}}\left(\frac{P_{\omega}^{Gen} - \alpha}{\beta} \middle| \varphi, k\right)}{(1 - C_1 - C_5) \beta} \quad (16)$$

On the other hand, the standardized values of the wind power at each point are given by

$$z_2 = \frac{\lambda_3}{2} + \sqrt{\lambda_4 - \frac{3(\lambda_3)^2}{3}} \quad , \quad z_3 = 0 \quad , \quad z_4 = \frac{\lambda_3}{2} - \sqrt{\lambda_4 - \frac{3(\lambda_3)^2}{3}} \quad (17)$$

where the standard central moments λ_3 and λ_4 of the random variable P_{ω}^{Gen} are given by

$$\lambda_j = \int_0^{P_{\omega}^{Gen, max}} \left(\frac{P_{\omega}^{Gen} - \bar{\mu}}{\bar{\sigma}} \right)^j \tilde{f}_{P_{\omega}^{Gen}}(P_{\omega}^{Gen} | \varphi, k) dP_{\omega}^{Gen} \quad , \quad j = 3, 4 \quad (18)$$

Lastly, since the continuous distribution (16) in Region 2 is discretized into three points, the resulting discrete distribution has three discrete probabilities: ρ_2 , ρ_3 , and ρ_4 that also satisfies $\rho_2 + \rho_3 + \rho_4 = 1$. Hence, the values of these probabilities are given by (Sandoval Perez, 2015)

$$\rho_2 = -\frac{1}{z_2(z_4 - z_2)} \quad , \quad \rho_3 = 1 - \rho_2 - \rho_4 \quad , \quad \rho_4 = -\frac{1}{z_4(z_4 - z_2)} \quad (19)$$

Based on the information reported above, Table 1 summarizes a 5PEM discrete power distribution of a wind generator.

Case Studies

The accuracy and efficiency of the 5PEM are tested by comparing its results with those obtained from the Monte Carlo simulation considering 10,000 samples. This number of simulations is high enough to guarantee the convergence of the MC method (Morales and Perez-Ruiz, 2007). Because of the high number of power flow simulations when using the MC method, a High-Performance Computing Cluster (HPCC) was used for the simulations. The probabilistic power flow was coded in the Python and C programming languages, with a multithreading approach to parallelizing several power flow simulations.

The effect of wind generation was incorporated by using simple synchronous generation dispatched at the active power obtained by either the 5PEM or the MC method. Each wind generator has voltage magnitude control capability; hence these wind generators are treated as PV buses (Ackermann, 2012).

The 5PEM approach is carried out through the following steps.

1. Estimate five discrete points for each wind farm by using the 5PEM algorithm.
2. Perform a cartesian product with each five-point set; hence, the total combinations yield $n = 5^{n_{\omega f}}$ set of powers and the associated probabilities, where $n_{\omega f}$ is the total number of wind farms.
3. Run n power flows by considering each power combination.

TABLE 1. Five-point discrete distribution

Point	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
Wind farm power	0	P_2	P_3	P_4	$p_{\omega}^{Gen,max}$
5 PEM probability	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5

(21)

The Monte Carlo simulations are performed as follows.

1. Generate 10,000 random wind speed values based on the Weibull distribution function of each wind farm. The random number generation is computed with a Mersenne Twister algorithm by using the built-in C language function. This number of MC simulations has demonstrated good results in other probabilistic power flows (Morales and Perez-Ruiz, 2007).

2. Evaluate this set of random wind speeds using (5); hence, a total of 10,000 wind powers are obtained.

3. Run power flows considering each power of the previous step.

Lastly, to provide an overview of the overall performance of the 5PEM, the following error indices are defined for each output random variable associated with the solution of the PPF:

$$\varepsilon_{\mu}^{\chi} = \left| \frac{\mu_{MC}^{\chi} - \mu_{5PEM}^{\chi}}{\mu_{MC}^{\chi}} \right| \times 100\% \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\sigma}^{\chi} = \left| \frac{\sigma_{MC}^{\chi} - \sigma_{5PEM}^{\chi}}{\sigma_{MC}^{\chi}} \right| \times 100\% \quad (21)$$

where μ_{MC}^{χ} and σ_{MC}^{χ} are the mean and standard deviation associated with the results obtained by the Monte Carlo simulation, which are taken as reference values. Similarly, μ_{5PEM}^{χ} and σ_{5PEM}^{χ} are the mean and standard deviation from the 5PEM results. Finally, χ is any variable obtained from the PPF solution, which may refer to a nodal voltage at the i -th node, i.e., V_i and θ_i , the active and reactive power injected by the slack generator, P_{slack}^{Gen} and Q_{slack}^{Gen} , or the active and powers that flow through a transmission element connected between nodes i and j , i.e., P_{ij} and Q_{ij} .

The previous procedure is graphically pictured in Figure 3, where we present a condensed flow-chart of the developed PPF.

A. Case A

The New England 39 bus system described in (Sandoval Perez, 2015) is modified to consider a WF with a 180 MW output rated power at bus 25. Wind farm data are shown in Table 2 as reported in (Jaramillo and Borja, 2004).

TABLE 2. Wind farm data.

WF	Bus	k	φ (m/s)	$U_{\omega,ci}$ (m/s)	$U_{\omega,n}$ (m/s)	$U_{\omega,co}$ (m/s)	$p_{\omega}^{Gen,max}$ (pu)
I	25	1.768	11.861	3.57	13.4	25	1.8

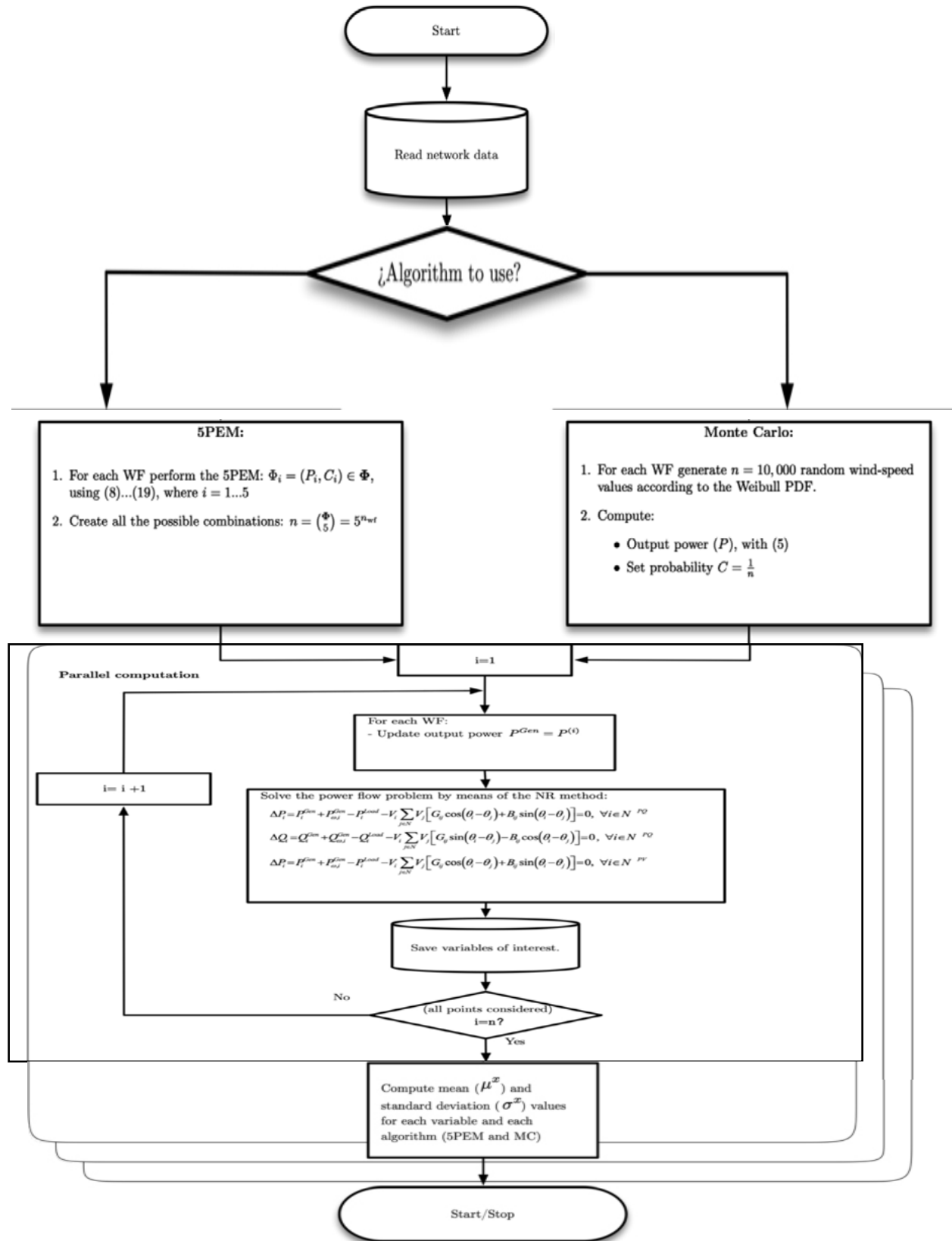


FIGURE 3. PPF flow-chart.

By considering one wind farm connected at bus 25, $n_{\omega f} = 1$, five power flow simulations are performed, each one associated with each point of the discretized PDF as reported in Table 3. Table 4 shows the mean and standard deviation results for a selected set of variables, representing the general results obtained from both probabilistic approaches. As can be observed, the 5PEM provides good results compared with the Monte Carlo values, both for mean and standard deviation. By comparing the slack output power with both algorithms (5PEM and MC), the 5PEM represents the system's stochastic overall active power balance well.

TABLE 3. Calculated five-points for each wind farm

Wind farm	Φ_1	Φ_2	Φ_3	Φ_4	Φ_5
I	(0,0.137)	(1.578, 0.155)	(0.877, 0.280)	(0.206, 0.163)	(1.8, 0.265)

Figure 4 and Figure 5 show the PDF and CDF of the active and reactive powers at the wind farm bus, respectively. It must be noted that the PDF for the 5PEM is concentrated at five points which are those obtained by the described scheme. On the other hand, the 5PEM CDF is similar to the CDF obtained from the MC simulations.

The computed five points can be appreciated in both Figure 4 and Figure 5: each estimated point represents or aggregates the MC results providing the same statistical distribution.

Finally, Figures 6 and 7 show distribution functions of the active and reactive powers of the slack generator, respectively. The PDF and CDF obtained using the 5PEM have similar values to those obtained by the MC approach.

B. Case B

A typical summer-day operating condition is studied in this section to assess the stochastic effect of different wind farms on the operation of a large scale interconnected power

TABLE 4. Mean and standard deviation for Case A (selected values).

Case A		$P_{\omega,i}^{Gen}$	$Q_{\omega,i}^{Gen}$	P_{slack}^{Gen}	Q_{slack}^{Gen}	V_{16}	θ_{16}
Monte Carlo	μ	1.001	-6.335	5.320	2.168	1.007	-0.136
	σ	0.681	0.139	0.657	0.106	0.000	0.027
5PEM	μ	1.002	-6.335	-6.335	2.168	1.007	-0.136
	σ	0.682	0.139	0.139	0.106	0.000	0.027
Error (%)	ε_{μ}^{χ}	0.113	0.003	0.021	0.007	0.000	0.033
	$\varepsilon_{\sigma}^{\chi}$	0.142	0.090	0.142	0.030	0.330	0.140

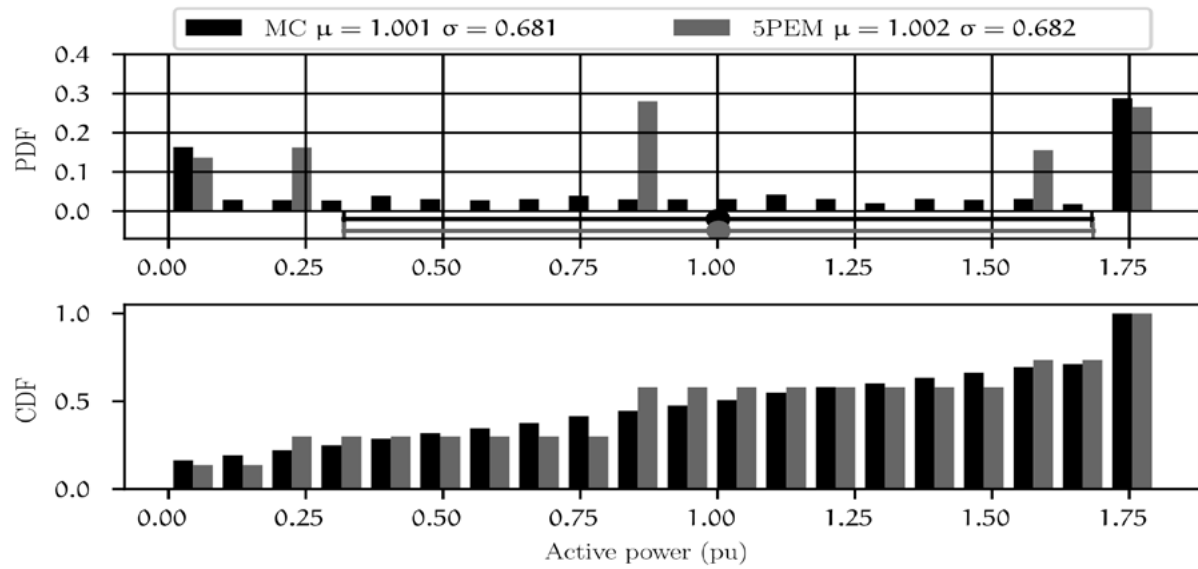


FIGURE 4. PDF and CDF of the wind farm active power (Case A).

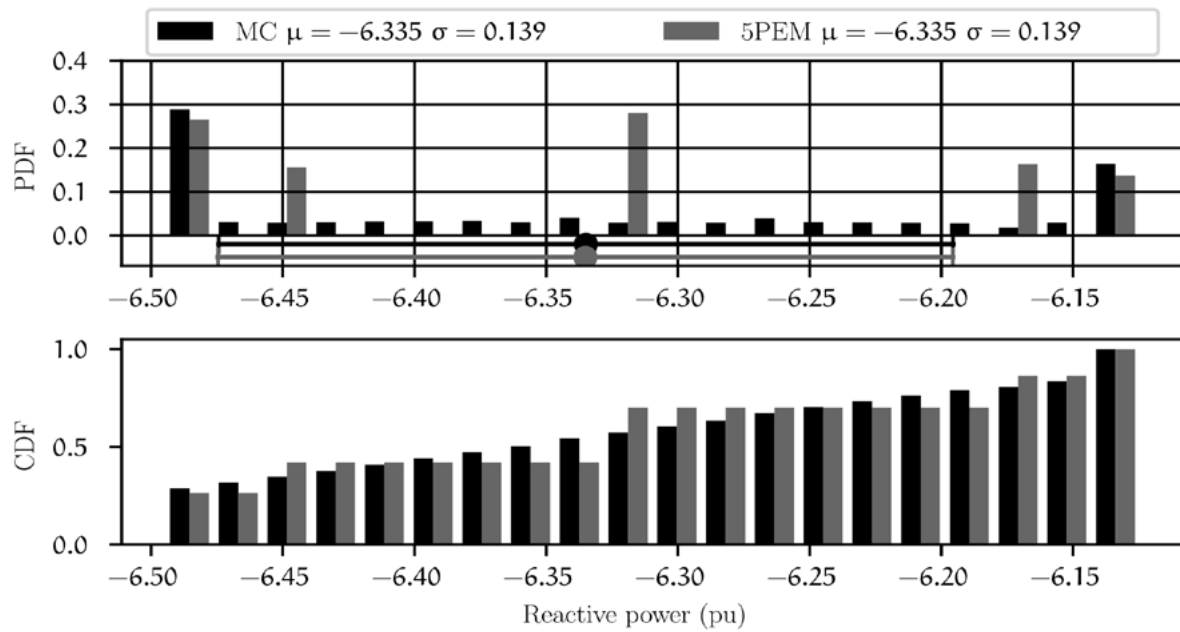


Figure 5. PDF and CDF of the wind farm reactive power (Case A).

system. The network is composed of about 10,000 buses, 800 generators and 9000 transmission elements located in several control areas electrically interconnected for improving operating reliability and security.

The analysis is focused on the region with good wind resources, which must have an average wind speed of 7m/s or more (Jaramillo and Borja, 2004). These geographical characteristics have promoted more than 700 MW of installed capacity.

Two wind farms are modeled as stochastic generators to follow either the procedure of the 5PEM or a Monte Carlo simulation. The wind farm data used for the simulations are described in Table 5.

The generation of this region is mainly exported to the rest of the system by two power flow corridors referred to as “Tie-line 1” and “Tie-line 2” power flow corridors.

The PDF and CDF associated with the voltage magnitude and angle at node “HV01-400”, which is the nearest high voltage bus to the zone of interest, are shown in 8 and 9, respectively. The results shown in both figures clearly show that the PDFs and CDFs obtained by the 5PEM and MC approaches compare well to each other.

On the other hand, an important part of the generation supplied from the southeast areas is collected at node “HV02-400”.

The impact of wind power variability on the voltage at this node is shown in Figure 10 and Figure 11. Note that similar results are obtained using the 5PEM and MC methods.

Finally, the most important power flow corridors evaluated when new wind generation is incorporated in this region are the previously named “Tie-line 1” and “Tie-line 2” corridors. Each power flow corridor is made up of three high voltage (400 kV) transmission lines. Then, the impact of the wind power injection on both power flow corridors is depicted in Figure 12 and Figure 13.

A comparison of the results clearly shows that the PDFs and CDFs obtained by the 5PEM and MC approaches are in good agreement. Lastly, a comparison of the computational times required by the PPF based on the 5PEM and MC approach is given in Table 5. Note that the MC study needed approximately 7 minutes to complete 10,000 deterministic power flow solutions of the large-scale power system, while the time taken by 5PEM is about two seconds. Important detail is the usage of a parallel execution paradigm, in which case the MC power flow simulations were distributed along 64 cores. Each core solved the power flow, and the final solutions were then aggregated by a single core to consider the overall results.

Table 5. Windfarm data of the large -scale power system study

WF	k	φ (m/s)	$U_{\theta,ci}$ (m/s)	$U_{\theta,n}$ (m/s)	$U_{\theta,co}$ (m/s)	$P_{\theta}^{Gen,max}$ (MW)
I	2.1	9	4	15	25	240
II	2.12	8	4	15	25	240

Table 6. Time required for simulation studies

Case	5PEM	MC
Case A (New England test case)	0.089 s	22.375 s
Case B (Large-scale power system)	2.1 s	375 s

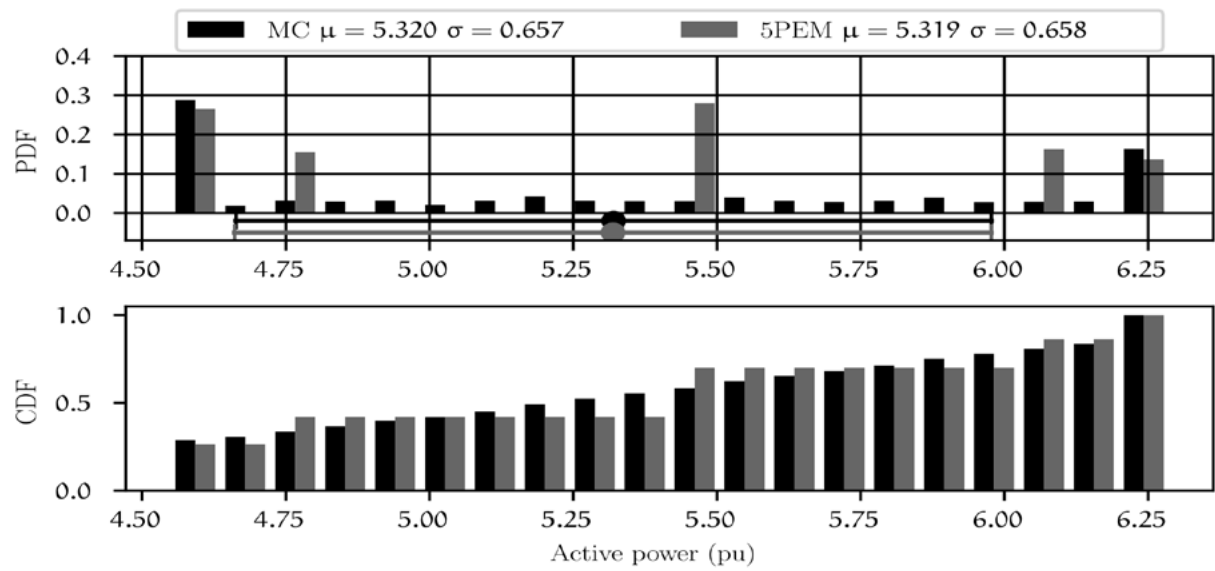


Figure 6. PDF and CDF of slack active power (Case A).

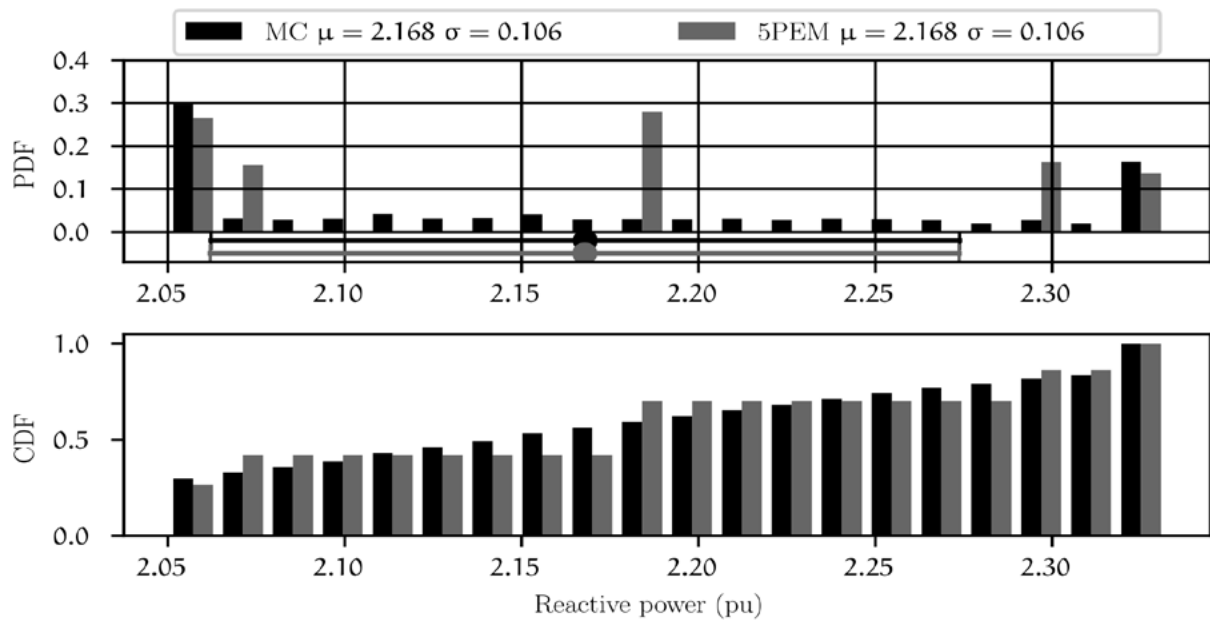


Figure 7. PDF and CDF of the slack reactive power (Case A).

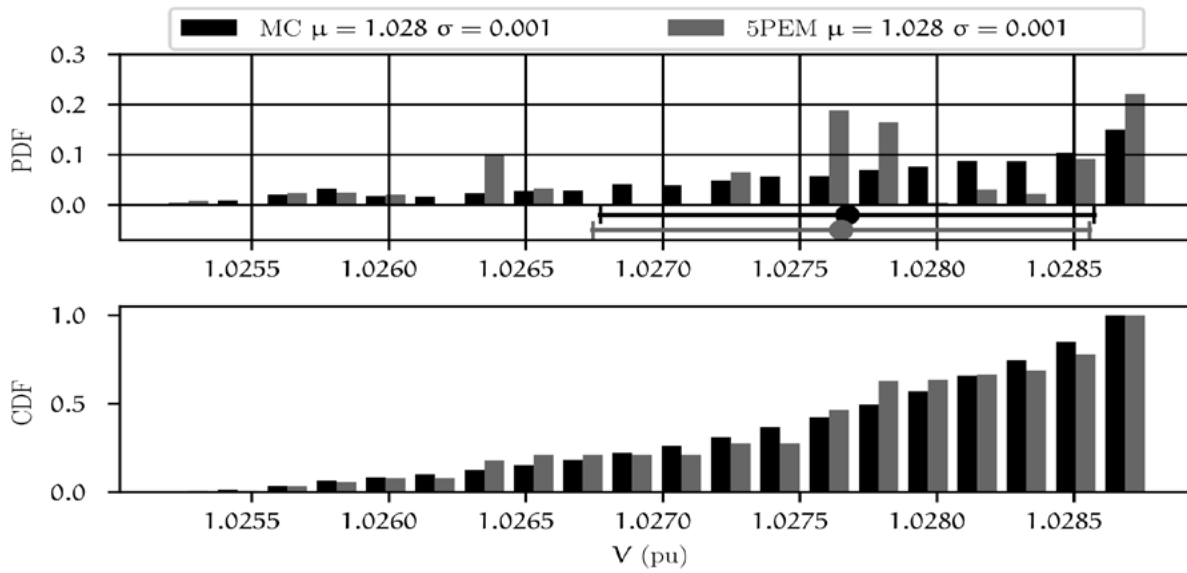


Figure 8. PDF and CDF of the voltage magnitude at bus HV01-400.

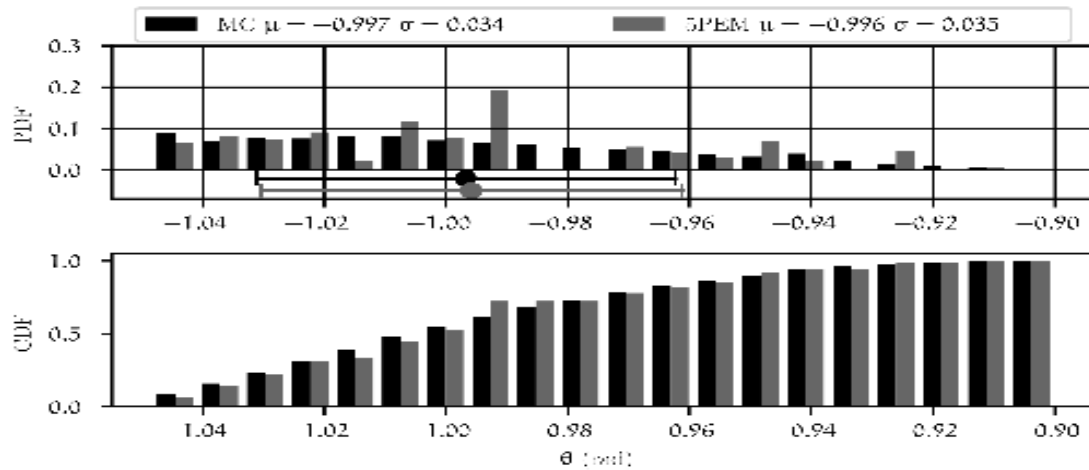


Figure 9. PDF and CDF of the voltage angle at bus HV01-400.

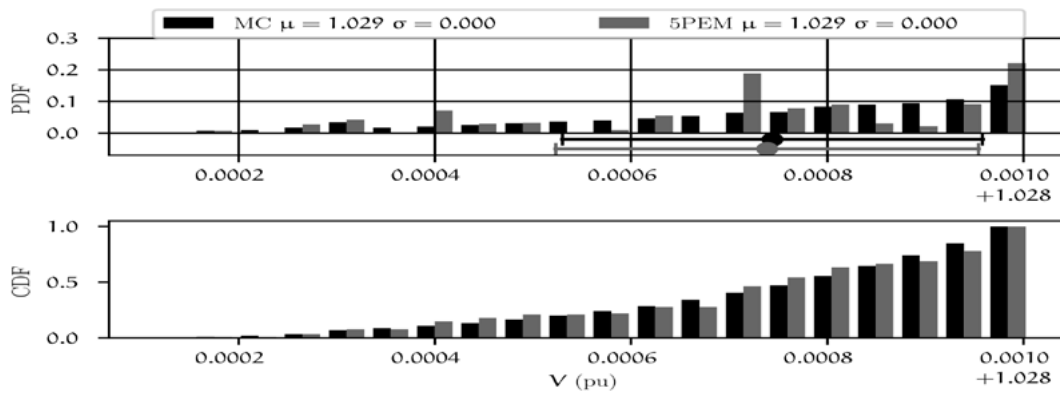


Figure 10. PDF and CDF of the voltage magnitude at bus HV02-400.

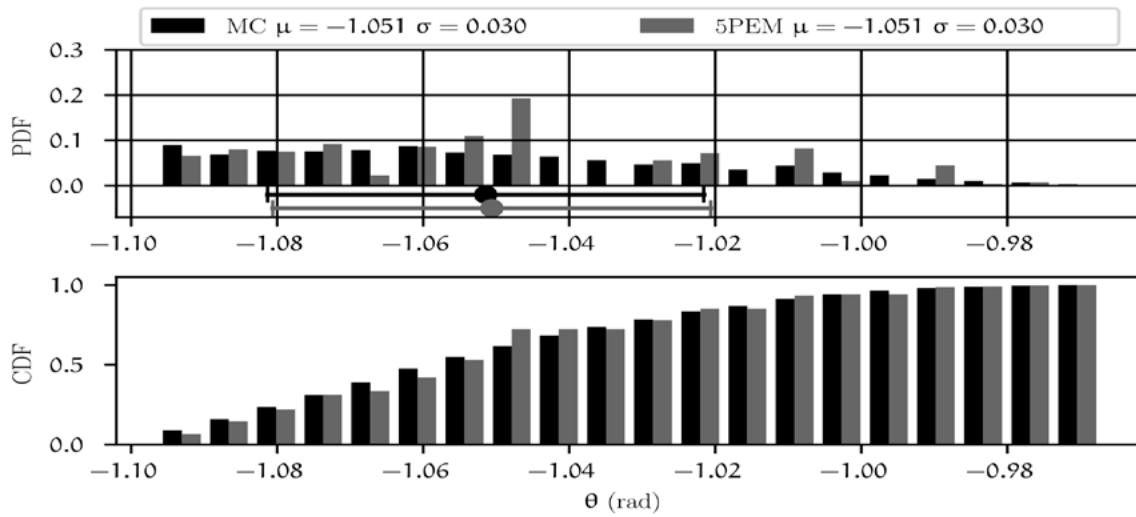


Figure 11. PDF and CDF of the voltage angle at bus HV02-400.

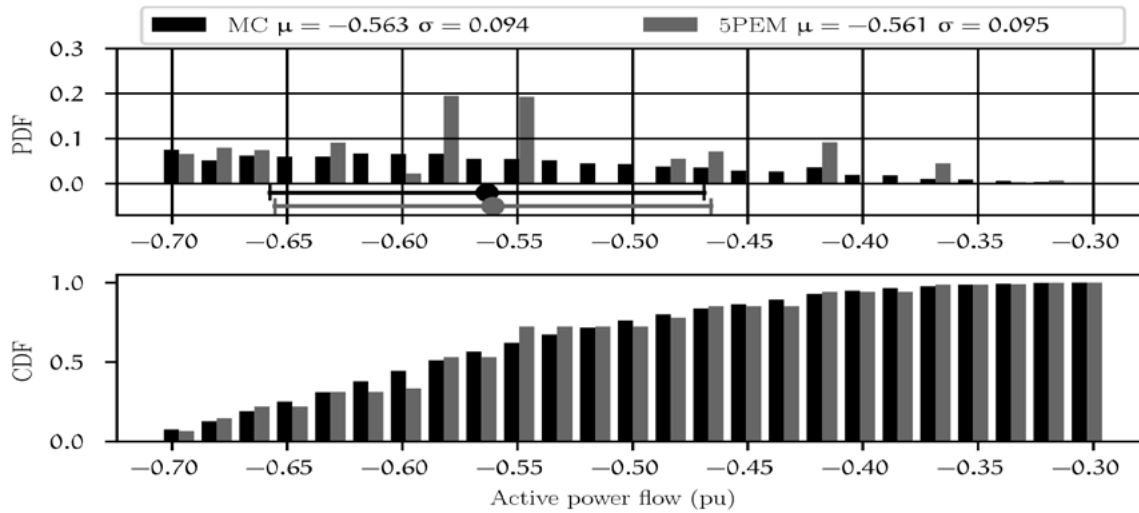


Figure 12. PDF and CDF of power flow on "Tie-line 2" corridor.

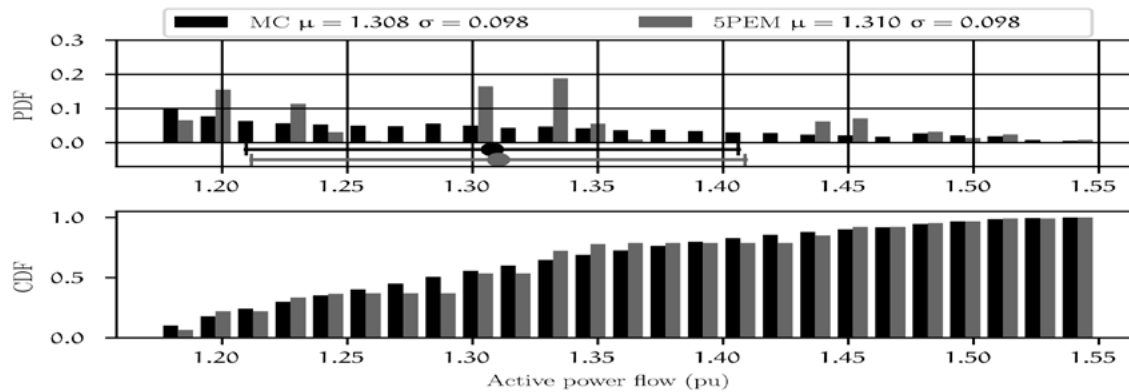


Figure 13. PDF and CDF of power flow on "Tie-line 1" corridor.

Conclusion

This paper has reported an alternative to the traditional Monte Carlo method for handling stochastic phenomena in formulating the probabilistic power flow problem. In this sense, the 5PEM has been mathematically described to understand how a combination of discrete and continuous probability distribution functions can be concentrated in five points. Within this context, the 5PEM-based power flow formulation has been clearly described.

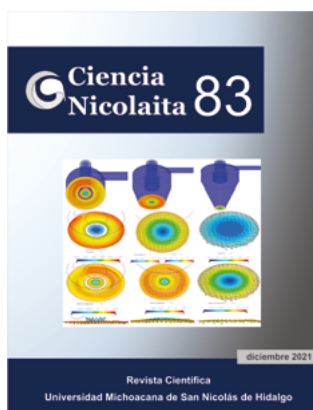
The numerical results show that the 5PEM-based power flow method is appropriate for evaluating the PDF, CDF, mean and standard deviations of nodal voltages and power flows in transmission grids. The overall precision of the results, compared with those obtained with the MC method, is very good for nodal voltages, i.e., <1% of relative error, and acceptable for power flows. Unlike the MC approach, however, the 5PEM provides good results, while keeping the computational burden low. Thus, including the 5PEM in the power flow problem provides an appropriate solution for the trade-off between the accuracy of the results and the efficiency of the computational procedure for large-scale power system problems.

Lastly, case studies demonstrate that 5PEM is a relevant tool for evaluating the integration of future WECS and accurately quantifying the transmission reinforcements or necessary adjustments to the transmission grid by considering stochastic scenarios.

References

- ACHA, E., FUERTE-ESQUIVEL, C.R., AMBRIZ-PÉREZ, H., ANGELES-CAMACHO, C., 2004. FACTS: MODELLING AND SIMULATION IN POWER NETWORKS. *JOHN WILEY & SONS*.
- ACKERMANN, T. (ED.), 2012. WIND POWER IN POWER SYSTEMS, 2ND ED. WILEY, CHICHESTER, WEST SUSSEX; HOBOKEN, N.J.
- AHMED, S.D., AL-ISMAIL, F.S.M., SHAFIULLAH, M., AL-SULAIMAN, F.A., EL-AMIN, I.M., 2020. GRID INTEGRATION CHALLENGES OF WIND ENERGY: A REVIEW. *IEEE ACCESS* 8, 10857–10878. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/ACCESS.2020.2964896](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2964896)
- AI, X., WEN, J., WU, T., LEE, W.-J., 2012. A DISCRETE POINT ESTIMATE METHOD FOR PROBABILISTIC LOAD FLOW BASED ON THE MEASURED DATA OF WIND POWER. 7
- CHEN, C., WU, W., ZHANG, B., SUN, H., 2015. CORRELATED PROBABILISTIC LOAD FLOW USING A POINT ESTIMATE METHOD WITH NATAF TRANSFORMATION. *INT. J. ELECTR. POWER ENERGY SYST.* 65, 325–333.
- DIVYA, K.C., RAO, P.S.N., 2006. MODELS FOR WIND TURBINE GENERATING SYSTEMS AND THEIR APPLICATION IN LOAD FLOW STUDIES. *ELECTR. POWER SYST. RES.* 76, 844–856. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.EPSR.2005.10.012](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2005.10.012)
- FEIJOO, A., 2009. ON P Q MODELS FOR ASYNCHRONOUS WIND TURBINE. *IEEE TRANS. POWER SYST.* 24, 1890–1891. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/TPWRS.2009.2030243](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2030243)
- FEIJOO, A.E., CIDRAS, J., 2000. MODELING OF WIND FARMS IN THE LOAD FLOW ANALYSIS. *IEEE TRANS. POWER SYST.* 15, 110–115. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/59.852108](https://doi.org/10.1109/59.852108)
- FU, Q., YU, D., GHORAI, J., 2011. PROBABILISTIC LOAD FLOW ANALYSIS FOR POWER SYSTEMS WITH MULTI-CORRELATED WIND SOURCES, IN: 2011 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING. PRESENTED AT THE 2011 IEEE POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING, PP.1–6. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/PES.2011.603899](https://doi.org/10.1109/PES.2011.603899)
- GUPTA, N., 2016. PROBABILISTIC LOAD FLOW WITH DETAILED WIND GENERATOR MODELS CONSIDERING CORRELATED WIND GENERATION AND CORRELATED LOADS. *RENEW ENERGY* 94, 96–105. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.RENENE.2016.03.030](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.03.030)
- GWEC, G.W.E., 2021. GLOBAL WIND REPORT 2021. GLOB. WIND ENERGY COUNCIL. BRUSSELS, BELG.
- IRENA, I., 2019. FUTURE OF WIND: DEPLOYMENT, INVESTMENT, TECHNOLOGY, GRID INTEGRATION AND SOCIO-ECONOMIC ASPECTS.
- JARAMILLO, O.A., BORJA, M.A., 2004. WIND SPEED ANALYSIS IN LA VENTOSA, MEXICO: A BIMODAL PROBABILITY DISTRIBUTION CASE. *RENEW ENERGY* 29, 1613–1630.

- [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.RENENE.2004.02.001](https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.001)
 MOHAMMADI, M., SHAYEGANI, A., ADAMINEJAD, H., 2013. A NEW APPROACH OF POINT ESTIMATE METHOD FOR PROBABILISTIC LOAD FLOW. *INT. J. ELECTR. POWER ENERGY SYST.* 51, 54–60. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.IJEPES.2013.02.019](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.02.019)
- MORALES, J.M., PEREZ-RUIZ, J., 2007. POINT ESTIMATE SCHEMES TO SOLVE THE PROBABILISTIC POWER FLOW. *IEEE TRANS. POWER SYST.* 22, 1594–1601. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/TPWRS.2007.907515](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.907515)
- OUTCALT, D.M., 2009. PROBABILISTIC LOAD FLOW FOR HIGH WIND PENETRATED POWER SYSTEMS BASED ON A FIVE POINT ESTIMATION METHOD. *THE UNIVERSITY OF WISCONSIN - MILWAUKEE.*
- PADRON, J.F.M., LORENZO, A.E.F., 2010. CALCULATING STEADY-STATE OPERATING CONDITIONS FOR DOUBLY-FED INDUCTION GENERATOR WIND TURBINES. *IEEE TRANS. POWER SYST.* 25, 922–928. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/TPWRS.2009.2036853](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2009.2036853)
- RESTREPO HERNANDEZ, J.F., 2011. IMPACT OF WIND ENERGY ON THE OPERATION OF POWER SYSTEMS. *MCGILL UNIVERSITY.*
- SANDOVAL PEREZ, U.F., 2015. ASSESSMENT OF THE IMPACT OF WIND POWER GENERATION ON THE STEADY-STATE OPERATION OF POWER SYSTEMS. *UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO.*
- SEGURO, J.V., LAMBERT, T.W., 2000. MODERN ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE WEIBULL WIND SPEED DISTRIBUTION FOR WIND ENERGY ANALYSIS. *J. WIND ENG. IND. AERODYN.* 85, 75–84. [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1)
- SLOOTWEG, J.G., POLINDER, H., KLING, W.L., 2001. INITIALIZATION OF WIND TURBINE MODELS IN POWER SYSTEM DYNAMICS SIMULATIONS, IN: *POWER TECH PROCEEDINGS, 2001 IEEE PORTO. PRESENTED AT THE POWER TECH PROCEEDINGS, 2001 IEEE PORTO*, P. 6 PP. VOL.4-. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/PTC.2001.964827](https://doi.org/10.1109/PTC.2001.964827)
- SU, C.-L., 2005. PROBABILISTIC LOAD-FLOW COMPUTATION USING POINT ESTIMATE METHOD. *IEEE TRANS. POWER SYST.* 20, 1843–1851. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/TPWRS.2005.857921](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.857921)
- WEIBULL, W., 1951. A STATISTICAL DISTRIBUTION FUNCTION OF WIDE APPLICABILITY. *J. APPL. MECH.* 18, 293–297.
- XIAO, Q., HE, Y., CHEN, K., YANG, Y., LU, Y., 2017. POINT ESTIMATE METHOD BASED ON UNIVARIATE DIMENSION REDUCTION MODEL FOR PROBABILISTIC POWER FLOW COMPUTATION. *IET GENER. TRANSM. DISTRIB.* 11, 3522–3531. [HTTPS://DOI.ORG/10.1049/IET-GTD.2017.0023](https://doi.org/10.1049/IET-GTD.2017.0023)
- ZHU, X., LIU, C., SU, C., LIU, J., 2020. LEARNING-BASED PROBABILISTIC POWER FLOW CALCULATION CONSIDERING THE CORRELATION AMONG MULTIPLE WIND FARMS. *IEEE ACCESS* 8, 136782–136793. [HTTPS://DOI.ORG/10.1109/ACCESS.2020.3011511](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3011511)



A philosophical look at mathematics and related sciences from the beginning to the future

Elmar Wagner

Para citar este artículo: Wagner, E. 2022. A philosophical look at mathematics and related sciences from the beginning to the future. Ciencia Nicolaita, número 83, 200-231. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.578>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

A philosophical look at mathematics and related sciences from the beginning to the future

Elmar Wagner

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Física y Matemáticas

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 24 de septiembre de 2021

Aceptado: 28 de octubre de 2021

RESUMEN

Se presentan hitos históricos de las ciencias matemáticas y sus consecuencias filosóficas de manera generalmente comprensible y en parte especulativa siguiendo los logros de famosos protagonistas. De la observación del pasado, se deduce una conjetura para el futuro.

PALABRAS CLAVE: Filosofía de la ciencia, historia de las matemáticas, inteligencia artificial, aprendizaje de máquina.

ABSTRACT

Landmarks in mathematical sciences and its philosophical consequences are presented in a generally understandable and partly speculative way by following the achievements of famous protagonists. From observing the past, a conjecture for the future is deduced.

KEYWORDS: Philosophy of science, history of mathematics, artificial intelligence, machine learning.

Introducción

Following a subjectively selected compilation of historical landmarks, I will describe my point of view of mathematics and related sciences from the past to the present, drawing conclusions on the way and focusing not only on the results, but also on the motivations and convictions of the protagonists, in order to support a conjecture for the future. The stories that I have heard from rumors, I checked in the internet^{1,2} Some parts of the work were inspired by the 23 mathematical challenges of the London Institute of Mathematical Science³. For further discussion, everybody is welcome to contact the author.

The Past

Mathematics is one of the oldest sciences. It started with counting, as we can still see on our unfortunate number system with base ten - ten fingers - or twenty, in the case of the Maya. If our ancestors had chosen 2 as base, our kids would have to learn only $3 = \frac{3 \times 2}{2}$ operations instead of $55 = \frac{11 \times 10}{2}$ and we could count with our fingers up to $1023 = 2^{10} - 1$. Our curiosity for other sciences also started at early ages, for instance chemistry (starting a fire), biology (planting a seed to multiply it after a few months), physics (throwing a stone to hit an enemy), medicine (taking a plant to ease the pain), astronomy (observing the sun, the moon and the stars), and so on. It seems that all started with experimental science by observing and performing experiments (e.g. throwing stones repeatedly at a fixed target), all but mathematics, which used abstraction at an early stage, replacing for instance equivalent

finite sets by numbers, ignoring all properties of the elements and just assigning the same word for all finite sets with the same number of elements. It was probably the first science that solved problems in a completely mental way: If I get one pot for ten apples, how many apples do I need for three pots? It also was the first science that could predict the non-immediate future of human life in non-periodic events: If I need one bag of food to survive, then my family of 5 will need five bags. Predicting the future is still a major interest of mankind, it is of such an enormous interest that fortune telling survived until our modern society.

The beginning of modern mathematics can be dated back to the flourishing of cities in Mesopotamia, India, China, and Egypt, when trading was essential and mathematics thus necessary. A similar development can be observed in the cities of the ancient civilizations of the Americas, where, apart from commerce, mathematics was used intensely in astronomical calculations. However, this report will mainly focus on the development in Eurasia because the base of modern mathematics was set there.

With the emergence of consciousness, other non-essential questions arose, for instance: Who am I? Where do I come from? Where will I go to? Unfortunately, our brain gets troubled with questions that it can't answer, so answers were given without knowing the facts. That's how religion took over and there, where religion was coupled with power, the answers to these questions became dogmas and contradictory answers were not allowed. Fear was used to manipulate people, which still works as one can see in any election battle (fear of economic loss, fear of immigrants, fear of a virus or a vaccine, etc.). As a consequence, religion turned

into the greatest obstacle to science. Thus, a further rapid progress of science demanded a separation of believing and thinking. That was the period when philosophy arose to become the major force for acquiring human knowledge.

Interestingly, the early Greek philosophers like Thales of Miletus, Pythagoras and Euclid did not distinguish between mathematics and philosophy, mathematics was simply a part of philosophy and both disciplines posed such seemingly useless questions as “What happens after death?” or “Is the square root of 2 a rational number?” Mathematics served as an inspiration for truth (in the sense of proving statements) and deductive reasoning. From that time on, mathematics has been a permanent companion of science and philosophy. On the other hand, mathematicians started to ask their own questions without any relation to other sciences, for instance the search of Pythagorean triples, that is, three natural numbers a , b and c satisfying $a^2 + b^2 = c^2$. There is no immediate use of such knowledge apart from giving exercises to the students, which they can solve without a calculator.

As the mathematical knowledge and the number of mathematical texts grew, mathematics as a science was only accessible to a few specialist and highly educated people. At least, that's what happened in Ancient Greece, where the first Academies were founded. But the Greeks were conquered by the Romans who showed little esteem toward mathematics as one can still see in the cumbersome Roman number system. When the Roman Empire decayed and the church became powerful, science had to be in line with the official opinion and any discovery, which contradicted the belief system, was forbidden and sometimes even punished. Pure mathematics is not

subjected to belief, so one can actually say that mathematics was among the sciences that were least affected during the dark Middle Ages within the territory of the former Western Roman Empire. Curiously it was the monks in the monasteries, i.e. the church, who continued to study mathematics. During these times, the Arabs, Chinese and Indians did better. Not without reason comes the word Algebra from an Arabic language. It is said that the Indians discovered the abstract concept of 0, in other words, the empty set. Without 0, mathematics could never have achieved its present potential. The Muslims brought this knowledge to Europe by trading and conquering, after all, the Spanish had plenty of contact with the Islamic world, although it was not always fortunate.

As another curiosity, mathematics found its way to astronomy and cosmology through a discipline, which is not considered a science: astrology. The belief in astrology was so strong that kings and maharajas financed their own observatories so that an astronomer could predict the position of planets and all other moving celestial bodies. Every once in a while, the same person turned into an astrologer and told the ruler some nonsense about his fortune that nobody knew, not even the astrologer.

Ironically, mathematics disguised as physics started to refute (religious) beliefs. It may be doubted that Kepler didn't know about the earth orbiting around the sun. Kepler concluded his laws of planetary motion by studying the trajectories of the planets and the sun using observations done by Tycho Brahe. One doesn't observe perfect ellipses along the trajectories unless one considers also an elliptic orbit of the earth around the sun and eliminates the movement caused by the moving earth (epicycles). When Copernicus' books were banned, he didn't de-

defend the truth, probably life had more value for him than science. Galilei had a shot but also preferred not to test torture. Though there was a mathematical physicist and philosopher who stood by his knowledge until his cruel end by being burnt for heresy: Giordano Bruno. Any reader may take a minute and think about it if (s)he would march in such a cruel death to defend the truth. This certainly shows that there were difficult times for science in Europe.

Who could challenge such a rigid belief system? Pure mathematics couldn't because there was no mathematics in the belief system, so there was nothing in it to be challenged by mathematics. Quite the contrary, René Descartes in the 17th century and Kurt Gödel in the 20th century proved the existence of god. Both versions depend on the definition of god and Gödel's proof on some axioms⁴. Accepting a few axioms is something that all contemporary mathematicians have to do. If someone insists on not doing anything that involves a belief, mathematics doesn't develop its full potential. In mathematical terms, the existence of god is as true as is mathematics, one only has to accept the definitions and axioms, and to understand the proof. Gödel, who may be considered the greatest genius in logic of all times, never published his result because he feared the answer of the church and its devotees.

Descartes is also known for creating analytical geometry by linking geometry and algebra. That is another source of powerful mathematics, combining different disciplines, which were developed separately. In fact, the only reason for dividing mathematics in different disciplines is for learning, but for applying mathematics, it is much better to have all disciplines in mind and to apply and combine whatever fits best.

To answer the above question, the philosophers did it. For a second time, the

philosophers had to be the vanguards of progress. Questions like "What is truth?" were difficult to prohibit and the answers often embarrassing for the church. Religion sought to mold the thinking of its adherents, but could not control all of them. So it was basically only a question of time when the church was challenged again. Fortunately, it was the humanists who promoted, together with their humanistic ideas, the interest in truth, science and progress. Even though the universe will never be completely understood, there is belief and there is evidence, and objective evidence can be crushing. On the other hand, there are things that nobody knows and everyone who says otherwise lies. For instance, Kurt Gödel's incompleteness theorems show, roughly speaking, that we will never know, nor be able to prove, that mathematics, the most basic of all sciences, is true. This raises the question if any science is true and the answer is, of course, no. Any model is only an approximation of what we call (and have to agree upon) "reality". It will keep legions of scientists busy in the future to improve the models and to find new ones.

When the philosophers changed the rules of thinking, all sciences began to flourish and so did mathematics. Physics provided such an immense number of open questions that mathematics became principally mathematical physics, apart from special interests like probability and statistics (which are good for gambling) and the omnipresent disciplines like algebra, number theory and combinatorics. Before publishing in journals became popular, mathematicians exchanged letters about concrete and abstract problems and competed in solving them. Sometimes they even preferred to keep formulas secret so that they could win more easily in competitions such as: Who can solve more cubic equations? Interestingly, a new level of ab-

⁴(Benzmüller and Woltzenlogel-Paleo 2014)

⁵(Gödel 1931)

straction entered the game because those were the most successful who reached the highest level of abstraction. Maybe it needed such a strange character as Gerolamo Cardano, a gambler who believed in astrology, to destroy a century-old belief system of the European mathematicians, namely that there are no negative numbers. Even more, he made use of the square root of negative numbers, coined “imaginary numbers” by René Descartes, although these numbers are as real as points on a vertical axis in a 2-dimensional plane. Grasping negative numbers means understanding that there is “less than nothing” or “another direction”. Adding a positive number to a negative number of equal amount yields nothing, which nowadays isn’t more difficult to understand than repaying a debt or walking back to the starting point. Combining “real” and “imaginary” numbers into complex numbers requires only to step up from 1-dimensional thinking to 2-dimensional thinking, and creates the most powerful number system which only lacks the possibility to compare two numbers by their size. The use of the words “real” and “imaginary” reflects a conflict that faced the most brilliant mathematicians of this time: Is mathematics real or does it necessarily involve non-real objects created only by the human mind? At present, mathematicians study spaces of any dimension, even of infinite dimension, without ever questioning if these spaces exist in the real world.

A genuine revolution in science, often left unmentioned in general history books, occurred in the late 17th century when Newton and Leibniz discovered differential calculus. Differential calculus tells us that the values given at a certain moment of time, the local changes around us, together with the changes at the smallest possible

(i.e. infinitesimal) time steps, determine completely the future of a dynamical system. Mathematically it says that we can reconstruct a function from the knowledge of its changes by integration, which is the inverse process of differentiation. In a contemporary language, it amounts to solving differential equations. Leibniz developed differential calculus in a notation that we still use today. Newton used his discovery to formulate the laws of mechanics, defining in that way what we call “force”, and applied his theory to explain the trajectories of falling apples, cannon balls, and the planets around the sun.

It is the nature of our existence that we can measure “locally” the observables around us, and thus determine its changes, and that we postulate that the laws of nature remain the same under equal conditions. For these reasons, differential equations became the predominant equations of physics. Their use in predicting the future - one of mankind’s greatest longings - was so successful that, more than a century later, physicists debated about the so-called “Laplace’s demon”. That is, if all forces, all particle positions and their momentums at a certain moment are known (to a demon), then the whole future of the universe will be determined (be known by the demon). Obviously, this rules out the existence of free will. This purely mechanical view of the universe ignores that our brain activity is based on thermodynamic and electrodynamic processes, and that the information processing in our brain relies on patterns, not on exact physical states. The latter, for instance, makes us see a smiling face when looking at a circle with two dots and a small arc, and the former creates a conflict with Boltzmann’s second law of thermodynamics, which gives time a direction.

The simultaneous discovery of differential calculus exposed that scientific progress is

not always driven by the quest of knowledge alone, but also by pride, fame and rivalry. Already Cardano disputed with Niccolò Fontana Tartaglia about who has to be credited for finding the solution of the cubic equation. In the matter of differential calculus, Leibniz was accused of having plagiarized from Newton. The Royal Society of London installed a committee to investigate the case. The committee ruled that - what a surprise - Newton, who coincidentally was the president of the Royal Society at that time, had first invented calculus. Even geniuses like Newton are humans after all.

In the following decades, the Bernoulli family dominated the research in mathematics and physics, perhaps the most influential family in science. They were excellent masters in solving very specific problems analytically, often challenging each other. Such calculation skills are hard to find nowadays since it is now faster and easier to get an approximate solution by a computer. Geniuses and humans like Newton, their enormous output of results was fueled by rivalry and jealousy, even among family members.

From the Bernoulli family descended the greatest mathematician of the 18th century, not as a family member but as a student: Leonard Euler. He made groundbreaking contributions to almost all branches of contemporary mathematics at that time. For instances, with his famous problem to find a way in Königsberg which crosses each of its seven bridges only once, he initiated graph theory, and with the observation of the invariance of the number $\chi := \# \text{vertices} - \# \text{edges} + \# \text{faces}$ for Platonic solids, he started the study of topological invariants even before the concept of a topological space had been defined. His analytical reasoning for problem solving established the fundamentals of modern mathematics. Much of his mathe-

matical language is still in use today and, as known from psychology and philosophy, language influences our thinking. “Die Geisel”, female in German, is called “el rehén” in Spanish, a male word. This will influence how German and Spanish people think about a hostage even if they describe the meaning with the same words.

Euler was the most prolific mathematician of his time, no serious disputes with his fellow mathematicians are known and his dedication to mathematics was so strong that not even losing his eyesight lowered his productivity. It is reassuring to conclude that the most influential mathematicians are not necessarily driven by rivalry and jealousy, but a genuine interest in the progress of mathematics.

Euler is credited for the potentially most beautiful formula in mathematics:

$$1 + e^{i\pi} = 0$$

This formula contains two indispensable transcendental constants: the number π , which is ubiquitous for describing anything related to circles, spheres and rotations, and Euler’s number e , the natural base for exponential functions. The effects of exponential growth can be seen for instance in the spread of a virus at the beginning of a pandemic, and it also explains why evolution works and can be so diverse. Evolution is not just “survival of the fittest”, it is first and foremost diversity in huge numbers before evolutionary pressure drives the average in one or another of the countless directions. To put it plainly, human intelligence is a result of exponential growth.

However, Euler’s formula has a small imperfection. Unfortunately, Euler denoted by π the ratio of a circle’s circumference to its diameter, but a circle is conceptually better characterized by choosing the center and a *single* point on its circumference, so the ra-

dus is a more natural parameter. In particular, a full rotation corresponds $\Pi := 2\pi$. With Π as the characteristic number of a circle, Euler's formula becomes

$$1 + e^{i\Pi/2} = 0$$

Now, apart from the famous transcendental constants, the formula contains the basic numbers $0, 1, i = \sqrt{-1}$ and also 2, thus all we need for our most complete number system. With 2 as a base, we can express any real number as a combination of 0s and 1s, and adding another direction by $i = \sqrt{-1}$, we obtain the powerful complex number system, where any polynomial equation has a solution and no point of the plane is missing. It seems that mathematics is a very conservative science, we will never see in our life the practical redefinition of

$\Pi := 2\pi = \text{one full rotation} = \text{one period of sine and cosine,}$

and we will never teach our kids in kindergarten the simple binary number system although all our computers use it. Humans don't like changes of what they got used to.

There is one thing that Euler seemed to have understood thoroughly, but never defined precisely: *infinity*. The Greeks discussed already the infinite large, the infinite small was used by Newton and Leibniz and their successors (for instance by Euler), but the rigorous handling of the infinite started with Cauchy, a trained engineer with a strong interest in mathematics and the founder of complex analysis. There are so many theorems named after Cauchy that no graduated math student will ever forget his name. Undergraduate students become so familiar with Cauchy's definition of the infinite small that, when suddenly woken up at night and asked "How big is epsilon?", they will almost certainly answer "It's small!" (it

can be smaller than any positive real number). Cauchy may have produced even more theorems if he wouldn't have had such strong conservative political opinions that complicated his life. Sometimes science is an obstacle for (despotic) politics, sometimes political beliefs are an obstacle for science.

Without the infinite, mathematics would be a science of rules and logic but without tools. With the correct understanding of the infinite, the infinitely small and the infinitely large, progress in mathematics exploded in the second half of the 19th century, again with an enormous input from physics. Old problems like Laplace's, Poisson's, wave and heat equations could be studied in a new light and on a solid foundation by the use of Fourier's trigonometric series and integral transformations, later called harmonic analysis. Analysis separated from algebra, and new areas like topology and set theory evolved at a fast pace. Interestingly, until the 20th century, mathematicians were not able to state properly what the notion *set* means. As the mathematical knowledge grew, specialization and division into different disciplines increased. I will return to this later.

Much of the rigorous groundbreaking work was done in the first half of the 19th century by Carl Friedrich Gauss, who may be considered as the greatest mathematician of all time, although he had an obscure spartan writing and teaching style that was difficult to understand and much hated by students. Not always is the best scientist also the best teacher. Famous already during lifetime, his pursuit of knowledge was not driven by fame or rivalry but the desire of understanding a (mathematical) problem deeply and completely. An indication of this is that Gauss left many pioneering discoveries unpublished because he considered them incomplete although the

latter led to priority disputes.

One of these disputes concerned non-Euclidean geometry. Gauss claimed to have discovered non-Euclidean geometry before Lobachevsky⁶ and Bolyai⁷ but never published any result in his lifetime. Maybe he considered his treatise incomplete, maybe he feared the reaction of his colleagues because the discovery of non-Euclidean geometry challenged the common perception that Euclidean space is the only valid geometry. It also questioned the necessity and validity of axioms (e.g. Euclid's parallel postulate), and raised concerns that human perception leads to unnecessary postulates or that missing postulates lead to mathematical theories that cannot be considered true. Non-Euclidean geometries are intimately related to curvature, an intrinsic measure of how a space bends and which is independent from an embedding into Euclidean space. Gauss described the curvature of surfaces in his famous *Theorema egregium*⁸, which implies for instance that one cannot draw a map of the earth on a sheet of paper without distortion. The Gauss-Bonnet theorem, which relates the integral of Gaussian curvature to the Euler characteristic χ defined above, can be considered as a precursor of one of the most celebrated theorems of the 20th century: the Atiyah-Singer index theorem⁹. Gauss' student Bernhard Riemann extended the notion of intrinsic curvature to spaces of any dimension¹⁰ and established in this way the geometric foundations of Einstein's general relativity¹¹. From the simple consideration that it is more likely that the universe is finite, it becomes more natural to view space-time as curved and not as Euclidean.

Another surprise in those times was the most famous "no-go theorem" in mathematics, arguably one of most difficult theorems that undergraduates have to learn and

seemingly too difficult for some of the best mathematicians in the first half of the 19th century because it took more than a decade to acknowledge that Évariste Galois solved a mathematical puzzle that had defied a solution for centuries¹². Almost 300 years before, Cardano published solutions of polynomial equations of degree 3 and 4 (lower degrees are easier). After many failed attempts, doubts emerged that there exists a formula for equations of degree 5 and higher, involving only algebraic operations and (higher-order) roots. It should be mentioned that Niels Henrik Abel¹³ proved the non-existence of a general formula 6 years before Galois submitted his work, but Galois created a whole new theory that allowed to decide when such a formula exists. Both were geniuses, because both solved hard problems at an early age. Sadly, both have in common that they died very young in their twenties. It is difficult to imagine what these brilliant minds would have contributed to mathematics in a normal lifespan. Abel died poor from tuberculosis working hard until his end. Galois had a rebellious mind, which often brought him into trouble and ultimately into a fatal duel, presumably because of a love affair. Foreshadowing his fate, he used the last night to write letters that preserved his mathematical legacy but not his life. Whatever his thoughts might have been in those hours, maybe it needed such a rebellious mind to think differently than the renowned mathematicians of that time.

Remarkably, Galois and Abel initiated by their work the breakthrough of a mathematical structure that has always and nearly unnoticed been around: group theory. Groups are the simplest structures where two elements can be combined in an associative way to a third one and where equations like $a \circ x = b$ can be solved for unknown x . For being so simple

⁶(Lobachevsky 1837)

⁷(Bolyai 1832)

⁸(Gauss 1828)

⁹(Atiyah and Singer 1968)

¹⁰(Riemann 1868)

¹¹(Einstein 1916)

¹²(Galois 1846)

¹³(Abel 1824)

and allowing to solve equations, groups are used nowadays to classify more complicated objects like manifolds (spheres, tori, projective spaces, etc.). Groups and symmetries are essentially the same thing, groups always act as symmetries (e.g. on itself) and a (complete) set of symmetry transformations always forms a group. Symmetries were already used by our ancestors before becoming humans, a perfectly symmetric fruit looks more beautiful than an asymmetric one and sends the correct message of having had better growing conditions and thus of being more nutritious. In the same vein, a mirror-symmetric mating partner looks healthier than an asymmetric one. What we call the beauty of a flower is a competition of attracting insects for reproduction, even such primitive brains like the one of an insect can perceive symmetry. The great mathematical physicist Hermann Weyl went so far to state that beauty *is* symmetry¹⁴. Whereas symmetry always signifies beauty, psychologists found out that a slight deviation from perfection attracts more attention, for instance in mating habits. It is the variation of genes that pushes evolution. Nevertheless, I would go so far to state that groups are the most beautiful objects in mathematics. Groups are as beautiful as a perfect circle (the group $U(1)$), as a perfectly round 3-sphere if you can imagine a sphere in 4 dimensions (the group $SU(2)$), or a perfect 2-sphere, which is not a group but on which acts the group $O(3)$ of orthogonal isometries of $\mathbb{R}^3$ (it is a homogeneous space).

Groups are today a principal tool in mathematics. They allow to make calculations only in a single point (for instance the Gauss curvature of the 2-sphere) and then to know what happens at any other place by moving the point around the space using an (isometric) group action. It is totally astonishing that their systematic study started less

than 200 years ago. Galois used permutation groups to study the symmetries of the roots of polynomials. Felix Klein was so excited about groups that he started the Erlangen program in 1872, a program of classifying geometries by group actions. Sophus Lie combined group theory and differential calculus to eliminate unnecessary parameters in differential equations, much in the same way as Kepler's laws are used to reduce the parameter space of planetary orbits, and thereby created the vast field of Lie groups and Lie algebras. The classifications of semi-simple complex Lie algebras by Élie Cartan¹⁵ in his PhD thesis, and of all finite simple groups by many contributors, were major achievements in the last 130 years. Here, "simple" means "building blocks" of more complicated structures. That's the way mathematicians think, once they have discovered an important structure, they want to know all possible objects (up to equivalence) and that will keep them busy for centuries. As alluded above, understanding groups is a good starting point for such programs.

In physics, the standard model is based on the Lie groups $U(1)$, $SU(2)$ and $SU(3)$. Mathematicians call this model Yang-Mills theory and can win a one million dollar prize from Clay Institute of Mathematics¹⁶ if they prove its last mysteries like the mass gap. Einstein's special relativity¹⁷ is essentially the theory of isometrical group actions on Minkowski space. This was already known to Lorentz, who observed that Maxwell's equations of electrodynamics are invariant under these transformations, but it is to due Einstein's $E = mc^2$ draw the right conclusions like the twin paradox, which isn't a paradox at all, it just violates human's perception of an absolute time. The twin paradox allows particles to reach our planet, which have a lifetime less than the time that light needs to travel from the sun to the earth.

¹⁴(Weyl 1952)¹⁵(Cartan 1894)¹⁶([3])¹⁷(Einstein, Zur Elektrodynamik bewegter Körper 1905)

With his unique thinking and the shattering of human's perception of an absolute time, Einstein became the first pop icon of science. Young folks scribbled the formula on city walls, possibly without understanding it or because of the joy of understanding it. Indeed, understanding something awesome can be quite exiting. A paparazzi photo of him with his tongue sticking out went viral before social media existed. Legends were constructed around him like the one that he failed mathematics at high school. Probably a German saw his school certificate without knowing that the Swiss used an opposite number system compared to Germany, where the lowest number 1 corresponds to the best mark. These details don't matter if ordinary people can find delight in failures of pop stars and reassure themselves that geniuses are just like them, which they are not.

Having reached Einstein, it would be much too much to mention all geniuses of mathematics and mathematical physics in this exposition, so I will have to restrict myself to just a few ones. First of all, it is rather unavoidable to mention two senior contemporaries of Einstein: Henri Poincaré and David Hilbert. What they have in common is that both can be considered the last universal geniuses of mathematics in the sense that they contributed profoundly to almost all the important mathematical disciplines of their time and established new ones. From this perspective, they were on an equal footing with Euler and Gauss. After that, mathematics became too diverse to be grasped by a single human mind.

Poincaré got famous for many discoveries, and also for a problem that he didn't solve but only conjectured, the famous Poincaré conjecture. Roughly speaking, it says that the usual topological invariants ("number of holes") are enough to characterize a sphere, where the

3-sphere resisted a proof for a long time. For mathematicians, it is a very important question because if it had a negative answer, they would have to look for more topological invariants making the classification of topological spaces more difficult. The Clay Institute of Mathematics considered this problem so important that they included it into their seven Millennium Prize Problems and offered one million dollars for a solution.

In physics, Poincaré discovered that the Lorentz transformations form a group that leaves Maxwell's equations of classical electromagnetism covariant, i.e., they transform in the right way. (Having mentioned the "most beautiful equation of mathematics", I vote for calling Maxwell's equations the most beautiful equations of physics.) Thus, Poincaré had all pieces of special relativity together but there was one piece too much rather than missing, he couldn't abandon his belief in an aether theory, that is, a space-filling substance for the transmission of light. It needed a radical mind like Einstein's to draw the right conclusions. In this example we can see again how belief disturbs the progress of science, even more if the believer is a well-respected scientist. Being an intuitionist, Poincaré was also a master of "as easily seen", a bad habit of mathematicians to cut lengthy and possibly difficult proofs down by disparaging the reader's knowledge: "Can't you see? It's easy!" For math students, it may be the most annoying phrase.

These remarks do not downgrade Poincaré's ethical standards. He participated in a competition for a prize awarded by the Swedish king about the stability of the planetary system. Poincaré reduced the problem to a three-body problem with one of small mass¹⁸. Yet his submission was too difficult to understand even for the jury although nobody had doubts about the quality of Poincaré's work. Poincaré was awarded the prize

¹⁸(Poincaré 1890)

but when an editor asked some critical questions, he found a mistake in his treatise, which flipped the result from stability to a possible instability. He was asked to correct the error and to buy back all published copies, which he did, although it was quite a bit more expensive than the prize money. So truth, or his reputation, mattered more to him than money. By correcting his error, he initiated a new mathematical discipline called chaos theory, commonly described as the “butterfly effect”. It may be noted that even highly qualified referees cannot guarantee the correctness of a difficult paper. Let’s hope that our main theorems don’t contain mistakes!

Besides, Poincaré’s work casts doubts on the Laplace demon. What happens if the demon is slightly wrong about the initial conditions? Then the butterfly effect tells us that the nonlinearity of the problem can cause huge changes in the outcome, which makes the prediction of the future an extremely difficult task.

Pretty much in the same way as Poincaré’s work relates to Einstein’s special relativity, Hilbert’s work relates to Einstein’s general relativity. Almost simultaneously with Einstein, he proposed an action principle leading to curved space-time¹⁹. Being a role model of a scientist, Hilbert never engaged in a priority dispute and voluntarily granted all credits for the discovery of general relativity to Einstein. One might speculate that Hilbert was famous enough and didn’t need more fame, but so was Newton when he disputed with Leibniz.

There is a huge difference between Poincaré’s and Hilbert’s style of doing mathematics. Poincaré focused on insights and comprehension in an intuitive way. In his preference of intuition over logic, he appears to be rather a physicist than a mathematician. Hilbert, on the other hand, pursued an axiomatization and rigorous foundation of mathematics on

the basis of logic. A simple paradox, known as Russell’s paradox, plunged mathematics into crisis. The paradox asks for the set of all sets that don’t contain themselves and showed that a naïve understanding of sets is not enough for mathematics. To solve the paradox, one needs a rigorous definition of the concept set. Some mathematicians like Brouwer decided not to use concepts that cannot be constructed in a proper way, and that a mathematical statement is true as long as it doesn’t create a contradiction. Therefore, nothing that creates a contradiction should be constructed, like the set of all sets that don’t contain themselves.

Hilbert’s approach was to set up a complete system of axioms and rules, which is free of contradictions and from which all results in mathematics can be deduced. Gödel’s incompleteness theorem mentioned above showed that Hilbert’s goal can never be achieved. Nowadays most mathematicians accept Zermelo–Fraenkel set theory with the axiom of choice. Nevertheless, Hilbert’s attempt had such an enormous impact that his style prevails in modern mathematics (and Poincaré’s style still in physics).

Hilbert was a genius with such an astonishing comprehension of mathematics that he shaped the mathematics of the last century with a single talk at the International Congress of Mathematicians in 1900 and the posterior publication about it²⁰. Hilbert proposed 23 problems covering a wide range of topics in which he clearly prioritized his axiomatic approach. Some of these problems are still unresolved. One of these problems, the Riemann hypothesis, even made it into the seven Millennium Prize Problems with a prize money of one million dollars. Never again has a single mathematician had such an exhaustive vision about mathematics.

A genius with an understanding of a wide range of mathematical and physical

¹⁹(Hilbert 1915)

²⁰(Hilbert 1900)

disciplines (almost all, but mathematics developed during his lifetime in too many directions to be followed by a single human mind at top level) was John von Neumann. His impact on mathematics is comparable with Poincaré and Hilbert in terms of creating and boosting new theories. John von Neumann participated in two scientific revolutions that haven't been mentioned yet: statistical physics and quantum mechanics, both developed around the turn of the twentieth century. John von Neumann contributed substantially to the mathematical foundations of these theories. For both theories, he used a reformulation in terms of operators on a Hilbert space. As the name suggests, Hilbert started to study these objects and even used the name spectrum for a set of (real) complex numbers that characterize (self-adjoint) operators on a Hilbert space. It is not known if Hilbert was aware that these numbers would later become identified with the outcome of possible physical measurements like the *spectrum of light*.

Statistical mechanics, which explains the existence of irreversible processes, was developed by Ludwig Boltzmann ²¹. It roughly says that it is not impossible that a system returns to its initial state but usually the probability is extremely small. For this, Boltzmann introduced the concept of entropy that “measures” the disorder, and isolated systems tend to increase their disorder. To put it simply, it is more likely to find the system in a state that is more likely. Statistical mechanics also provides a mathematical definition of temperature, which is quite different from just feeling cold or hot; and a direction of time, it is the direction in which the entropy increases, and statistically the entropy “always” increases. Of course, the entropy can decrease locally, which means that the order increases, otherwise our brain could not exist, but it is at the cost of global disorder, that's why we need

to supply our brain with energy to keep it functioning. Small particles like electrons and protons prefer order, an electron enjoys being captured by a proton. It is a more stable state of lower energy and stable states last longer. Provided that certain states are longer stable at the cost of an increase in total entropy, it will be even more favorable for the second law of thermodynamics. As long as specific organic compounds, cells, organisms, brains, etc. owe their existence to an energy flux that increases the total entropy, there is no contradiction to the second law of thermodynamics. For the existence of life, it needs a driving force, the increase of stable states by replication, again by an energy exchange that rises the total entropy. Replication, or let's say reproduction, summarizes pretty well the purpose of life. If you need more purposes, you have to give your life some more.

The existence of (intelligent) life is no contradiction to the second law of thermodynamics, it started with a fluctuation within an inconceivable huge number of possibilities and evolved as a self-reinforcing process. The mathematics to deal with such huge numbers of possibilities, with chaos, non-linearity, emergent structures and internal self-reinforcing processes, are studied under the name complex systems. It is still an emergent discipline and a promising research area for winning a Nobel Prize since the evolution of life, the global economy and the behavior of societies can be modeled by complex systems. Life is not a mystery, the mathematics behind life is the mystery.

Statistical mechanics was a true revolution. Scientists of Boltzmann's era weren't even sure whether atoms existed. After the success of Newton's mechanics, physicists began to believe in Newton's mechanics like in a dogma. However, it is invariant under time reversal, whereas Boltzmann showed the existence of

²¹(Boltzmann 1877)

a direction of time. The problem seems not to have been that this was too difficult to understand, the dilemma was the obvious fact that Boltzmann's law couldn't be deduced from Newton's mechanics alone, so Newton's mechanics could not be considered complete. This provoked a major crisis in physics, much worse than the crisis in mathematics when logicians understood that mathematics needs to be founded on axioms but can never be proven to be true. For the understanding of the physical world, the need of mathematical

axioms didn't mean much as long as the models work (for instance quantum field theory is still not founded on rigorous mathematics), but Boltzmann showed that mankind was far from understanding everything because if there is one more law that nobody knew, then nobody knows how many laws are missing. Even Nobel Prize winner Ostwald (in chemistry!) refused to accept the theory of atoms. Unfortunately the criticism from some colleagues may have contributed to Boltzmann's deteriorating mental health and to his tragic death, he did not live to see the victory of his ideas. Statistically, geniuses have mental health issues as often as ordinary people unless otherwise proven.

John von Neumann gave a novel description of entropy by combining it with the other mentioned scientific revolution: quantum mechanics. Before quantum mechanics, Newton's mechanics described the dynamics of massive particles and Maxwell's equation described electromagnetic waves. In particular, there was an obvious difference between particles and waves. However, the newly discovered photoelectric effect, i.e. the emission of electrons caused by light of certain frequencies, could not be explained by a wave theory. As Boltzmann suggested years before, Max Planck hypothesized that energy states can be discrete and resolved in that way the diver-

gence problem in computing the spectrum of black-body radiation ²². Einstein, in his unique way, postulated that the quantization of all electromagnetic radiation is not just a mere computational tool but an actual fact of nature, i.e. light travels in particle-like packages, and explained thus successfully the photoelectric effect ²³. For this discovery, Einstein was awarded the Nobel Prize in Physics – and not for his revolutionary relativity theory. Anyway, he didn't need two Nobel Prizes to be remembered as a genius.

Louis de Broglie picked up the idea of wave-particle duality in his PhD thesis, postulating that all particles have wave-like properties ²⁴. His hypothesis was later confirmed in diffraction experiments with electrons. For his PhD thesis, de Broglie won the Nobel Prize.

There aren't many PhD theses worth a Nobel Prize, and I am afraid that some universities would have rejected such a daring thesis as nonsense. For physicists, it was quite a challenging hypothesis that matter behaves as particles *and* waves, but for mathematicians, it should be of less concern, particles and waves are just *two mathematical models*, i.e. theoretical approximations, for the *same* objects. Anyway, if some student strives to win a Nobel Prize for her/his PhD thesis, (s)he may try to find a unifying picture for the so-called wave-particle duality. My naïve suggestion would be to study sections of vector bundles.

These sections behave like *wave function*, may look very harmonic on nice spaces, come with a discrete set of topological (quantum) numbers, may have a singularity (a kind of vortex) at a single *point* (that could be blown up to a manifold), and the idea fits into a previously mentioned one million dollar prize problem from the Clay Institute of Mathematics, so it is actually not a completely new proposal. Of course, to win the Nobel Prize, (s)he has to make verifiable predictions that are

²² (Planck 1901)

²³ (Einstein, Erzeugung und Verwandlung des Lichtes 1905)

²⁴ (de Broglie 1925)

²⁵ (Schrödinger 1926)

and are studying its properties and solutions until now. In 1925, the physicist Werner Heisenberg, who was rudely rejected to study mathematics at the University of Munich for his interest in mathematical physics, spent some time in scientific isolation at an island in the North Sea to recover from an allergic rhinitis. Having had time to think about physics, he tried to find a formula to calculate the spectral lines of hydrogen. To match observable results, he departed from a new approach, considering *differences* (instead of absolute values) of frequencies and intensities of spectral lines. Summing these differences up in a certain way, he obtained a correct result. When he presented his formula to Max Born (who had studied mathematics under Hilbert and Klein), Born realized that this certain way of summation was nothing else than matrix multiplication. Together (with Pascual Jordan) they formulated the so-called matrix mechanics ²⁶ in contrast to Schrödinger's wave mechanics. These are apparently quite different theories. In Schrödinger's theory, the wave functions evolve with time; in Heisenberg's theory, the matrix operators depend on time. For the sake of completeness, all scientists mentioned in this paragraph and not written in parenthesis won the Nobel Prize in Physics.

The fact that matrices usually don't commute had a surprising implication: the corresponding observables cannot be measured (= known) simultaneously with arbitrarily high accuracy. This is called Heisenberg's uncertainty principle. Heisenberg's uncertainty principle for position and momentum together with the probability interpretation of Schrödinger's wave mechanics were the final blow for the Laplace demon, although Einstein wanted to save the demon with a hidden variable theory. It is interesting to note that Einstein, who revolutionized phy-

sics and shattered preconceived notions by radical interpretations of the physical reality, became a victim of his own beliefs and objected the probability interpretation of quantum mechanics without proper evidence (he only presented his famous thought experiments). A scientist, no matter how successful, should never stick to personal beliefs, but unconsciously will always do so.

It's curious, I don't know anybody who believes that Riemann's hypothesis is wrong, and I don't know anybody who states that it is a fact.

The demise of determinism opens the door to free will. But what is free will? If you think that either there exists free will or it doesn't, then you are probably mistaken. It is not that simple, at least if you believe in causality. Did you ever ask yourself if a computer with a couple of simple programs running on it has free will? If you did, then you probably have answered yourself "no", it has no free will, like any other machine running on pre-installed programs. The most primitive life-forms were programmed by Mother Nature to do the "right" thing – Escape! From the enemy. Eat! What is nourishing. Sleep! In a safe place. – because Mother Nature punished the opposite behavior (the "wrong" thing) with extinction, that's natural selection. These life-forms have only instincts because they were programmed to do always the same thing in a specific situation.

But what happened, when there were two stimuli at the same time? If both responses at the same time aren't possible, there is a need to decide. At first, the chance to do one or the other action may be exactly 50:50, i.e. 0.5 in terms of a probability measure. In other words, to make randomly a decision between two choices with the same probability requires exactly 0 free will. If you *absolutely* don't care about coffee or tea, no matter what you

²⁶(Heisenberg et al. 1926)

had last time or smell first, your decision doesn't need any free will. You may even have made a decision before you know it (Libet experiment). However if you *absolutely* don't care about toxic and non-toxic berries, then Mother Nature may punish you with extinction. To increase the chances for the survivors to survive, Mother Nature will have to store information in them, for instance by bitter and sweet taste (fear/pleasure, pain/joy, etc.), so that toxic berries get rejected by instinct. If you nevertheless eat the bitter berries contrary to your instinct and without a need, for instance to test if they are toxic, then you exercise free will, very likely not total free will because there is causality, and you probably had a motivation (i.e. expected benefit) to do so. Instinct evolved step by step by evolution, and so did its opposite: "free" will together with consciousness. Before the emergence consciousness, emotions ruled our behavior, and for some people, they still do.

This raises the question of what is consciousness. As our brain works on the basis of electromagnetic, thermodynamical and chemical processes, I have already answered the question. Mathematically, consciousness is nothing else than information processing of statistical and self-organizing complex systems together with feedback and control. To keep a long story short, the mathematical foundations for a model approximating consciousness do already exist, but they are too complex to give an answer now, there will be a lot of research about it in the future.

To *each* decision, there can be assigned a number between -1 and 1 that represents the amount of free will. It is roughly given by $1-2p$, where p denotes the probability to do it by instinct. So -1 means pure instinct like pulling the hand away when touching burning coal, and 0 free will means a completely random decision between two options with

the same probability. A free will of 1 is difficult to achieve because there is causality and there are motivations based on previous experiences, involuntary emotions or learnt instincts. Being voluntarily crucified to live up to one's own words regardless of the torture that accompanies the death by crucifixion is pretty close to a free will of 1, as is starving oneself nearly to death on the quest of truth.

However, how we experience free will is a different question. Now you may ask yourself: Where does "free" will come from? May I ask you a different question? Did you ever read this text before, I mean exactly the same text written by another person? Mind can create new thoughts by combining available information in novel ways. The more information is available and linked in the brain, the more combinations are possible, that's why nobody can become a genius without learning. Thoughts allow decision-making based on experiences and knowledge, and to make a decision opposite to your instinct, you must have had thought about it. Furthermore, it requires an understanding of past, present, future and causality. "If it rains tomorrow, I will stay at home." *If* = a conditional clause, *it rains* = a possible future event, *stay at home* = a decision based on emotions (I don't like rain) or past experiences (it will be too cold for swimming). "Free" will manifests in decisions made in the past for events that occur in the future. Immediate spontaneous reactions are not free will, they are called reflexes.

Let's return to quantum mechanics. Having two reasonably correct theories for the same phenomena – Schrödinger's partial differential equations and Heisenberg's matrix mechanics – can have two causes. Either both are different approximations of a not yet completely understood physical principle, or both are the same theory in different languages. That's where John von Neumann entered the

That's where John von Neumann entered the game. He used a theorem by Stone and proved the uniqueness of Schrödinger's operators ²⁷, which shows that Heisenberg's matrices and Schrödinger's operators are essentially the same objects in different descriptions. What I find astonishing is not the proof, what astonishes me is that he had the insight to prove that two utterly different looking theories are the same.

When von Neumann gave the correct mathematical description of Heisenberg's matrices as operators on a Hilbert space, the physicists got a little scared because some (invented) matrices are not defined on any state of a Hilbert space. Proving the required condition of self-adjointness can be a difficult task that physicists gladly leave to the mathematicians. John von Neumann laid the mathematical foundations of quantum mechanics in a book of the same name ²⁸. It is said that, when he wanted to publish a long article in a Springer journal, the editor feared a loss of profit since the space could be used for several other papers, so von Neumann had to promise to write a book for the same publisher. If the story is true, the editor was a clever businessman because the book *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics* became a standard reference for functional analysis, quantum mechanics and quantum thermodynamics.

During the horrible Nazi period, von Neumann's family emigrated to the United States, as many European scientists of Jewish heritage or with opposite political views did, for instance Albert Einstein. So many scientists left Europe that, when Hilbert was asked if the Mathematical Institute in Göttingen had suffered by the departure of the Jews and their friends, he replied: "It doesn't exist anymore." For the United States, it was the beginning of a time of flourishing in science and

technology by attracting the smartest brains (which the US still do).

When it became clear that nuclear fission could be used to construct powerful bombs, a letter signed by the pacifist Albert Einstein was sent to the US president that warned against a possible German atomic bomb and indirectly suggested to build one before the Germans did. As a response, the US government launched the top-secret Manhattan Project aimed at developing the first nuclear weapon. Among the mathematical experts joining the project were Stanislaw Ulam and John von Neumann. There may be many reasons for joining a project developing a weapon of mass destruction, for instance patriotism, money, fear of the enemy, and also scientific curiosity. Whatever the reason might be, it raises the ethical question whether scientists should participate in military projects aimed at killing people. Being one of the founders of mathematical game theory, von Neumann had his own theory about peace. If two or more players can never win but definitely destroy the other, no one will ever dare to start the game. He has been right so far, but he didn't consider the psychology of a mad "Führer" who starts a war that he cannot win, or a narcissistic leader who is a sore loser and prefers total destruction of a proclaimed enemy over giving up power. Please check the psychology of the candidates before voting, they may ignore all human knowledge gained by game theory.

To perform computations for the creation of the deadliest weapon of mass destruction, John von Neumann found out that it was faster to program a computer than to do the computations manually. As there was the computer ENIAC in the US around, John von Neumann wrote computer programs, algorithms and described a computer architecture. Together with Ulam, von Neumann de-

²⁷(von Neumann 1931) ²⁸(von Neumann 1932)

ped a stochastic simulation, called Monte Carlo method, which is still in use today. His novel contributions made him one of the founding fathers of computer science and Artificial Intelligence. However, his involvement in the creation of nuclear weapons had a price. His curiosity let him not only compute models, but also participate actively in the construction. He didn't become very old, he died from cancer.

Perhaps I should mention another famous genius among the renowned scientist participating in the Manhattan Project that sparked a major boost in nuclear physics: 25 years old Richard Feynman who later was awarded a Nobel Prize in Physics for his famous diagrams that bear his name ²⁹. Feynman diagrams are a primary computational tool to symbolize heavy computations in quantum field theory. Some mathematicians are used to symbolic computations although others reject them as a valid mathematical proof. For instance, the operations of a braid group can be visualized by braided strings so that everybody can see immediately the rules without even knowing what a group is and how the relations are defined, one just has to pull the strings and to unravel them, thus applying in each step the correct mathematical rule.

Feynman diagrams are such symbolic rules that tell physicists what to do without the need of a rigorous mathematical proof. Just a word of warning, these diagrams depict mathematical computations and not the reality (they contain "virtual particles" faster than light) – the outcome of the computations tells us something about the reality. In fact, these diagrams were at first rejected by Feynman's senior colleagues, although their inventor could perform computations on a blackboard in several minutes, which would take hours or days to verify. They describe a perturbative method to compute something that is

mathematically given by a series. It was Freeman Dyson ³⁰, who made mathematical sense out of these diagrams, and who furthermore showed that the series actually diverges ³¹, so he also proved that, mathematically, the series doesn't make sense at all.

Feynman was an unconventional physicist and an intuitionist, so he was pretty far from rigorous mathematics. From all mathematicians and physicists mentioned in this paper, he may be the one who is furthest away from pure mathematics. As his Manhattan Project colleague John von Neumann, Feynman died from cancer.

Having mentioned von Neumann's role in computing, there was another extraordinary mathematician who can be considered a founding father of computer science, the one who helped to crack the Enigma code of the Nazis: Alan Turing. Contrary to the development of an atomic bomb, his involvement in World War II may have saved many lives by deciphering top secret Nazi messages. It seems that he was not only the first person who designed an *abstract* computer machine, but also the first one who had a clear vision for Artificial Intelligence ³². Around 70 years ago, he introduced the so-called Turing test, which does not ask if a machine is intelligent but rather if a machine can perform tasks that cannot be distinguished from the action of an intelligent being. For instance, a computer may play chess better than any human and still not be able to read Shakespeare, which simply isn't necessary for playing chess.

The conservative society wasn't wholly grateful to one of its national war heroes. Turing was convicted of homosexual acts and accepted to undergo a chemical treatment, but couldn't bear the sentence and departed from this life.

The chemical treatment was the ultimate "scientific" finding to "cure"

²⁹ (Feynman 1949)

³⁰ (Dyson 1949)

³¹ (Dyson 1952)

³² (Turing 1950)

ultimate “scientific” finding to “cure” homosexuality, based on nothing else than the *belief* that homosexuality is a disease. These “scientists” didn’t understand that sexuality is pure pleasure designed to trick humans into reproduction but not limited to that, everybody can make their own choices as long as they don’t harm anyone. A bit of abstraction helps to understand reality and to get out of clichés.

After World War II, the most decisive impact on mathematics had Nicolas Bourbaki, a mathematician who never existed. It was a pseudonym for a French collective of top mathematicians that aimed at writing a complete treatise of analysis and later tried to extend the volumes to all important branches of mathematics. Very much in the spirit of Hilbert, the books started from foundational axioms³³, focused on generality and were written in a stark linear style, that is, everything is well founded and deduced from previous expositions. On the other hand, the authors barely gave motivating examples, they seemed to be guided by the idea that a specific example can never show a complete theory and therefore is always misleading. In their effort to be complete and self-contained, the authors avoided to step outside of their realm so that the books contain almost no applications from other disciplines. Nevertheless, because of their completeness, the books could be found in nearly all math departments; and because of their linear style, they were quite convenient for math professors to prepare their lectures.

Clearly, with the diversification of mathematics after Hilbert and the continuing intuitive style of applying mathematics in physics and other disciplines (like Poincaré), it was time that someone gathered the mathematical know-how and put it on a solid footing. Honestly, the French collective did a superb job. However, after World War II and before

the market was flooded with more pedagogical text books, Bourbaki’s perspective became the predominant style in (European) mathematics and was passed to the next generation. Moreover, because of the cold war, space race and the fear of a technological gap, both political sides granted (particle) physics and space exploration a huge amount of freedom. Mathematics, considered a basic science, benefited greatly from these developments, nobody from the treasure department asked if the money spent on mathematicians will produce any revenues. Quantum field theory, mathematically still incomplete, provided enough challenges for mathematicians. A promising way to obtain research funds was to relate somehow one’s own work to quantum field theory, it didn’t require to mention a nuclear bomb, any advance in nuclear physics could be the spark for the construction of a more destructive weapon.

The governments and their finance ministers, who usually don’t understand much about pure mathematics, never noticed that pure mathematicians liked to ask and to solve their own questions, sometimes a little far from reality. A frequent justification was that “it might be useful in the future”. This is an interesting way to give one’s life a purpose but a meaningless excuse. Imagine if all these smart brains would have dedicated themselves to real-world applications, how much useful mathematics could they have produced?

Bourbaki’s style of mathematics created a certain arrogance of the purest pure mathematicians toward applied mathematics. They started to believe that pure and applied mathematics are different subjects and that the applied mathematicians were inferior because they “only apply our theorems”. The wake-up call came with the economic recession when research foundations did ask the question of financial benefit. Quite a few were upset

³³ (Bourbaki 1939)

lications in weaker journals were more successful in grant applications. In economics, this is the law of the free market, if there is no demand, there will be no need for a supply.

The reader may be warned not to stumble into the same pitfall. The question is not if pure mathematics is more powerful or if applied mathematics is more useful, the problem is that there should be no separation between applied and pure mathematics. Bourbaki's effort was correct and necessary, someone had to establish the foundations of mathematics, and of course, the so-called "applied" mathematicians will always draw inspiration from the so-called "pure" mathematics. On the other hand, all mathematicians, no matter if they consider themselves pure or applied or algebraists or analysts or geometers or topologists or whatever, should ask themselves why they are doing what they are doing and have a valuable goal in mind, which could in fact be a vision of what mathematics should achieve in the future.

If Bourbaki's goal has ever been to collect the whole mathematical knowledge in a series of books, then the collective failed already during its existence. Mathematics developed far too quickly for a handful of debating elite mathematicians to keep up with compiling all knowledge into books. At this point, it would also be too exhaustive to mention all brilliant mathematicians of that century. The easiest way to name some masterminds would be to list the Fields medalists, they all deserve to be called geniuses. To keep the paper short, I will bring up only a few exceptional ones.

The Fields Medal is often regarded as the Nobel Prize in Mathematics. There are other prestigious international awards in mathematics, for instance the Abel Prize and the Crafoord Prize were created as a complement to the Nobel Prize. What makes the Fields Medal so special is the age limit. The Fields

laureates must have obtained their groundbreaking results at an age under 40 so that, unlike a 97 years old Nobel laureate, they can still shape their discipline in the long term. That this actually happens can be seen in the Citation Index. Lifetime citations of Fields medalists usually ramp up from hundreds to thousands. It's fair to say that the Fields Medal committees have now a greater impact on mathematics than Bourbaki.

It has wildly been speculated why Nobel didn't establish a prize in mathematics. Rumors spread that the acclaimed mathematician Gösta Mittag-Leffler was the cause. Some say that Nobel felt an antipathy for Mittag-Leffler that passed on to mathematics, others say that Nobel felt betrayed by his contemporary in a love affair, even the name of the alleged woman was disseminated: Sofia Kovalevskaya. Sometimes the simplest explanation seems to be the right one. Nobel wrote in his will that the prizes should be created for those that accomplished the "greatest benefit to mankind". So, what is the benefit to mankind if some talented mathematician aged under forty proves the Riemann hypothesis? It would definitely be worth a Fields Medal and mathematicians all over the world would be delighted, but most people outside mathematics, including famous engineers and inventors, can't see much benefit to mankind in it. No one seems to be surprised that there is no Nobel Prize in Fine Arts.

What is true though is that Mittag-Leffler helped Sofia Kovalevskaya³⁴ to get a position at Stockholm University. This made her the first confirmed female professor in mathematics and she was the first woman to earn a PhD, too. Note that she is also the first woman mentioned in this paper, which has a sad reason. Until late 19th century, women were not allowed to study at universities. What science has irretrievably lost by excluding half of man-

kind from research becomes evident from her PhD thesis, in which she proved the main existence and uniqueness theorem in the theory of analytic partial differential equations³⁴.

The most influential woman in mathematics was Emmy Noether, one of the first women to earn a habilitation (teaching license), which was rejected in her first attempt because of a ban for women. Her contributions to abstract algebra are outstanding and still part of all advanced courses in ring theory (objects with addition and multiplication like the integer numbers). In physics, she proved that any continuous symmetry leads to a conservation law³⁵. This includes in particular the most important law of nature, the conservation of energy, which follows from an invariance in time translations. Thus it can be said that humanity owes the discovery of the most important law of nature to two women: Émilie du Châtelet was the first person to postulate it and Emmy Noether proved it mathematically.

Among the Fields medalists, there is only one female mathematician, Maryam Mirzakhani. Unfortunately she didn't live long enough to continue her great achievements. Her work is remotely related to the groundbreaking ideas of another Fields medalist, who stands out by his unusual personality: Alexander Grothendieck. Once more it will be shown that the behavior of a rational mathematician doesn't have to be rational.

Grothendieck had a difficult childhood. His father was a Jew, anarchist, a migrant from the Soviet Union and illegal in Germany, so there was hardly another combination that would have triggered more hate from the Nazis, no matter what a nice person he might have been. Because of the imminent threat of the Nazis, the family fled to France, but was captured there, and Alexander's father was one of the first to be killed in a concentration camp. Alexander and his mother survived the Nazi regime.

After World War II, he first studied mathematics at the provincial University of Montpellier, later at the more prestigious École normale supérieure in Paris, and then specialized in functional analysis in Nancy, working with Fields medalist Laurent Schwartz and Bourbaki cofounder Jean Dieudonné. He soon became a rising star in functional analysis, studying the scary subject of topological tensor products, where different completions yield different algebras that are difficult to classify. Grothendieck solved the analysis problem with abstract algebraic methods³⁶. What a luck for mathematics that this algebra genius was driven into functional analysis! Later he laid the algebraic foundations of the Atiyah-Singer index theorem, mentioned previously as one of the most celebrated theorems of the 20th century.

Knowing his childhood, it is no surprise that Grothendieck was a pacifist. To avoid military service, he kept his stateless refugee status, traveled to Brazil and the US, and finally ended up in Paris again. There, at the Institut des hautes Études scientifiques (IHÉS), he found the perfect research environment as Paris turned into the center of algebraic geometry. That his talent was widely recognized can be seen in the fact that he became a member of the Bourbaki collective, the ultimate step of his rise from a provincial math student to the top elite circle of French mathematicians.

Grothendieck's research was substantially driven by the attempt to prove the Weil conjectures³⁷. The Weil conjectures arise from the interest of counting solutions of algebraic expressions, where the solutions belong to a finite set of numbers. Here, numbers mean a set that allows to perform the operations addition, subtraction, multiplication and division. An example is the set $\{0, 1\}$ with the usual operations and the condition $1+1=0$. So it is not true in mathematics that $1+1$ is always 2, the number 2 might simply not be

³⁴ (Kovalevskaya 1875)

³⁵ (Noether 1918)

³⁶ (Grothendieck 1953)

³⁷ (Weil 1949)

part of the game. This is actually exactly the way in which a single bit in a computer performs its computations. Such numbers and solutions of algebraic expressions have for instance an application in coding theory. André Weil associated to the counting of solutions a function that resembles the Riemann zeta function which gives rise to Riemann's hypothesis.

Starting from a few examples, Weil made four conjectures about this function that became Grothendieck's main motivation for studying algebraic geometry.

Although Grothendieck proved only parts of the conjectures and didn't succeed in proving all of them, his work on the Weil conjectures shows clearly his extraordinary style of thinking. Grothendieck was a true master of abstraction. When he tried to solve a problem, he started to understand it in an abstract manner, discovering in that way new questions. If he couldn't find a solution, he passed to more abstraction to understand the true nature of the problem, and then to more abstraction to unify different theories, and then to more abstraction to reveal different aspects of the problem as parts of the same whole. At the end, his final goal was not the proof of the conjectures but to establish the right framework in which the conjectures could be proven naturally. Grothendieck didn't seek fast fame by solving these difficult mathematical problems, rather the contrary, the proof of these conjectures should be the ultimate evidence that he revealed the correct underlying principles. When his student and now Fields medalist Pierre Deligne showed him the proof of the final and hardest part of the conjectures³⁸, Grothendieck was evidently disappointed by the "trick" that Deligne had been using. Many believed that Grothendieck felt envy toward his former student but I don't think so. I believe that Grothendieck was honestly disappointed that the proof didn't

emerge from his foundational theories, so he may have felt in that moment that his mathematical endeavor will remain unfinished.

His way of thinking shaped a mathematical discipline that mathematicians call category theory. Category theory is a form of abstraction that reduces everything to its essential structures and adds then step-by-step more properties. Grothendieck was so fond of this theory that he wanted to lay the foundations of mathematics completely in category theory, as much as Bourbaki wanted to lay the foundations of mathematics in set theory, obviously quite a different way of thinking.

Absolutely deserved, Grothendieck was proposed to receive the Fields Medal in 1966 at the International Congress of Mathematicians in Moscow. It is an irony of fate that the congress was held in the country from which his father escaped because of his anarchist ideas. Having strong political views similar to his father, it is no surprise that Grothendieck refused to travel to Moscow.

Shortly after receiving the Fields Medal (in absence), the decline of his mathematical career started. Opposing actively the Vietnam War and being caught up in the 1968 student revolts, he found a new obsession in political activism. Grothendieck launched a political group called *Survivre*, a movement fighting for the survival of all life threatened by the destruction of the environment and militarism. He tried to attract fellow mathematicians and senior colleagues, but was mostly met with incomprehension. When Grothendieck learned that the IHÉS received military funding, he quit his job at the IHÉS and, after some temporary positions, returned to the University of Montpellier, the same provincial university where he once came from. His social life deteriorated even further, he withdrew from mathematics, cut ties with family members and friends, and re-

³⁸(Deligne 1974)

treated from public life to a small village in the Pyrenees. There he spent his final years like a reclusive monk dedicating himself to religion (e.g. Buddhism), meditation, spirituality and introspection.

His last years were only disturbed by intrusive admirers with dubious motivations. I can't imagine that a perfect stranger knocks on the door of a Nobel Prize winner saying "Madame, you are famous, I would like to talk with you about chemistry!"

Much has been speculated about his reasons to withdraw from mathematics, and his post-mathematical life has attracted a lot of curiosity. Grothendieck wasn't completely silent in all these years, rather the contrary, he wrote letters to colleagues and thousands of pages of "Meditations" to explain himself in a poetic style that is a bit difficult to follow and often leads to nowhere. His most famous work in this time is *Récoltes et Semailles*, which many regard as a personal judgment about mathematics expressing dissatisfaction and resentments. This seems not to be true, although he elucidates his disappointments of a "certain sort" of colleagues, he writes quite positively about his "elders" and friends in mathematics. *Récoltes et Semailles* appears to be an attempt to reflect about his own life as a mathematician, to illuminate his passion for knowledge, and to share his visions for mathematics.

Instead of reading thousand pages of reflections, there is a faster way of understanding Grothendieck. In 1988, Grothendieck was to be awarded the prestigious Crafoord Prize which, as mentioned above, is considered a complement of the Nobel Prize. Grothendieck refused the award and explained his reasons in a letter sent to twelve scientific journals³⁹. Apart from making clear that he doesn't need more material wealth and that the money could be used better for those in need, he did in fact complain about a decline of ethics and values in the

scientific "milieu".

So, what might he have been complaining about? There are things happening in mathematics that don't meet Grothendieck's high ethical standards. Grothendieck mentioned explicitly theft among colleagues, he probably was upset that some ideas from his seminar at IHÉS surfaced in mathematical journals. He also didn't like the elite thinking at the renowned research centers in Paris and in the Bourbaki collective. Grothendieck emerged from a precarious social background and felt that he had to prove his worth to be accepted in the elite circle that showed a certain arrogance toward those who don't reach the highest levels. In *Récoltes et Semailles*, he complained about egocentric characters. Of course it hurt him that colleagues and supposed friends publicly commented without comprehension on his spiritual path, but he was also annoyed by those who despise the "soul". This can be translated in a lack of vision and passion for mathematics, all that counts is the number of publications and in which journals. Abstraction became a means for the production of "results" without any motivation, just to define another area in which one can harvest a few new theorems. Known theorems are rewritten in a more abstract or generalized manner to claim an original result. If a theorem is too difficult to prove, the necessary conditions are stated in a definition in order to avoid hard work in the proof. The publications of friends are excessively cited so that the chances are high that the unaware editor sends the manuscript to a "specialist in the field" who certainly accepts the paper. In fact, the high number of mathematical papers that will be forgotten in the future is an obstacle for the progress of mathematics rather than an advance. Mathematics is getting too dispersed to generate profound impact by collective efforts, too much time is wasted by proving

³⁹ (Grothendieck 1989)

useless conclusions. Competition, not only for prizes and rewards, started to dominate mathematical research although collaborative work for a common goal would move mathematics forward at a faster pace.

However, Grothendieck's refusing letter contains another hint at the true reasons for his withdrawal from society. He writes about an "unprecedented civilization collapse". This is a typical, irrational, catastrophic thinking of people with an increased anxiety in a crisis situation. The withdrawal from society on the one hand and the aggressive tone of the letter on the other indicate "flight or fight" responses to stressful events. Writing thousands of pages to explain oneself to the world from which one has retired is quite the contrary of finding inner peace, it was done with the same obsession as his mathematical research. Such symptoms can be found in a manual of mental disorders. I am not making a diagnosis and I am not able to do so. All I want to say is that, instead of trying to find an explanation for irrational behavior, friends and acquaintances should think about if a person close to them needs professional help.

The next story belongs to the present century but resembles a lot the last one, therefore I will tell it now. There is a mathematician who did not only reject the Fields Medal but also the Clay Millennium Prize of one million dollars. Up to date, only one of the seven Millennium Prize Problems has been solved. The genius, who did it, is Grigori Perelman and the problem was the above mentioned Poincaré conjecture. A striking similarity of the two stories is that both complained about a decline of ethical standards. Yet there is a huge difference between the two cases: Perelman's behavior was always consistent. Of course the media went crazy and journalists made big fuss about it. What these ladies and gentlemen don't understand is that not

everybody has the same ethical standards, not everybody has the same needs, not everybody feels justice the same way, and not for everybody one million dollars have the same value.

There might be someone who prefers being who he is over being a millionaire. Grigori Perelman hasn't had many friends and didn't spend much money before he got famous. He did what he liked most, venturing in difficult mathematics, a world of its own. He had what he needed, much like Grothendieck who lived his final years from a small pension. Why should more money and more publicity make him more happy? To all admirers, please don't knock on his door shouting "Súdar, you are famous, I would like to talk with you about mathematics!"

Perelman proved the Poincaré conjecture by using a technique developed by Richard Hamilton in the 1980's called Ricci flow ⁴⁰. Imagine that your beautiful spherical car has crashed. What the Ricci flow does is to smoothing out the deformations back to a round shape like a mechanic. But if the mechanic doesn't work carefully, he may create new dents and spikes known as singularities in mathematics. Richard Hamilton realized that his tools may be used to prove the Poincaré conjecture but he was not able to deal with the singularities. Perelman had a background in Alexandrov spaces, which behave fairly more singular than round spheres, and found a way how to deal with the singularities. He proved that some kind of singularities don't even occur, and others can be removed by cutting and paste techniques. Perelman was totally aware of what his findings mean – the first solution of a Millennium Prize Problem, thus he published it on a preprint server ⁴¹ and sent copies to several specialists in the field so that the proof can publicly be verified instead of an anonymous peer review. As Perelman said in an interview: "If the proof is correct, then

⁴⁰ (Hamilton 1982)

⁴¹(Perelman 2003)

no other recognition is needed.” However, not sending it to a peer-review journal meant not fulfilling the conditions of the Millennium Prize Problems so that a mathematician with high ambitions and lower ethical standards might consider the race as still open.

One of the mathematicians, who received directly a copy from Perelman, was Fields medalist Shing-Tung Yau. He received the Fields Medal for proving e.g. the Calabi conjecture ⁴², which later became important in string theory because it allows to decide when a manifold can be used to compactify the extra spatial dimensions in string theory. These manifolds are now known as Calabi-Yau manifolds.

At the turn of the century, his glory had already faded and he acquired new fame as someone who meddles in disputes and politics. Hamilton was closely related to his research group and Yau very likely saw the possibility of proving the Poincaré conjecture by using Hamilton’s techniques. It might have felt worse than a fourth position in the Olympic Games to see that some no-name finished the proof, but nobody should be surprised that suspicions were aroused when two of his former students published a paper about a complete proof of the Poincaré conjecture ⁴³ in the Asian Journal of Mathematics, where Yau is coincidentally one of the two chief editors. No serious referee could have ignored Perelman’s work and the suspicions were substantiated when the authors had to publish an Erratum ⁴⁴ in which they admitted that large part of their arguments were already obtained by Perelman. Now Perelman had to make a choice, either to win one million dollars and to be part of this circus of disputes, accusations, dishonesty and low ethical standards, or to disappear in order to keep his honesty and high ethical standards intact. To keep his inner peace, he had to choose the

second.

I would like to mention the story of a mathematician who deserved the Fields Medal and didn’t get it. Of course, there are many of them, but one narrowly missed the medal because of the age restriction. Slightly below the age limit, Andrew Wiles submitted a paper on elliptic curves ⁴⁵ that implied the proof of a very famous problem that is astonishingly simple to state but resisted a proof for more than 350 years. The problem is known as Fermat’s Last Theorem and conjectured that the equation $a^n + b^n = c^n$ does not have solutions for positive integers a , b and c if $n > 2$. Euclid knew already that the case $n = 2$ has infinite many solutions (Pythagorean triples). Fermat may not have had such strong ethics as Perelman because he wrote in the margin of a book that the equation doesn’t admit solutions for $n > 2$ and that he found a marvelous proof which is unfortunately too long write in the margin. His remark probably put a few mathematicians in the wrong direction because it seems that an elementary proof does not exist.

Wiles proved the theorem with heavy machinery from Grothendieck’s algebraic geometry, and by combining the theory of elliptic curves with something that has to do with (weighted) invariance properties, a subject that can easily become complicated. In the theory of elliptic curves, elliptic curves do not look like ellipses, rather like a donut. The name comes from the fact that these functions arise as inverses of elliptic integrals, which appear in the calculations of perimeters and areas of ellipses and ellipsoids. No known elementary function solves these integrals, thus they are interesting in their own right and intensely studied. Studying the inverse functions is alike to a dual approach. Wherever there is mathematics, there is a dual structure, the cleverest mathematicians know how

⁴²(Yau 1977)

⁴³ (Cao and Zhu, A Complete Proof [...], 2006)

⁴⁴ (Cao and Zhu, Erratum, 2006)

⁴⁵ (Wiles 1995)

to use it. The surprise in this example is that the inverse function can be studied in the complex plane (I wrote already about the fabulous properties of this number system), there they behave very well – as if they were defined on a donut.

If someone writes down all the additional knowledge accumulated after Fermat's death that is necessary to prove Fermat's Last Theorem with Wiles' methods, then the exposition will easily exceed thousand pages, obviously a bit more than what would fit in the margin of a book. Wiles worked six years on the proof and didn't publish much in this period, actually so little that he would have felt the consequences at a university or in a country with a rigid evolution system, deeming his attempt as a failure before its completion. Unfortunately, the initial proof contained an error, so that Wiles had to work another year to fill the gap and passed the age limit for the Fields Medal. The International Mathematical Union, which is in charge of awarding the Fields Medal, honored these achievements with the first and only silver plaque.

The only physicist to receive the Fields Medal is Edward Witten. He is best known for his work in string theory, quantum gravity and supersymmetry, in short, the theory of everything. Physics has a problem with unifying quantum field theory – the theory of elementary particles and their electromagnetic, strong and weak interactions – and gravity, commonly known as the relatively weak attractive force between masses but mathematically more precisely Einstein's theory explaining how energy warps our space-time. The puzzle is why gravity behaves so differently than the other inter-actions. Whoever solves the puzzle is a contender for the Nobel Prize.

String theory is (was?) a candidate for the theory of everything. The basic idea is quite natural, unless otherwise proven, there is no

reason to assume that elementary particles are point-like, all this wave function business hints otherwise. Mathematically, the next difficulty is to step up one dimension, i.e. from 0-dimensional particles to 1-dimensional vibrating strings, then to a 2-dimensional membranes (2-branes) and, more generally, to p -branes, where p denotes the dimension.

Curiously, string theories are only consistent in higher dimensional space-times, for instance in 26 dimensions, 10 dimensions or, in the case of Witten's unifying theory, 11 dimensions ⁴⁶. The fact that our senses perceive exactly three spacial dimensions is not a proof that the elementary particles live only in three spacial dimensions. Actually the mysterious dark matter and dark energy could be effects from higher and lower dimensions. The issue is what to do with the extra dimensions. Witten et al. ⁴⁷ proposed to compactify them with manifolds that have the right properties like being "very small", not breaking the considered symmetries and being Ricci flat so that they don't produce gravitational effects. Examples of manifolds that satisfy these conditions are the above-mentioned Calabi-Yau manifolds.

Once the mathematicians got to know the importance of Calabi-Yau manifolds in string theory, there was no stopping the research of Calabi-Yau properties. Suddenly generalized Calabi-Yau manifold appeared, Calabi-Yau algebras, Calabi-Yau categories, and so on, each time a bit further away from the original motivation. Mathematically it is justified, mathematicians want to understand and to classify these structures, or any other. String theory had a huge impact on several mathematical research areas like cobordism, 4-manifolds, differential geometric invariants, moduli spaces, Chern-Simons theory, knot theory, to name a few.

Nevertheless, being a physical theory, it

⁴⁶ (Witten 1995)

⁴⁷ (Witten et al. 1985)

is also justified to ask the question if string theory has anything to do with reality. Unfortunately, no experiment has ever proven string theory to be a valid model. On the other hand, there is so much freedom and there are so many parameters in string theory that it might be possible to design a mathematical model that matches known experiments without describing the actual physical reality. (Maybe the extra dimensions don't exist?) String theory is one of the most advisable examples to ask the question when is the best time to stop research on a theory that doesn't produce verifiable results. After fifty years? Hundred? When a better theory is found? My prediction is that disciples of leading string theorist will continue to study string theory, and their disciples too.

Another Fields medalist, who created an exotic theory about the nature of reality, is Alain Connes. In his PhD thesis, he discovered time, that is, the unique (up to inner automorphisms) 1-parameter group leading to equilibrium states in quantum statistical mechanics ⁴⁸. Then he got the Fields Medal for the solution of a difficult classification problem of operator algebras ⁴⁹, the sort of operator algebras that build up algebraic quantum field theory. After receiving the award, he used his freedom at the famous Field medalist producing research institute IHÉS to create a completely new mathematical theory: noncommutative geometry ⁵⁰.

The motivation for noncommutative geometry is quite convincing. Classical mechanics and general relativity have a purely geometric formulation in terms of symplectic and pseudo-Riemannian manifolds, respectively. On the other hand, quantum physics deals inherently with noncommutative operators. For many years, mathematicians and physicists tried to deduce quantum mechanics from classical mechanics although the

opposite way would be more natural, namely to view classical mechanics as a many-particle-limit of the quantum behavior of the constituent particles. If the classical theories are of geometric nature, so should be the noncommutative operator algebras in quantum theory.

Connes and some physicists went even further by considering the possibility of a noncommutative space-time at the very tiny Planck length scale. The reason comes from a measurement problem. If one wants to determine a point in space, one has to perform a measurement to "see" the point, and the only possibility is a scattering-type experiment with a particle of non-zero mass; photons always move too fast, i.e. arrive from a different place. To measure the point more and more precisely, more and more mass (or energy, which is the same – says Einstein) has to be concentrated in a smaller and smaller region, therefore creating eventually a micro black hole, that's what Einstein's theory predicts. But a black hole is characterized by an event horizon beyond which no information reaches an observer. The theoretical minimum radius, which does not depend on the energy, is known as the Planck length. So, what is the point of considering a point in space that can never be measured below Planck length? It is pointless to speak of the existence of something that can never be observed.

Connes proposed not to study the points but the functions defined on such (quantum) spaces, for instance the coordinate functions. This matches exactly the idea of algebraic geometry, in fact, Grothendieck already proposed a topos category which avoids completely the notion of a point in a topological space (= space with a concept of continuity), though without a physical motivation. Heisenberg's uncertainty principle teaches us that there is a minimum volume in 2-dimensional quan-

⁴⁸(Connes 1973)

⁴⁹(Connes 1976)

⁵⁰(Connes 1994)

tum phase space, exactly the same effect can be obtained by considering noncommutative space-time variables.

As appealing as this idea might be, the problem is again the experimental verification. Only if certain quantum states can be maintained stable over a long period of time, there exists a chance of measuring noncommutative space-time effects. On the other hand, it is already clear that this theory will never be useful for creating more powerful power stations nor more deadly weapons of mass destruction since we are talking about something at a very, very tiny scale. So, why bother at all? One reason was the hope to avoid the infinities in the above mentioned Dyson series. Other reasons are more of mathematical nature. There are (topological) spaces, like foliations and Penrose tilings, along with physical topological insulators, that behave badly when studied with conventional methods but possess a rich noncommutative geometry. It is no surprise that Witten incorporated these structures in string theory⁵¹.

Even if all hopes of describing a noncommutative space-time fail, it seems mathematically worth to study noncommutative geometry because it is not a specialization but a unifying generalization. It incorporates under the same framework a wide range of different disciplines like algebraic geometry, differential geometry, differential operators, operator algebras, topology, algebraic topology, Lie groups, representation theory, spectral theory, invariant theory, index theorems, etc., and generalizes them to a possible quantum world. At least, in this way, one can learn a lot about mathematics. Moreover, mathematics works best when many disciplines intersect.

Finally let me mention the most prolific mathematician of the last century, working in number theory and discrete mathematics (among others): Paul Erdős. Number theory

accompanies mathematics since the beginning, and prior to the digital age, it was regarded by many mathematicians as the high art of mathematics but completely useless, i.e. without practical applications. Now it is indispensable in computer science and cryptography. Again one might ask the question when to stop the research on a useless theory. After fifty years? Hundred? Immediately, until an application demands research on it? Although number theory is a good example that it would have been a bad decision to abandon research with future applications, I personally consider it a bad habit of mathematicians to justify their work with the words “it might turn out useful in the future”. It might also be a waste of resources for fruitless theories.

Erdős is not known for establishing a new theory, but as one of the greatest problem solvers. He wrote more than thousand papers and had several hundreds of collaborators who he found by constantly traveling around the world and living an eccentric, yet spartan lifestyle dedicated solely to mathematics. It occurred to someone to define the Erdős number as the collaboration distance to Paul Erdős. So, direct collaborators have Erdős number 1, and a collaborator of a collaborator who collaborated with a collaborator of Erdős has Erdős number 3. It is amazing to see that nearly all mathematicians with a couple of coauthors have a (finite) Erdős number and almost all of them have a number less than 8. This shows that mathematicians are well connected and refutes the image of mathematicians as hermits solving problems behind closed doors.

In conclusion, what history shows us is that mathematics and other sciences were strongly influenced by individual persons called “geniuses” (in a simplistic view, some geniuses don’t like to be called genius). These characters with groundbreaking results and an in-

⁵¹ (Seiberg and Witten 1999)

credible impact on human progress can be anybody and anything: men, women, migrants, conservatives, conformists, rebellious, perfectionist, intuitionist, innovative, creative, egoistic, egocentric, eccentric, ascetic, with high ethical standards, with low ethical standards, homosexual, with mental disorders, blind – not to mention all the clichés of mathematicians that are fed by some protagonists.

Needless to say that there are many more geniuses who were not mentioned here, and even more who can abstain from being called so. Each year, a huge number of research papers are published which will be completely forgotten in a few decades. Can't we leave mathematics in the hands of the top elite masterminds, like many radio stations that play always the same songs of a few famous ones from the billboard charts, instead of cluttering libraries and webpages with useless publications? Actually, a collective effort of problem solving, e.g. on webpages specially designed for this purpose, could lead to a much faster progress in mathematics and other sciences than a narrow-minded competitive behavior (Who is the best? Who writes more papers?), since numerous persons generate more new ideas on a specific issue than a single human. On the other hand, the theory of the free market tells us that competition always leads to progress.

The question needs no answer because it won't change in the near future. However, the answer to the question if it is worth that so many mathematicians explore mathematics is a completely different one. First, mathematics trains people in a particular way of thinking: abstract, logic and deductive. A society that produces a great amount of mathematicians has many people available for tasks that involve abstract, logical and deductive thinking. Only if the environment is not

fruitful enough, mathematicians become useless. Furthermore, nobody knows if the next genius comes from London or Morelia, so the stage should be set in both places. I can also see a benefit in the production of the countless, soon forgotten publications. They serve as a resonance of the top research. Those areas with the most vibrant research activities will survive, others will slowly decline.

Looking at the history, it can be seen that progress was mostly inspired by applications. Working solely in potentially useless theories seems to be a recent phenomenon, although there are also examples like number theory that were considered useless for centuries but found a late application. However, nobody should take those examples as a cheap excuse to do whatever (s)he wants to do without ever asking the question what the motivations are for doing it. If it is not a direct application, it might be a vision of what mathematics should achieve in the future.

Anyway, a trend can be observed that governments and research funds prefer applications over purely theoretical research. This is perfectly understandable. Why should a sponsor not ask what to get back from the money? Pure mathematicians complain about it, they see the future of pure mathematics threatened. Having said that, I can't see the problem. If mathematicians focus on concrete problems, they will derive new, powerful, abstract theorems, as some of their heroes did in the past. It's the division between pure and applied mathematics, which I regard as a problem. Now, if this division persists, what is the future of pure mathematics?

Today, September 19, 2021, I can predict the future of pure mathematics with absolute certainty: It will be an evolutionary process. As long as pure mathematics has a benefit for the society, it will survive. For instance, if pure mathematicians produce highly ca-

pacitated teachers at all educational levels, or qualified innovators with unusual ideas in the private sector. There will surely be a decline in research funds allocated to pure mathematics, which pushes more and more researchers into applied math. Nevertheless, the greatest geniuses are free spirits that cannot be caged, they will always revolutionize science without asking if the society calls it pure or applied.

The Present

-

The Future

The past has seen many scientific revolutions, often initiated by individual persons but always carried on by collective effort. We don't have to wait for the next big shot, the next revolution has already started!

The future will be revolutionized by Artificial Intelligence and Machine Learning, as much as computers and the internet revolutionized our daily life. It is the first time in the history of mankind that machines are able to learn much faster than humans; it is the first time in the history of mankind that computers develop something that may be called intelligence, each time faster than humans, and finally they will teach themselves. This is the beginning of an *exponential* growth! Better machines will train future machines to become better, knowledge and capabilities will increase at an astonishing speed. Computers don't need to be punished by death if they make mistakes so that natural selection evolves advantageously, computers can be restarted and can learn from their mistakes again and again.

It doesn't matter if these machines are good at a single task, we can build many of them for different jobs. What matters is that they perform their tasks better than human minds.

Wherever there are strict rules, like chess, data analysis or mathematics, machines will outperform our brains because brains don't evolve so fast. The computer program Alpha-Go Zero learnt to play Go by playing against itself and not only surpassed all professional human players in a few days, but also all previous versions, accumulating more knowledge than human mankind in thousands of years ⁵². No human will ever again become world champion in Go.

Go is just a game, but multi-resistant bacteria are a serious threat to our survival. Last year, a team from MIT let machines analyze data from known antibiotics and *millions* of molecule structures ⁵³, an impossible task for a crew of biologists and chemists. The algorithm did not only identify powerful new kinds of antibiotics, it also found one against a strain previously considered untreatable. Similar to Go players, researchers were stuck in their beliefs which molecules would be the correct ones and "discovered" always the same structures. The machine had no beliefs, it learnt everything from scratch and did moves no one else has done before.

The next task is to analyze the human DNA, obviously too much information for our brains. In computational biology, "world championships" of protein structure prediction are organized among more than 100 participating research groups. The goal of these "games" is to identify protein structures from amino acid sequences. It doesn't need much fantasy to understand its potential use in medical drug design and in the creation of new enzymes in bio-engineering. Artificial Intelligence also assists already the inverse process, namely protein design, evidently with the same potential applications. Last year's winner was Google subsidiary Deepmind, the same research laboratory that created the world champion in Go ⁵⁴. No one should

seriously be surprised that the world champions come from a private company with a huge amount of money and salaries higher than those of university professors. With the actual (public) university funding, the race is already lost to the big tech companies and an authoritarian regime.

I am not pretending that there is no danger although Artificial Intelligence doesn't have free will. Bad people can show them bad things, I don't think I need to explain it further. Machines are as "good" as we make them, and as good and as bad as us – their creators. Imagine that a machine receives randomly data from the internet, how much garbage will it learn? Hopefully nobody will be so stupid to feed them with piles of fake news, but someone was already so intelligent to let them learn from criminal statistics in the US for the creation of suspect profiles. Now it's too late, now they are already as biased as middle-aged, white, male police officers – exactly as those who collected the data.

If pure mathematics turned out one day to be the most powerful science, machines could be taught to read math articles, all of them, also the long ago forgotten, so take care, someone may find a mistake. Maybe they process only very carefully selected ones, it doesn't matter, they will definitely be able to store the exact content of many more research results than a human can read and understand in his life. The first step serves just for storing information, just to accumulate knowledge without being able to use it. In parallel, they could learn from this information, taught by a human or another machine. Then they are prepared for the search of new connections, first randomly, but since the beginning directed. Finally they will be capable of finding new theorems, but contrary to humans, none will ever be forgotten again, all data will be saved for centuries, and they can accumula-

te more and more theorems at a faster pace than humans, no human will be able to challenge them. If they find a connection that they can't prove or disprove, like Riemann's hypothesis, someone may show them to call it a conjecture.

As alluded in the first line of the previous paragraph, this fictional scenario only happens when the benefit justifies the effort. If there is no (financial) reward in finding the best match between an 11-dimensional string theory and all known parameters and outcomes of measurements, nobody will start such an enterprise. However, what has already started and will gain a momentum that surpasses human comprehension is the search for new and more efficient algorithms in data analysis.

A country not investing in Artificial Intelligence and Machine Learning will be left behind like a country not investing in computers and internet technologies. If someone in charge reads this, I wish her/him to make the right decisions and good luck!

Acknowledgement

I am very grateful to the referees for the careful reading of the manuscript.

References

- [0] ALL ADDITIONAL INFORMATION WAS FOUND ON THE INTERNET.
- [1] WIKIPEDIA. [HTTPS://WWW.WIKIPEDIA.ORG](https://www.wikipedia.org).
- [2] LONDON INSTITUTE FOR MATHEMATICAL SCIENCES." [HTTPS://LIMS.AC.UK/23-MATHEMATICAL-CHALLENGES/](https://lms.ac.uk/23-mathematical-challenges/).
- [3] CLAY INSTITUTE OF MATHEMATICS." [HTTPS://WWW.CLAYMATH.ORG/MILLENNIUM-PROBLEMS](https://www.claymath.org/millennium-problems).
- [4] DEEPMIND. [HTTPS://DEEPMIND.COM/BLOG/ARTICLE/ALPHAGO-ZERO-STARTING-SCRATCH](https://deepmind.com/blog/article/alphago-zero-starting-scratch).
- [5] NATURE. [HTTPS://WWW.NATURE.COM/ARTICLES/D41586-020-00018-3](https://www.nature.com/articles/D41586-020-00018-3)

- ABEL, N. H. MÉMOIRE SUR LES ÉQUATIONS ALGÈBRIQUES OÙ ON DÉMONTRE L'IMPOSSIBILITÉ DE LA RÉOLUTION DE L'ÉQUATION GÉNÉRALE DU CINQUIÈME DEGRÉ. CHRISTIANIA: DE L'IMPRIMERIE DE GROENDAHL, 1824.
- ATIYAH, M. F., AND I. M. SINGER. "THE INDEX OF ELLIPTIC OPERATORS I." *ANNALS OF MATHEMATICS*, 1968: 484-530.
- BENZMÜLLER, C., AND B. WOLTZENLOGEL-PALEO. "AUTOMATING GÖDEL'S ONTOLOGICAL PROOF OF GOD'S EXISTENCE WITH HIGHER-ORDER AUTOMATED THEOREM PROVERS." *PROC. EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE* 263 (2014): 93-98.
- BOLTZMANN, L. "ÜBER DIE BEZIEHUNG ZWISCHEN DEM ZWEITEN HAUPTSATZ DER MECHANISCHEN WÄRMETHEORIE UND DER WAHRSCHEINLICHKEITSRECHNUNG RESPEKTIVE DEN SÄTZEN ÜBER DAS WÄRMEGLEICHGEWICHT." *SITZUNGSBER. D. K. AKAD. DER WISSENSCHAFTEN ZU WIEN II* 76 (1877): 373-435.
- BOLYAI, J. "APPENDIX SCIENTIAM SPATII ABSOLUTE VERAM EXHIBENS; A VERITATE AUT FALSITATE AXIOMATIS XI EUCLIDEI, A PRIORI HAUD UNQUAM." IN *TENTAMEN JUVENTUTEM STUDIOSAM IN ELEMENTA MATHESEOS PURAE, ELEMENTARIS AC SUBLIMIORIS, METHODO INTUITIVA, EVIDENTIAQUE HUIC PROPRIA, INTRODUCENDI*, BY F. BOLYAI. TYPIS COLLEGII REFORMATIORUM PER JOSEPHUM ET SIMEONEM KALI DE FELSO VIST, 1832.
- BOURBAKI, N. *ÉLÉMENTS DE MATHÉMATIQUE - THÉORIE DES ENSEMBLES*. PARIS: HERMANN, 1939.
- CAO, H.-D., AND XI-P. ZHU. "ERRATUM TO 'A COMPLETE PROOF OF THE POINCARÉ AND GEOMETRIZATION CONJECTURES - APPLICATION OF THE HAMILTON-PERELMAN THEORY OF THE RICCI FLOW'." *ASIAN JOURNAL OF MATHEMATICS* 10 (2006): 663-664.
- CARTAN, E. *SUR LA STRUCTURE DES GROUPES DE TRANSFORMATIONS FINIS ET CONTINUS*. VOL. 826 DE THÈSES. PARIS: UNIVERSITÉ FACULTÉ DES SCIENCES, 1894.
- CONNES, A. "UNE CLASSIFICATION DES FACTEURS DE TYPE III." *ANNALES SCIENTIFIQUES DE L'É.N.S.* 6 (1973): 133-252.
- CONNES, A. "CLASSIFICATION OF INJECTIVE FACTORS." *ANNALS OF MATHEMATICS* 104, (1976).
- CONNES, A. *NONCOMMUTATIVE GEOMETRY*. BOSTON: ACADEMIC PRESS, 1994.
- DE BROGLIE, L. "RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA." (*ANNALES DE PHYSIQUE*) 10 (1925): 22-128.
- DELIGNE, P. "LA CONJECTURE DE WEIL. I." *PUBLICATIONS MATHÉMATIQUES DE L'IHÉS* 43 (1974): 273-307.
- DYSON, F. J. "DIVERGENCE OF PERTURBATION THEORY IN QUANTUM ELECTRODYNAMICS." *PHYSICAL REVIEW* 85 (1952): 631-632.
- DYSON, F. J. "THE RADIATION THEORIES OF TOMONAGA, SCHWINGER, AND FEYNMAN." *PHYSICAL REVIEWS* 75 (1949): 486-502.
- EINSTEIN, A. "ÜBER EINEN DIE ERZEUGUNG UND VERWANDLUNG DES LICHTES BETREFFENDEN HEURISTISCHEN GESICHTSPUNKT." *ANNALEN DER PHYSIK* 17 (1905): 132-148.
- EINSTEIN, A. "ZUR ELEKTRODYNAMIK BEWEGTER KÖRPER." *ANNALEN DER PHYSIK* 17 (1905): 891-921.
- EINSTEIN, A. "DIE GRUNDLAGEN DER ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE." *ANNALEN DER PHYSIK* 49 (1916): 769-822.
- FEYNMAN, R. P. "THE SPACE-TIME APPROACH TO QUANTUM ELECTRODYNAMICS." *PHYSICAL REVIEW* 76 (1949): 769-789.
- HAMILTON, R. S. "THREE-MANIFOLDS WITH POSITIVE RICCI CURVATURE." *JOURNAL DIFFERENTIAL GEOMETRY* 17 (1982): 255-306.
- HEISENBERG, W., M. BORN AND P. JORDAN. "ZUR QUANTENMECHANIK II." *ZEITSCHRIFT FÜR PHYSIK* 35 (1926): 557-615.
- HILBERT, D. *MATHEMATISCHE PROBLEME*. VOL. 3, IN *MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE KLASSE*, 253-297. GÖTTINGEN: NACHRICHTEN VON DER KÖNIGLICHE GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN, 1900.
- HILBERT, D. *DIE GRUNDLAGEN DER PHYSIK*. VOL. 2, IN *MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE KLASSE*, 396-407. GÖTTINGEN: NACHRICHTEN VON DER KÖNIGLICHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN, 1915.
- KOVALEVSKAYA, S. "ZUR THEORIE DER PARTIELLEN DIFFERENTIALGLEICHUNGEN." *JOURNAL FÜR DIE REINE UND ANGEWANDTE MATHEMATIK* 80 (1875): 1-32.
- LOBACHEVSKY, N. "GÉOMÉTRIE IMAGINAIRE." *JOURNAL FÜR DIE REINE UND ANGEWANDTE MATHEMATIK* 17 (1837): 295-320.
- NOETHER, E. "INVARIANTE VARIATIONSPROBLEME." IN *MATHEMATISCH-PHYSIKALISCHE KLASSE*, 235-257. GÖTTINGEN: NACHRICHTEN VON DER GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN, 1918.
- PLANCK, M. "UEBER DAS GESETZ DER ENERGIEVERTEILUNG IM NORMALSPECTRUM." *ANNALEN DER*

- PHYSIK 309 (1901): 553-563.
- PERELMAN, G. "THE ENTROPY FORMULA FOR THE Poincaré, H. "SUR LE PROBLÈME DES TROIS CORPS ET LES ÉQUATIONS DE LA DYNAMIQUE." ACTA MATHEMATICA, 1890: 1-270.
- RIEMANN, B. UEBER DIE HYPOTHESEN, WELCHE DER GEOMETRIE ZU GRUNDE LIEGEN. VOL. 13, IN ABHANDLUNGEN DER KÖNIGLICHEN GESELLSCHAFT DER WISSENSCHAFTEN ZU GÖTTINGEN, 133-150. GÖTTINGEN: DIETERICH'SCHE VERLAGS-BUCHHANDLUNG, 1868.
- SEIBERG, N. AND WITTEN, E. "STRING THEORY AND NONCOMMUTATIVE GEOMETRY. " JOURNAL OF HIGH ENERGY PHYSICS 9 (1999): 032.
- SCHRÖDINGER, E. "QUANTISIERUNG ALS EIGENWERTPROBLEM." ANNALEN DER PHYSIK 79 (1926): 361-376.
- TURING, A. "COMPUTING MACHINERY AND INTELLIGENCE." MIND 59 (1950): 433-460.
- VON NEUMANN, J. "DIE EINDEUTIGKEIT DER SCHRÖDINGERSCHEN OPERATOREN." MATHEMATISCHE ANNALEN 104 (1931): 570-578.
- VON NEUMANN, J. MATHEMATISCHE GRUNDLAGEN DER QUANTENMECHANIK. BERLIN: J. SPRINGER, 1932.
- WEIL, A. "NUMBERS OF SOLUTIONS OF EQUATIONS IN FINITE FIELDS." BULLETIN OF THE AMS 55 (1949): 497-508.
- WEYL, H. SYMMETRY. PRINCETON: UNIVERSITY PRESS, 1952.
- WILES, A. "MODULAR ELLIPTIC CURVES AND FERMAT'S LAST THEOREM." ANNALS OF MATHEMATICS 141 (1995): 443-551.
- WITTEN, E., P. CANDELAS, G. T. HOROWITZ AND A. STROMINGER, A. 1985. "VACUUM CONFIGURATIONS FOR SUPERSTRINGS." NUCLEAR PHYSICS B 258, 46-74.
- WITTEN, E. "STRING THEORY DYNAMICS IN VARIOUS DIMENSIONS." NUCLEAR PHYSICS B. 443 (1995): 85-126.
- YAU, S.-T. "CALABI'S CONJECTURE AND SOME NEW RESULTS IN ALGEBRAIC GEOMETRY." PNAS 74 (1977): 1798-1799.



La ciencia de la ecología en México ante los retos del cambio global

Irerí Suazo-Ortuño, Miguel Martínez-Ramos y Ek del Val de Gortari

Para citar este artículo: Suazo-Ortuño I., Martínez-Ramos M y Del Val de Gortari E. 2022. La ciencia de la ecología en México ante los retos del cambio global. Ciencia Nicolaita, número 83, 232-247 XX. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.579>

Online

[Ver material suplementario](#)

View

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

La ciencia de la ecología en México ante los retos del cambio global

Ireri Suazo-Ortuño^{1*}, Miguel Martínez-Ramos² y Ek del Val de Gortari²

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones sobre los Recursos Naturales, México

²Universidad Nacional Autónoma de México Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Morelia

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 22 de septiembre de 2021

Aceptado: 31 de octubre de 2021

RESUMEN

La ciencia de la ecología busca entender las causas que determinan la abundancia y distribución de los seres vivos. Durante las últimas cinco décadas se ha ido construyendo en México un acervo rico, diverso y creciente de conocimientos ecológicos que son fundamentales para aportar lineamientos y acciones para la conservación, restauración y aprovechamiento sustentable de ecosistemas, su biodiversidad, funciones y contribuciones a las personas. En el presente artículo se analizan los principales temas que se discutieron durante el simposio organizado por la Sociedad Científica Mexicana de Ecología en el 2021 cuyo lema fue “La ecología ante los retos del cambio global: lecciones, avances y oportunidades”. En el simposio participaron académicas, académicos y tomadores de decisiones con diferentes enfoques y experiencias que laboran en diferentes instituciones del país. El conocimiento aportado por el simposio tiene un elevado potencial para aplicarse en beneficio de la sociedad, pero es necesario que las agendas de investigación sobre el cambio global surjan no sólo del impulso intelectual de la ciencia, sino de la acción y de las necesidades y objetivos de la sociedad como un todo. Por ello, argumentamos que es importante fortalecer la investigación y la formación de estudiantes en este campo de estudio, y en otros relacionados con la relación sociedad-naturaleza, adoptando perspectivas socioecológicas y transdisciplinarias.

PALABRAS CLAVE: Ecología, Sociedad Científica Mexicana de Ecología, crisis ambiental

ABSTRACT

The science of ecology aims to understand the causes that determine the abundance and distribution of living beings. During the last five decades, a rich, diverse and growing body of ecological knowledge has been built in Mexico, which is fundamental to provide guidelines and actions for the conservation, restoration and sustainable use of ecosystems, their biodiversity, functions, and contributions to people. This paper analyzes the main topics that were discussed during the symposium organized by the Mexican Scientific Society of Ecology in 2021 whose theme was “Ecology in the face of the challenges of global change: lessons, advances and opportunities”. Academics and decision makers with different expertise and from different institutions of Mexico participated in the symposium. The contributions reached by the symposium has a high potential to be applied for the benefit of society, but it is necessary that research agendas on global change arise not only from the intellectual impulse of science, but from the actions, needs, and objectives of society as a whole. For this reason, we argue that it is important to strengthen research and the training of students in this field of study, and in others related to the society-nature relationship, adopting socio-ecological and transdisciplinary approaches.

KEYWORDS: Ecology, Sociedad Mexicana de Ecología, environmental crisis

Introducción

La ciencia de la ecología busca entender las causas que determinan la abundancia y distribución de los seres vivos a través del espacio y tiempo, así como los procesos y mecanismos determinantes de la estructura, dinámica y funcionamiento de los ecosistemas (modificado de Krebs, 1978). Si bien esta ciencia se desarrolló a partir del estudio de la historia natural de los organismos, actualmente ha extendido su campo de estudio para entender los efectos de las actividades humanas sobre los fenómenos ecológicos. Durante las últimas cinco décadas, en México se ha ido construyendo un acervo rico, diverso y creciente de conocimientos ecológicos que son sumamente útiles para definir lineamientos y acciones para la conservación, restauración y aprovechamiento sustentable de ecosistemas, su biodiversidad, funciones y contribuciones a las personas (anteriormente llamado servicios ecosistémicos; Martínez-Ramos *et al.* 2012). Además, este conocimiento tiene un elevado potencial para aplicarse en beneficio de la sociedad (e.g. Torres Rojo *et al.* 2002, Golubov *et al.* 2009, Hernández *et al.* 2010, Landgrave y Moreno-Casasola 2012, Gómez-Romero *et al.* 2012, Koleff *et al.* 2012, Chapin *et al.* 2013, Dirzo *et al.* 2014, List *et al.* 2017, López-Barrera *et al.* 2017, García-Barrios y González-Espinosa 2017, Aguirre-Muñoz *et al.* 2018, Pontifes *et al.* 2018, Narchi *et al.* 2018, Booco *et al.* 2019, Camacho-Cervantes 2019, Murray-Tortarolo y Jaramillo 2019, Mendoza *et al.* 2020, Koleff *et al.* 2021, Woodman 2021). No obstante, aún queda pendiente que el conocimiento generado sea usado para generar estrategias que coadyuven a la construcción de políticas públicas para la conservación, para atender con bases científicas la planeación de desarrollo y la normatividad

ambiental, así como para abordar los problemas generados por el cambio global con una perspectiva socioecológica. Existen barreras de comunicación y de colaboración con los tomadores de decisiones. Por ello, se requiere que la movilidad del conocimiento se haga horizontal, considerando las necesidades y aspiraciones de los usuarios interesados. La resolución de las problemáticas ambientales y socioecológicas es compleja y tiene un alto grado de incertidumbre. Su abordaje requiere de un examen desde diversas perspectivas, de conocimientos de diferentes disciplinas y de la participación conjunta de personas que actúan fuera y dentro de la academia.

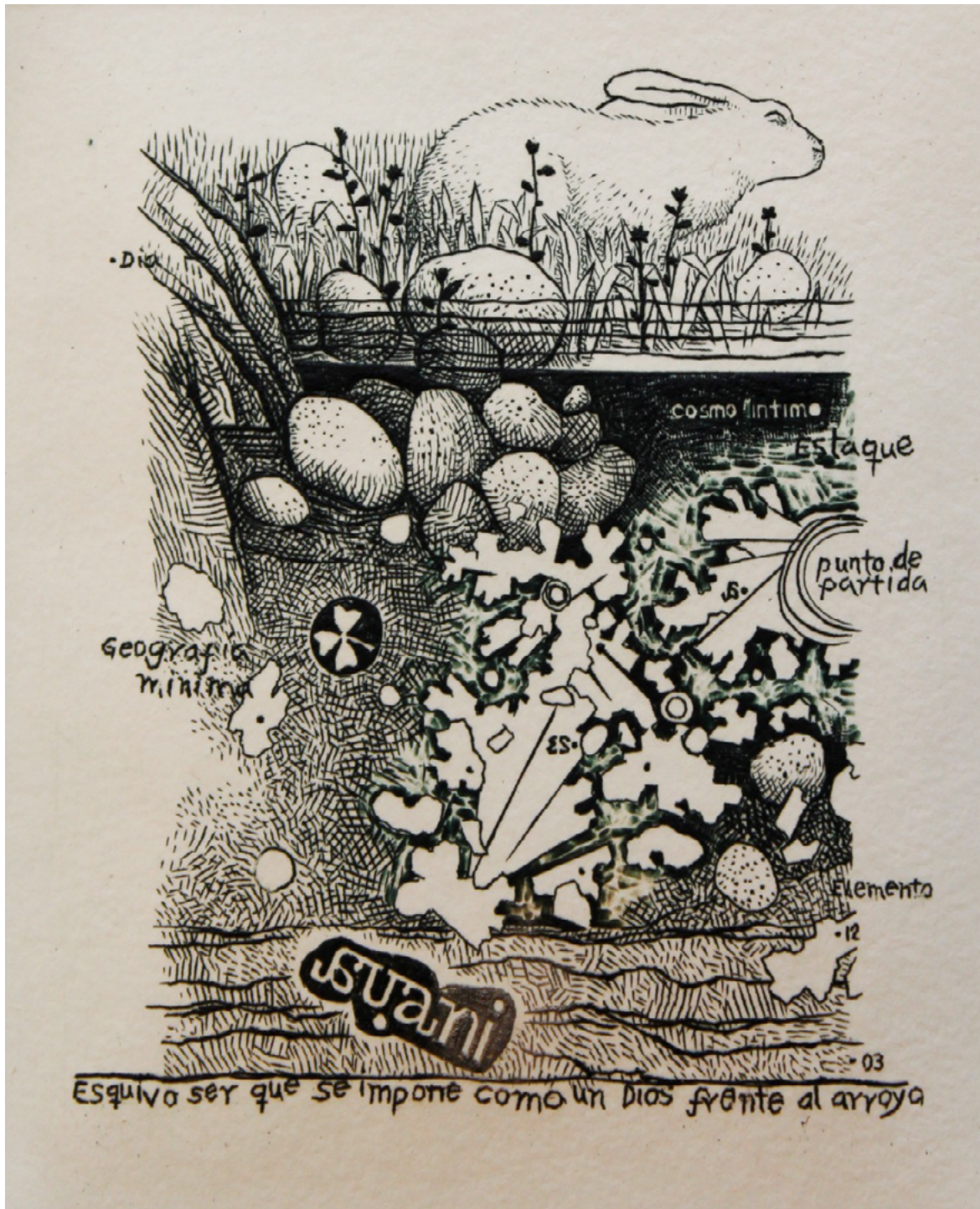
México cuenta con instituciones académicas, gubernamentales y de la sociedad civil que, en colaboración, podrían potenciar políticas y programas socioecológicos que promuevan la conservación, restauración y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas. Para ello se requiere un trabajo persistente para lograr la colaboración. En este contexto, en abril 2021 se llevó a cabo un simposio organizado por la Sociedad Científica Mexicana de Ecología, con académicas, académicos y tomadores de decisiones de diferentes áreas de conocimiento para discutir sobre el estado del arte de la ecología en México relacionado con los retos ante el cambio global. En el presente artículo se exponen los principales aportes y desafíos que se discutieron durante el simposio en seis líneas de conocimiento: 1) cambio climático, adaptación y mitigación, 2) contaminación, agua, tierra, aire y su remediación, 3) pérdida de biodiversidad, conservación, restauración y sustentabilidad, 4) especies invasoras, plagas, enfermedades emergentes, 5) conocimiento en política pública, economía y gobernanza, y 6) la transdisciplina como herramienta para el abordaje de sistemas socioecológicos.

Cambio climático, adaptación y mitigación

El cambio climático global ha sido considerado por la Organización de las Naciones Unidas (2021) como una amenaza para la vida en el planeta. Este fenómeno se define como la variación global de los climas en la Tierra, que puede ser resultado de causas naturales o por la acción del hombre, modificando la incidencia e intensidad de fenómenos abióticos (incendios, sequías, huracanes, ventarrones, heladas, nevadas, etc.) y afectando los diferentes componentes de la biosfera (Seller 1965, Avissar y Werth 2004, Gibbard *et al.* 2005, Murray-Tortarolo 2021). Aunque a lo largo de la historia de la Tierra se han presentado grandes cambios climáticos globales de manera natural, entre los científicos existe un consenso generalizado de que la actual alteración climática global es el resultado de la actividad humana, principalmente de nuestro modo de producción y consumo energético (Meli *et al.* 2015, Murray-Tortarolo, 2021, Meli *et al.* 2015, Cuervo-Robayo *et al.* 2020). A nivel global, los cambios contemporáneos de la temperatura atmosférica han sido marcadamente variables entre regiones, con algunas áreas geográficas mostrando tendencias de enfriamiento a pesar del patrón global de calentamiento de la atmósfera (Hansen *et al.* 2012). La combinación de las tasas de variación espacial y temporal del cambio climático subraya la importancia de considerar la historia y la geografía al examinar las distribuciones biogeográficas actuales de las especies y al realizar pronósticos de cambios futuros en tales distribuciones (Murray-Tortarolo 2021). Bajo la incidencia de eventos climáticos extremos o que se presentan por ciclos decenales, la velocidad de retorno de los límites de distri-

bución está determinada por la capacidad de dispersión de las especies. Las especies con tasas lentas de dispersión pueden tardar décadas en recuperarse de un solo evento extremo. Por el contrario, las especies que tienen tasas rápidas de dispersión pueden ser capaces de expandirse rápidamente en condiciones favorables (Wetthey *et al.* 2011). Por lo tanto, es importante considerar las escalas espaciales y temporales de los impactos de la variabilidad climática y, sobre todo, de los eventos climáticos extremos.

Para el caso de México, existe un número considerable de artículos científicos que evalúan la respuesta de la biodiversidad y de los ecosistemas al cambio climático (e.g. Parra-Olea *et al.* 2005, Ballesteros-Barrera *et al.* 2007, Gómez-Mendoza 2007, Trejo *et al.* 2011, Ochoa-Ochoa *et al.* 2012, Téllez-Valdés *et al.* 2013, Gelviz-Gelvez *et al.* 2015, Mendoza-Ponce *et al.* 2018). La mayoría de los ecólogos mexicanos coinciden en considerar que las condiciones de desigualdad socioeconómica que vive la sociedad mexicana, la amplia variabilidad geográfica y climática presente en el territorio nacional, así como la fragilidad de muchos de los ecosistemas naturales encontrados en México, vuelven al país sumamente vulnerable al cambio climático. Por ello, el cambio climático demanda una atención urgente, multi, inter o transdisciplinaria, holística y transversal que debe considerar a todos los sectores de la población y de los órdenes de gobierno. Las acciones de mitigación y adaptación deberán llevarse a cabo en las comunidades humanas y regiones naturales, particularmente en zonas vulnerables, con la participación de comunidades locales y privilegiando el enfoque de género y de justicia socioambiental. También es crucial el desarrollo de criterios y esquemas de monitoreo y evaluación de la adaptación a los nuevos escenarios ambientales provocados por el cambio climático global.



TÍTULO. **BOSQUE ANTIGUO**

TÉCNICA: GRABADO A BURIL

DIMENSIONES: 10 X 8 CM.

AÑO: 2021

Contaminación y remediación

Las principales fuentes de contaminación del agua, tierra y aire se encuentran asociadas con las actividades humanas de diversa índole. A nivel global, diariamente se producen millones de toneladas de desechos industriales, agrícolas y residuales que se vierten en ríos, lagos y mares (Mendoza *et al.* 2018). A la atmósfera se emiten gases de efecto invernadero producto de la producción y consumo de combustibles fósiles (Benjamín y Masera 2001). El suelo se contamina por químicos tóxicos (agroquímicos, herbicidas, pesticidas) que se emplean particularmente en la agricultura, por la presencia de residuos como los jales (apilamientos de roca molida) y drenes asociados a la actividad minera y por los residuos plásticos y microplásticos, entre otros (Ramírez *et al.* 2003). Adicionalmente los contaminantes de suelo y agua eventualmente arriban al océano donde, aunado a los efectos ambientales del cambio climático global, producen modificaciones en la temperatura del agua, cambios en los patrones de circulación marina y alteraciones de anomalías oceánicas interdecadales como El Niño y La Niña (Magaña *et al.* 2003). Estas modificaciones generan cambios en la disponibilidad de nutrientes, así como en las variables fisicoquímicas y bio-ópticas a través de la columna de agua (Lachniet *et al.* 2012) propiciando, entre otros efectos negativos, la generación de floramientos algales nocivos y la facilitación de invasión de especies exóticas (Olivos-Ortíz *et al.* 2016).

En aras del crecimiento económico, frecuentemente se impulsan acciones que resultan en la destrucción o degradación del ambiente, como el uso indiscriminado de productos contaminantes del aire, agua y suelo. Numerosas investigaciones muestran que estos productos están ejerciendo una fuerte presión sobre los ecosistemas y los recursos naturales (PNUD 2020). Por ejemplo, el acele-

rado crecimiento de la población humana mundial y el consecuente aumento en la demanda y producción de alimentos, ha dado como resultado que el sector agrícola acapare el 70% de la demanda global de agua dulce. Además, las aguas negras y residuales son frecuentemente usadas para el riego agrícola de aproximadamente 20 millones de hectáreas a nivel global (Winpenny *et al.* 2013). Este uso se traduce en un gran problema de salud pública por el alto contenido de agentes patógenos o tóxicos presentes en las aguas negras y residuales. Asimismo, el uso de estas aguas pueden generar dos serios problemas ambientales adicionales: la disminución de la concentración de oxígeno y la eutroficación por enriquecimiento con nutrientes minerales (Cajuste, *et al.* 2001).

En el contexto anterior existen grandes desafíos para remediar lo que hasta ahora se ha dañado y evitar que el aire, suelo y agua continúen degradándose. En respuesta, existen numerosos trabajos elaborados por los ecólogos que pueden ponerse en práctica para recuperar la calidad ambiental y caminar hacia la sustentabilidad. Por ejemplo, existe información científica sobre la movilidad de los contaminantes en los ambientes, la cual podría usarse para desarrollar estrategias de mitigación (Martínez-Villegas *et al.* 2013).

Asimismo se tiene el desarrollo de procesos innovativos, como la biorremediación para la mitigación del efecto de contaminantes y de modelos estadísticos o fenomenológicos que pueden aplicarse a la estimación de posibles escenarios de riesgo para diferentes ecosistemas y sus componentes bióticos y abióticos, entre otros (Jiménez 2001; Quiroz-Benítez 2013).

Pérdida de biodiversidad, conservación, restauración y sustentabilidad

La biodiversidad, definida aquí como el

total de las poblaciones de las especies existentes distribuidas en los diferentes hábitats y ecosistemas de la tierra, está experimentando un dramático declive global debido a factores asociados a las actividades humanas (Dirzo *et al.* 2014). En general, la pérdida de la biodiversidad tiende a reducir las interacciones bióticas que ocurren en el ecosistema y generalmente reduce la salud y estabilidad de los ecosistemas (Naeem *et al.* 2009). Un nutrido cuerpo de información, derivado de investigaciones confiables en diferentes partes del mundo, indica la gravedad de la pérdida de biodiversidad. Es tal la reducción de la biodiversidad por acciones humanas que numerosos científicos y conservacionistas han propuesto que el nombre de la época geológica actual (Holoceno) se cambie por el de Antropoceno (del griego *anthropos* = humano y *kainos* = recién creado o nacido; Dirzo *et al.* 2014).

De acuerdo con la Plataforma Intergubernamental Científico-Normativa sobre Diversidad Biológica y Servicios de los Ecosistemas (IPBES), de los aproximadamente ocho millones de especies identificadas a nivel global, un millón de ellas se encuentra actualmente en peligro de extinción, una cifra de diez a cientos de veces mayor que la registrada durante los últimos diez millones de años (IPBES 2019). Las principales causas de esta erosión biológica están asociadas a las actividades humanas. La extirpación de especies y poblaciones, así como la disminución de la abundancia de especies locales son una forma reconocida del cambio global. Entre los vertebrados terrestres, 322 especies se han extinguido desde el año 1500 y las poblaciones de las especies restantes muestran una disminución promedio del 25% en abundancia. Esta disminución en abundancia animal está resultando en efectos negativos sobre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano (Dirzo *et al.* 2014).

Adicionalmente, debido a esta disminución diversos servicios de los ecosistemas se están perdiendo ya sea de manera directa o indirecta, a través de una cascada de efectos. La pérdida de especies o la disminución de la abundancia de especies, de abejas, mariposas, aves y murciélagos está afectando negativamente la eficiencia de la polinización, el control de plagas y el reciclaje de nutrientes (Arizmendi *et al.* 2019). Además de lo anterior, la pérdida de biodiversidad afecta la calidad del agua y otros recursos naturales, la salud humana, así como a los procesos evolutivos de las especies. Ante estos escenarios, la conservación, restauración y uso sustentable de la biodiversidad es prioritario para la viabilidad a mediano y largo plazo de las sociedades humanas.

Generalmente la restauración ecológica se percibe como una intervención para la recuperación de propiedades perdidas de los ecosistemas, en casos en los que la conservación o la gestión sostenible no han logrado prevenir la pérdida o degradación de los hábitats naturales. Frecuentemente la restauración tiene un alto potencial para asegurar las contribuciones de la naturaleza a la sociedad, pero brindan pocos beneficios a la biodiversidad nativa. Cuando se prioriza la restauración de hábitats para mitigar el cambio climático mediante la maximización del almacenamiento de carbono, se pueden descuidar las acciones para conservar o mejorar la biodiversidad. Sin embargo, la restauración de ecosistemas y paisajes presenta posibilidades de lograr múltiples objetivos. De acuerdo con Chazdon (2021) se proponen cinco pautas para la práctica de la restauración para realizar la recuperación de la biodiversidad nativa: (1) adoptar un enfoque de paisaje basado en la restauración de corredores entre parches de hábitat remanentes; (2) considerar el movimiento de las especies para el establecimiento de corredores biológicos en paisajes específicos; (3)



TÍTULO. OGIGIA

TÉCNICA: GRABADO A BURIL

DIMENSIONES: 9 X 10 CM.

AÑO: 2017

identificar áreas donde la restauración puede ser de bajo costo utilizando la regeneración natural asistida, la cual ofrece un alto potencial para conservar la biodiversidad nativa; (4) utilizar especies de plantas de interés para la conservación en las plantaciones usadas en acciones de restauración; (5) guiar la planificación de la restauración utilizando herramientas de priorización espacial basadas en múltiples criterios. Además es importante considerar que dado el enorme impacto que hemos tenido sobre los ecosistemas y sus procesos, es necesario que el desarrollo sea sustentable, de tal manera que exista un equilibrio entre la conservación del medio ambiente y el uso de los recursos naturales para garantizar que el desarrollo no degrade la biodiversidad.

Especies invasoras, plagas, enfermedades emergentes

Las especies exóticas invasoras alteran las redes tróficas y el funcionamiento de los ecosistemas, cambian patrones de distribución de especies y además son reservorios de patógenos invasores, emergentes y reemergentes que impactan la salud de la vegetación, la fauna doméstica o silvestre y, con frecuencia, a las personas (Vitousek *et al.* 1996). Las plagas y enfermedades emergentes van también en aumento por factores derivados del desarrollo económico y de los cambios en el uso del suelo (Aguirre *et al.* 2009). Las presiones comerciales y el crecimiento de la población humana han resultado en el aumento de asentamientos humanos en bosques y selvas, exponiendo a los pobladores a agentes exóticos y enfermedades enzoóticas como la fiebre amarilla, la rabia transmitida por murciélagos, las fiebres hemorrágicas por Arenavirus y, recientemente, el virus SARS-CoV2 causante de la enfermedad COVID-19 (Suzán *et al.* 2015, Córdoba-Aguilar *et al.* 2021). En tiempos recientes se ha registrado en el mundo un aumento marcado en la emergencia o reemer-

gencia de eventos epidemiológicos. De aquí la necesidad de incluir a los patógenos invasores emergentes y reemergentes como parte de los protocolos de investigación sobre la biodiversidad. Esta avenida de investigación es crítica para identificar escenarios de riesgo para la conservación de las especies, para la salud de los ecosistemas y para la salud pública. Adicionalmente, se subraya la necesidad de desarrollar herramientas innovadoras de modelación para identificar escenarios de riesgo e incluir aproximaciones multipatógeno, multi-hospedero y multivector para entender sistemas complejos ante los nuevos escenarios del cambio climático global (Koleff *et al.* 2021).

A pesar de que en México se tienen importantes avances en el conocimiento de las especies exóticas invasoras presentes en el país, es necesario resaltar y replicar los importantes esfuerzos que ya se llevan a cabo. Igualmente es importante impulsar el desarrollo e implementación de técnicas novedosas para ayudar a la prevención y manejo de especies exóticas invasoras en nuestro país (Díaz *et al.* 2021). Una herramienta importante para enfrentar el problema de especies invasoras es el uso de atlas como compiladores de datos sobre grupos específicos de tales especies. Los atlas tienen la ventaja de proporcionar información precisa sobre la incidencia de las especies que son de interés (Díaz *et al.* 2021). En México se ha implementado un sistema de atlas para evaluar el estado de invasión de plantas exóticas presentes en la Reserva de la Biósfera Sierra Gorda, a las cuales se les asignó un riesgo de invasión, mapas de extensión y ocupación y se generaron mapas de riesgo para el área de estudio. De las 215 especies registradas, 90 corresponden a especies exóticas, 125 a especies nativas y 154 a especies de malezas (Ramírez 2016). El método usado puede ser empleado para el inventario y monitoreo de especies exóticas invasoras. A partir de la información generada, se pueden elaborar programas de

manejo, control y erradicación para aquellas especies exóticas que todavía podrían ser controladas. Los esfuerzos para evitar o mitigar los efectos negativos de las especies invasoras deben considerar las fases de: introducción, establecimiento y expansión (Comité Nacional Asesor sobre Especies Invasoras 2010). En México hay controles fitosanitarios para frenar la entrada de nuevo germoplasma, pero estos esfuerzos no siempre son suficientes y no funcionan para especies que se introducen intencionalmente. Aunque se han realizado algunas campañas esporádicas para intentar erradicar especies invasoras ya establecidas en áreas sensibles, estas no han mostrado buenos resultados ya que se requieren campañas continuas de largo aliento y que involucren la colaboración de los pobladores locales (Aguirre-Muñoz *et al.* 2018).

Conocimiento en política pública, economía y gobernanza

El conocimiento ecológico ha avanzado a un ritmo importante durante los últimos años. Sin embargo, los problemas ambientales son ahora más complejos y diversos. En general prevalece la idea de que se requiere más información ecológica para solucionar los problemas asociados al cambio global actual. Sin embargo, estos problemas continuarán agravando el estado de conservación de los ecosistemas y el bienestar humano, a menos que se pongan en práctica estrategias de mitigación, remediación y adaptación que están más allá de la esfera de la investigación ecológica. Los problemas ambientales del cambio global actual han surgido de esferas económicas, políticas y sociales, por lo que es necesario que las agendas de investigación en sostenibilidad surjan no sólo del impulso intelectual de la ciencia, sino de la acción y de las necesidades y objetivos de la sociedad como un todo. Esto es, se requiere de conocimiento ecológico que sea utilizable en la planeación y

ejecución de los grandes proyectos nacionales. El reto es lograr productos de planeación y toma de decisiones que consideren la vulnerabilidad y la adaptación al cambio global como propiedades emergentes e inciertas de sistemas socioecológicos en constante cambio. No basta la integración del conocimiento ecológico en actividades transdisciplinarias, sino también que sea pertinente en el contexto de los paradigmas de toma de decisiones bajo marcadas condiciones de incertidumbre y complejidad. Por lo tanto, la ecología debe estar estrechamente ligada con la política pública para alcanzar un desarrollo sustentable (Osborne 2021).

La gravedad y complejidad de los problemas ambientales que enfrentamos en la actualidad rebasan por mucho la capacidad de acción de un solo sector de la sociedad. Es por ello que para diseñar e implementar soluciones efectivas y equitativas a dichos problemas se requiere de la colaboración de múltiples actores sociales (gobierno, academia, organizaciones de la sociedad civil, empresas, comunidades locales, entre otros). La gobernanza ambiental, entendida como el conjunto de instituciones, mecanismos y organizaciones por medio de las cuales los actores del estado y de la sociedad ejercen poder y participan en la toma de decisiones, propone formas horizontales de gobernar que van más allá del Estado.

Considerando lo anterior, para lograr enfoques de gobernanza legítimos e innovadores es necesario entender los procesos por medio de los cuales los diversos actores colaboran, participan en la toma de decisiones y generan conocimiento de manera conjunta para el mejoramiento ambiental. La dinámica de las alianzas multisectoriales ha sido abordada principalmente en colaboraciones internacionales de alto nivel, mientras que las alianzas locales, en regiones de capacidad limitada, han sido menos exploradas a pesar de



TÍTULO. ESTANQUE II
TÉCNICA: GRABADO A BURIL
DIMENSIONES: 10 x 8 CM.
AÑO: 2019



TÍTULO. ESTANQUE I
TÉCNICA: GRABADO A BURIL
DIMENSIONES: 10 x 8 CM.
AÑO: 2019

su importancia para la sustentabilidad global. Por lo que analizar la colaboración multisectorial a escala global y local, la identificación de obstáculos y las oportunidades son esenciales para avanzar en la cogeneración de conocimiento y prácticas para la acción ambiental y la transformación socioecológica. En el caso de estudios de empresas forestales se han cogenerado política públicas, planes económicos y de gobernanza con el fin de: mejorar la calidad de vida de los miembros de la comunidad al mismo tiempo que se conserva el medio ambiente; identificar los instrumentos de política pública que favorecen la consolidación de las empresas como estrategias de producción y conservación; e identificar los factores y requerimientos necesarios para que estas formas de producción puedan ser sustentables económica, social y ambientalmente.

La humanidad vive una profunda y extendida crisis ambiental que nos sugiere que la existencia humana no puede concebirse separada del mantenimiento de los ecosistemas y de los beneficios que las sociedades obtienen de éstos (Osborne 2021). Por lo tanto, el enfoque transdisciplinar emerge como una aproximación viable para mejorar la calidad y eficacia de la generación de conocimiento para la transformación social, especialmente en el ámbito de la construcción de opciones de desarrollo sustentable significativas y realizables (Rist y Delgado 2016, Merçon 2018). Los sistemas socioecológicos se conciben integrados por los subsistemas biofísicos y social, cada uno comprendiendo una plétora de variables y factores que son mutuamente interdependientes y cambiantes en el espacio y tiempo, vinculando de manera indisoluble a la gente con la naturaleza (Gallopín 2003). Para mantener tales beneficios es necesario realizar acciones de conservación, uso, restauración y ordenamiento de los ecosistemas, su biodiversidad y funcionamiento con bases

sostenibles. Las interacciones socioecológicas en un sitio dado se desarrollan en un contexto de cambio global y de distintas dinámicas temporales (Balvanera *et al.* 2017). Por ello, en la búsqueda de la mitigación, adaptación o remediación de fenómenos causados por el cambio global, es imperativo contar con un enfoque socioecológico, el cual se dirige a explorar y entender sistemas complejos de alta incertidumbre, sujetos a un complejo de valores (Funtowics y Ravetz 1993).

Como hemos revisado en este artículo, el cambio global se manifiesta en múltiples facetas (cambio climático, contaminación de agua, tierra, aire, la pérdida de biodiversidad y la incidencia de especies invasoras, plagas, enfermedades emergentes, entre otras) y ha resultado del uso de tecnologías contaminantes e ineficientes, bajo un esquema de desarrollo de grandes mercados que priorizan el crecimiento económico a costa de la desigualdad social y la degradación ambiental. La inequidad económica, la erosión de culturas, de conocimientos y técnicas locales, la falta de credibilidad a la ciencia y la escucha de saberes ancestrales y la pérdida de las instituciones comunitarias y regionales son también manifestaciones del cambio global (Lambin *et al.*, 2001). Esta crisis no sólo demanda nuevos enfoques de investigación que sean capaces de resolver problemas complejos, sino también demanda de prácticas que den soluciones urgentes ante una crisis que amenaza la vida en el planeta Tierra, incluyendo a la propia humanidad (Hamilton *et al.*, 2015). Una conclusión fundamental es la necesidad de reconocer y abordar, en forma integrada, el estudio de los procesos naturales y sociales. La propuesta es adoptar un principio de complejidad que supere el conocimiento de mundos separados, donde ni las ciencias del hombre tienen conciencia del carácter físico y biológico de los fenómenos humanos, ni las ciencias de la natu-

raleza tienen conciencia de su inscripción en una cultura, una sociedad, una historia (García, 1994, Morin, 2001). En las últimas décadas han surgido y se han consolidado áreas de conocimiento que integran el estudio de la naturaleza y la sociedad. Asimismo, son cada vez más frecuentes los esfuerzos por realizar investigación y desarrollar tecnologías con la participación de diferentes especialidades y de comunidades distintas a la académica. Esta confluencia es indispensable para transitar a la conservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad y los ecosistemas, al control de especies invasoras, al control biológico de plagas y malezas, a la restauración de ambientes degradados y contaminados, a la producción agroecológica, a la ganadería holística, a la pesca y acuicultura sustentables y al desarrollo de ciudades sustentables, entre otros grandes temas del desarrollo sustentable con justicia socioambiental.

Agradecimientos

Agradecemos a todas las personas que hicieron posible el simposio “La ecología ante los retos del cambio global: lecciones, avances y oportunidades” organizado por la SCME y llevado a cabo de manera virtual los días 15 y 16 de abril de 2021. R. Chazdon, G.C. Delgado, J. Merçon, J. Sarukhán participaron como conferencistas magistrales. P. Balvanera, A. Estrada, L. Pech, H. Rodríguez, L. Salas, Y. Venegas participaron como panelistas. J. Azahara, B. Ayala, G. Bocco, L. Bojórquez, M. Camacho Cervantes, M. Caso, L. Cortés Palacios, Ch. Siebe, R. Dirzo, L. García Barrios, J. Golubov, A. González-González, A.I. González Martínez, S. Guzmán Luna, L. E. Huber-Sannwald, P. Koleff, M. Latosfski, F. López Barrera, L. López Toledo, R. List, M. Masari, P. Moreno Casasola, A. Olivos Ortiz, N. Ramírez Álvarez, J. Rendón, H. Reyes Bonilla, J.M. Torres Rojo, C. Sáenz, G. Suzan,

H. Vibrans participaron como ponentes en simposio. Agradecemos a los miembros del Consejo Directivo y Presidencias Regionales de la SCME cuya labor fue fundamental para el éxito del simposio. Quisiéramos agradecer al CONACYT por el apoyo otorgado al Programa de la Sociedad Científica Mexicana de Ecología para la promoción, difusión y acceso universal al conocimiento en materia de ecología para la sociedad mexicana en la convocatoria 000000000317522.

Bibliografía

- AGUIRRE MUÑOZ, A., M. ALFARO, E. GUTIÉRREZ Y S. MORALES. 2009. ESPECIES EXÓTICAS INVASORAS: IMPACTOS SOBRE LAS POBLACIONES DE FLORA Y FAUNA, LOS PROCESOS ECOLÓGICOS Y LA ECONOMÍA, EN CAPITAL NATURAL DE MÉXICO, VOL. II: ESTADO DE CONSERVACIÓN Y TENDENCIAS DE CAMBIO. *CONABIO, MÉXICO*, PP. 277-318.
- AGUIRRE-MUÑOZ, A., Y. BEDOLLA-GUZMÁN, J. HERNÁNDEZ-MONTOYA, M. LATOSFSKI-ROBLES, L. LUNA-MENDOZA, F. MÉNDEZ-SÁNCHEZ, A. ORTIZ-ALCARAZ, E. ROJAS-MAYORAL Y A. SAMANIEGO-HERRERA. 2018. The CONSERVATION AND RESTORATION OF THE MEXICAN ISLANDS, A SUCCESSFUL COMPREHENSIVE AND COLLABORATIVE APPROACH RELEVANT FOR GLOBAL BIODIVERSITY, EN MEXICAN NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND BIODIVERSITY CONSERVATION, SPRINGER, CHAM, PP. 177-192.
- ARIZMENDI, M. C., A. ESCALANTE, M. R. ORTEGA, A. C. AGUILAR, R. L. SAADE, O. T. VALDÉS, P.A. DÁVILA, C. MUENCH, G. CEBALLOS, A. GARCÍA Y P. ÁLVAREZ-ICAIZA. 2019. LAS CONDICIONES DE LA BIODIVERSIDAD: DIAGNÓSTICO Y POLÍTICA PÚBLICA. CRISIS AMBIENTAL EN MÉXICO. *RUTA PARA EL CAMBIO. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO*, PP. 123-162.
- AVISSAR, R., R. R. DA SILVA Y D. WERTH. 2004. IMPLICATIONS OF TROPICAL DEFORESTATION FOR REGIONAL AND GLOBAL HYDROCLIMATE. *ECOSYSTEMS AND LAND USE CHANGE* 153: 73-83.
- BALVANERA, P., M. ASTIER, F. D. GURRI Y I. ZERMEÑO-HERNÁNDEZ. 2017. RESILIENCIA, VULNERABILIDAD Y SUSTENTABILIDAD DE SISTEMAS SOCIOECOLÓGICOS EN MÉXICO. *REVIS-*

- BALLESTEROS-BARRERA, C., E. MARTÍNEZ-MEYER Y H. GADSDEN. 2007. EFFECTS OF LAND-COVER TRANSFORMATION AND CLIMATE CHANGE ON THE DISTRIBUTION OF TWO MICROENDEMIC LIZARDS, GENUS *UMA*, OF NORTHERN MEXICO. *JOURNAL OF HERPETOLOGY* 41: 733-740.
- BENJAMÍN, J. A. Y O. MASERA. 2001. CAPTURA DE CARBONO ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO. *MADERA Y BOSQUES* 7: 3-12.
- BOCCO, G., B. S. CASTILLO, Q. OROZCO-RAMÍREZ Y A. ORTEGA-ITURRIAGA. 2019. LA AGRICULTURA EN TERRAZAS EN LA ADAPTACIÓN A LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA MIXTECA ALTA, OAXACA, MÉXICO. *JOURNAL OF LATIN AMERICAN GEOGRAPHY* 18: 141-168.
- CAJUSTE, L. J., A. V. ALARCÓN, C. D. E. GRABACH, G. A. GONZÁLEZ Y M. D. L. DE LA ISLA. 2001. CADMIO, NÍQUEL Y PLOMO EN AGUA RESIDUAL, SUELO Y CULTIVOS EN EL VALLE DEL MEZQUITAL, HIDALGO, MÉXICO. *AGROCIENCIA* 35: 267-274.
- CHAZDON, R. L. 2021. INVESTIGACIÓN TRANSDICIPLINARIA: COMUNIDADES DE APRENDIZAJE PARA LA TRANSFORMACIÓN SOCIOECOLÓGICA. REUNIÓN VIRTUAL DIÁLOGOS SOBRE LA ECOLOGÍA: LECCIONES, AVANCES Y OPORTUNIDADES. *SOCIEDAD CIENTÍFICA MEXICANA DE ECOLOGÍA. MEMORIAS*, pp. 207.
- CHAPINLL, F. S., O. E. SALA, E. HUBER-SANNWALD Y R. LEEMANS. 2013. THE FUTURE OF BIODIVERSITY IN A CHANGING WORLD, EN GLOBAL BIODIVERSITY IN A CHANGING ENVIRONMENT: SCENARIOS FOR THE 21ST CENTURY, *SPRINGER SCIENCE & BUSINESS MEDIA*, pp. 1-4.
- CAMACHO-CERVANTES, M., V. PALOMERA-HERNÁNDEZ Y C. M. GARCÍA. 2019. FORAGING BEHAVIOUR OF A NATIVE TOPMINNOW WHEN SHOALING WITH INVADERS. *AQUATIC INVASIONS* 14: 490-501.
- COMITÉ ASESOR NACIONAL SOBRE ESPECIES INVASORAS. 2010. ESTRATEGIA NACIONAL SOBRE ESPECIES INVASORAS EN MÉXICO, PREVENCIÓN, CONTROL Y ERRADICACIÓN. MÉXICO, *CONSEJO NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO), COMISIÓN NACIONAL DE ÁREAS NATURALES. PROTEGIDAS (CONANP), SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES (SEMARNAT)*, pp. 91.
- CÓRDOBA-AGUILAR, C., C. N. IBARRA-CERDEÑA, I. CASTRO-ARELLANO Y G. SUZAN. 2021. TACKLING ZONOSSES IN A CROWDED WORLD: LESSONS TO BE LEARNED FROM THE COVID-19 PANDEMIC. *ACTA TROPICA* 214: 105780.
- CUERVO-ROBAYO, A. P., C. URETA, M. A. GÓMEZ-ALBORES, A. K. MENESES-MOSQUERA, O. TÉLLEZ-VALDÉS Y E. MARTÍNEZ-MEYER. 2020. ONE HUNDRED YEARS OF CLIMATE CHANGE IN MEXICO. *PLOS ONE* 15: E0209808.
- DÍAZ, J. S., J. GOLUBOV, S. S. DE LA TORRE, C. M. RAMÍREZ-GUTIERREZ Y DEL M. C. MANDUJANO. 2021. INVASION POTENTIAL OF MEXICAN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS. *INVASIVE ALIEN SPECIES: OBSERVATIONS AND ISSUES FROM AROUND THE WORLD*. 4: 143-152.
- DIRZO, R., H. S. YOUNG, M. GALETTI, G. CEBALLOS, N. J. ISAAC Y B. COLLEN. 2014. DEFAUNATION IN THE ANTHROPOCENE. *SCIENCE* 345: 401-406.
- FUNTOWICS S. O. Y J. R. RAVETZ. 1993. SCIENCE FOR THE POST-NORMAL AGE. *FUTURES* 25: 739-755.
- GALLOPÍN, G. C. 2003. SOSTENIBILIDAD Y DESARROLLO SOSTENIBLE: UN ENFOQUE SISTÉMICO. *SERIE MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO. CEPAL*, pp. 44.
- GARCÍA, R. 1994. INTERDISCIPLINARIEDAD Y SISTEMAS COMPLEJOS, EN CIENCIAS SOCIALES Y FORMACIÓN AMBIENTAL, *ED. GEDISA, UNAM, BARCELONA, ESPAÑA*, pp. 85-124.
- GARCÍA-BARRIOS, L. Y M. GONZÁLEZ-ESPINOSA. 2017. INVESTIGACIÓN ECOLÓGICA PARTICIPATIVA COMO APOYO DE PROCESOS DE MANEJO Y RESTAURACIÓN FORESTAL, AGROFORESTAL Y SILVOPASTORIL EN TERRITORIOS CAMPESINOS. EXPERIENCIAS RECIENTES Y RETOS EN LA SIERRA MADRE DE CHIAPAS, MÉXICO. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD* 88: 129-140.
- GERARDO, S., G. E. GARCÍA-PENA, I. CASTRO-ARELLANO, O. RICO, A. V. RUBIO, M. J. TOLSA, B. ROCHE, P. R. HOSSEINI, A. RIZZOLI, K. A. MURRAY, C. ZAMBRANA-TORRELIO, M. VITTECOQ, X. BAILLY, A. A. AGUIRRE, P. DASZAK, A. H. PRIEUR-RICHARD, J. N. MILLS Y J. F. GUEGAN. 2015. METACOMMUNITY AND PHYLOGENETIC STRUCTURE DETERMINE WILDLIFE AND ZONOTIC INFECTIOUS DISEASE PATTERNS IN TIME AND SPACE. *ECOLOGY AND EVOLUTION* 5: 865-873.
- GIBBARD, S., K. CALDEIRA, G. BALA, T. J. PHILLIPS Y M. WICKETT. 2005. CLIMATE EFFECTS OF GLOBAL LAND COVER CHANGE. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 32: L23705.
- GELVIZ-GELVEZ, S. M., N. P. PAVÓN, P. ILLOLDI-RANGEL Y C. BALLESTEROS-BARRERA. 2015. ECOLOGICAL NICHE MODELING UNDER CLIMATE CHANGE TO SELECT SHRUBS FOR ECOLOGICAL RESTORATION IN CENTRAL MEXICO. *ECOLOGICAL ENGINEERING* 74: 302-309.
- GOLUBOV, J., M. C. MANDUJANO, S. GUERRERO-ELIOSA, R. M. MENDOZA, P. KOLEFF, A. I. GONZÁLEZ,

- BARRIOS C. Y. y G. BORN-SCHMIDT. 2014. ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA PONDERAR EL RIESGO DE LAS ESPECIES INVASORAS. MENDOZA, ESPECIES ACUÁTICAS INVASORAS EN MÉXICO, *COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD*, MÉXICO, PP. 123-133.
- GÓMEZ-ROMERO, M., J. C. SOTO-CORREA, J. A. BLANCO-GARCÍA, C. SÁENZ-ROMERO, J. VILLEGAS Y R. LINDIG-CISNEROS. 2012. ESTUDIO DE ESPECIES DE PINO PARA RESTAURACIÓN DE SITIOS DEGRADADOS. *AGROCIENCIA* 46: 795-807.
- GÓMEZ-MENDOZA, L. y L. ARRIAGA. 2007. MODELING THE EFFECT OF CLIMATE CHANGE ON THE DISTRIBUTION OF OAK AND PINE SPECIES OF MEXICO. *CONSERVATION BIOLOGY* 21: 1545-1555.
- HAMILTON, C., C. BONNEUIL Y F. GEMENNE. 2015. THE ANTHROPOCENE AND THE GLOBAL ENVIRONMENTAL CRISIS: RETHINKING MODERNITY IN A NEW EPOCH. *ROUTLEDGE, NEW YORK*, PP. 200.
- HANSEN, J., M. SATO Y R. RUEDY. 2012. PERCEPTION OF CLIMATE CHANGE. *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES* 109: E2415-E2423.
- HERNÁNDEZ, L., H. REYES-BONILLA Y E. F. BALART. 2010. EFECTO DEL BLANQUEAMIENTO DEL CORAL POR BAJA TEMPERATURA EN LOS CRUSTÁCEOS DE CÁPODOS ASOCIADOS A ARRECIFES DEL SUROESTE DEL GOLFO DE CALIFORNIA. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD* 81: 113-119.
- HILBISH, T. J., P. M. BRANNOCK, K. R. JONES, A. B. SMITH, B. N. BULLOCK Y D. S. WETHEY. 2010. HISTORICAL CHANGES IN THE DISTRIBUTIONS OF INVASIVE AND ENDEMIC MARINE INVERTEBRATES ARE CONTRARY TO GLOBAL WARMING PREDICTIONS: THE EFFECTS OF DECADAL CLIMATE OSCILLATIONS. *JOURNAL OF BIOGEOGRAPHY* 37: 423-431.
- IPBES. 2019. GLOBAL ASSESSMENT REPORT ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES OF THE INTER-GOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES, *IPBES SECRETARIAT, BONN, GERMANY*, PP. 1148.
- JIMÉNEZ, B. E. 2001. LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN MÉXICO. *EDITORIAL LIMUSA*, PP. 926.
- KOLEFF, P., R. M. ALFARO, J. GOLUBOV, A. I. GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, Y. BARRIOS-CABALLERO, S. D. J. DE JESÚS, Z. P. RUIZ-UTRILLA, F. MÉDEZ-SÁNCHEZ, M. LATOFSKI-ROBLES, M. M. GARCÍADIEGO-SAN JUAN, Y A. E. MARICHAL-GONZÁLEZ. 2021. INVASIVE ALIEN SPECIES IN MEXICO. *INVASIVE ALIEN SPECIES: OBSERVATIONS AND ISSUES FROM AROUND THE WORLD* 4: 77-92.
- KOLEFF, P., T. URQUIZA-HAAS Y B. CONTRERAS. 2012. PRIORIDADES DE CONSERVACIÓN DE LOS BOSQUES TROPICALES EN MÉXICO: REFLEXIONES SOBRE SU ESTADO DE CONSERVACIÓN Y MANEJO. *ECOSISTEMAS* 21: 6-20.
- KREBS, C. J. 1978. A REVIEW OF THE CHITTY HYPOTHESIS OF POPULATION REGULATION. *CANADIAN JOURNAL OF ZOOLOGY* 56: 2463-2480.
- LACHNIET, M. S., J. P. BERNAL, Y. ASMEROM, V. POLYAK Y D. PIPERNO. 2012. A 2400 YR MESOAMERICAN RAINFALL RECONSTRUCTION LINKS CLIMATE AND CULTURAL CHANGE. *GEOLOGY* 40: 259-262.
- LAMBIN, E. F., B. L. TURNER, H. J. GEIST, S. B. AGBOLA, A. ANGELSEN, J. W. BRUCE, O. T. COOMES, R. DIRZO, G. FISHER, C. FOLKE, P. S. GEORGE, K. HOMEWOOD, J. IMBERNON, R. LEEMANS, X. LI, E. F. MORAN, M. MORTIMORE, P. S. RAMAKRISHNAN, J. F. RICHARDS, H. SKANES, W. STEFFEN, G. D. STONE, U. SVEDIN, T. A. VELDKAMP, C. VOGEL Y J. XU. 2001. THE CAUSES OF LAND-USE AND LAND-COVER CHANGE: MOVING BEYOND THE MYTHS. *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE* 11: 261-269.
- LANDGRAVE, R. Y P. MORENO-CASASOLA. 2012. EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA PÉRDIDA DE HUMEDALES EN MÉXICO. *INVESTIGACIÓN AMBIENTAL CIENCIA Y POLÍTICA PÚBLICA* 4: 19-35.
- LIST, R., P. RODRÍGUEZ, K. PELZ-SERRANO, J. BENÍTEZ-MALVIDO Y J. M. LOBATO. 2017. LA CONSERVACIÓN EN MÉXICO: EXPLORACIÓN DE LOGROS, RETOS Y PERSPECTIVAS DESDE LA ECOLOGÍA TERRESTRE. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD* 88: 65-75.
- LÓPEZ-BARRERA, F., C. MARTÍNEZ-GARZA Y E. CECCON. 2017. ECOLOGÍA DE LA RESTAURACIÓN EN MÉXICO: ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVAS. *REVISTA MEXICANA DE BIODIVERSIDAD* 88: 97-112.
- MAGAÑA, V. O., J. L. VÁZQUEZ, J. L. PÉREZ Y J. B. PÉREZ. 2003. IMPACT OF EL NIÑO ON PRECIPITATION IN MEXICO. *GEOFÍSICA INTERNACIONAL* 42: 313-330.
- MARTÍNEZ-VILLEGAS, N., BRIONES-GALLARDO, R., RAMOS-LEAL, J.A., AVALOS-BORJA, M., CASTAÑÓN-SANDOVAL, A.D., RAZO-FLORES, E., VILLALOBOS, M. 2013. ARSENIC MOBILITY CONTROLLED BY SOLID CALCIUM ARSENATES: A CASE STUDY IN MEXICO SHOWCASING A POTENTIALLY WIDESPREAD ENVIRONMENTAL PROBLEM. *ENVIRONMENTAL POLLUTION* 176: 114-122.
- MENDOZA, L. M. R., H. KARAPANAGIOTI Y N. R. ÁLVAREZ. 2018. MICRO (NANOPLASTICS) IN THE MARINE ENVIRONMENT: CURRENT KNOWLEDGE AND GAPS. *CURRENT OPINION IN ENVIRONMENTAL SCIENCE & HEALTH* 1: 47-51.

- MENDOZA, H., A.V. RUBIO, G. E. GARCÍA-PEÑA, G. SUZÁN Y J.A. SIMONETTI. 2020. DOES LAND-USE CHANGE INCREASE THE ABUNDANCE OF ZOO NOTIC RESERVOIRS? RODENTS SAY YES. *EUROPEAN JOURNAL OF WILDLIFE RESEARCH* 66: 1-5.
- MENDOZA-PONCE, A., R. CORONA-NÚÑEZ, F. KRAXNER, S. LEDUC Y P. PATRIZIO. 2018. IDENTIFYING EFFECTS OF LAND USE COVER CHANGES AND CLIMATE CHANGE ON TERRESTRIAL ECOSYSTEMS AND CARBON STOCKS IN MEXICO. *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE* 53: 12-23.
- MELI, P., R. LANDA, X. LÓPEZ-MEDELÍN Y J. CARABIAS. 2015. Social PERCEPTIONS OF RAINFOREST AND CLIMATIC CHANGE FROM RURAL COMMUNITIES IN SOUTHERN MEXICO. *ECOSYSTEMS* 18: 1343-1355.
- MERÇON, J., J. A. ROSELL, B. AYALA-OROZCO, I. BUENO, A. LOBATO Y G. ALATORRE. 2018. COLABORACIÓN TRANSDISCIPLINARIA PARA LA SUSTENTABILIDAD EN MÉXICO: PRINCIPALES RETOS Y ESTRATEGIAS, EXPERIENCIAS DE COLABORACIÓN TRANSDISCIPLINARIA PARA LA SUSTENTABILIDAD, COPIT-ARXIVES Y RED TEMÁTICA DE SOCIOECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD, *CONACYT*, pp. 17-48.
- MIGUEL MARTÍNEZ-RAMOS M., L. BARRAZA, P. BALVANERA, J. BENÍTEZ-MALVIDO, F. BONGERS, A. A. CASTILLO, D. A. CUARÓN, G. IBARRA-MANRÍQUEZ, H. PAZ-HERNÁNDEZ, A. PÉREZ-JIMÉNEZ, A. M. QUESADA, D. PÉREZ-SALICRUP, G. SÁNCHEZ-AZOFEIFA, J. SCHONDUPE, K. STONER, J. ALVARADO-DÍAZ, B. BOEGE, E. DEL-VAL, C. M. FAVILA, I. SUAZO-ORTUÑO, L. D. ÁVILA-CABADILLA, M. ÁLVAREZ-AÑORVE, R. M. CANO, M. J. CASTILLO, B. O. CHAVES, E. I. DE LA PEÑA, D. A. CORZO, G. M. C. GODÍNEZ, B. A. P. GÓMEZ, G. A. DI PIERRO, B. D. FUENTEALBA, G. W. A. GUDIÑO, O. O. HERNÁNDEZ, M. KALÁSCKA, M. LOBECK, A. LÓPEZ-CARRTERO, A. A. MANRIQUE, S. MAZA-VILLALOBOS, M. MÉNDEZ-TORIBIO, F. MORA-ÁRDILA, A. S. MUENCH, G. C. B. PEÑALOZA, P. L. F. PINZÓN, P. E. PÉREZ, F. PINEDA-GARCÍA, A. RICAÑO-ROCHA, M. ROCHA-ORTEGA, J. RODRÍGUEZ-VELÁZQUEZ, N.M. SCHROEDER, J. TRILLERAS-MOTHA, M. VAN BREUGEL, P.S. VAN DER, G.E.VILLA Y I. ZERMEÑO-HERNÁNDEZ. 2012. MANEJO DE BOSQUES TROPICALES: BASES CIENTÍFICAS PARA LA CONSERVACIÓN, RESTAURACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE ECOSISTEMAS EN PAISAJES RURALES. *INVESTIGACIÓN AMBIENTAL. CIENCIA Y POLÍTICA PÚBLICA* 4: 111-129.
- MORIN, E., 2001. LOS SIETE SABERES NECESARIOS A LA EDUCACIÓN DEL FUTURO, *EDICIONES PAIDÓS IBÉRICA*, S. A, pp. 151.
- MURRAY-TORTAROLO, G.N. Y V. J. JARAMILLO. 2019. The IMPACT OF EXTREME WEATHER EVENTS ON LIVESTOCK POPULATIONS: THE CASE OF THE 2011 DROUGHT IN MEXICO. *CLIMATIC CHANGE* 153: 79-89.
- MURRAY-TORTAROLO, G. N. 2021. SEVEN DECADES OF CLIMATE CHANGE ACROSS MEXICO. *ATMÓSFERA* 34: 217-226. SEVEN DECADES OF CLIMATE CHANGE ACROSS MEXICO. *ATMÓSFERA* 34: 217-226.
- NAEEM, S., D. B. BUNKER, A. HECTOR, M. LOREAU Y C. PERRINGS. 2009. INTRODUCTION: THE ECOLOGICAL AND SOCIAL IMPLICATIONS OF CHANGING BIODIVERSITY. AN OVERVIEW OF A DECADE OF BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM FUNCTIONING RESEARCH, EN BIODIVERSITY, ECOSYSTEM FUNCTIONING, AND HUMAN WELLBEING: AN ECOLOGICAL AND ECONOMIC PERSPECTIVE, *OXFORD UNIVERSITY PRESS, UNITED KINGDOM*, pp. 3-13.
- NARCHI, N. E., M. CARIÑO, M. A. MESA-JURADO, A. ESPINOZA-TENORIO, A. OLIVOS-ORTIZ, M. M. EARLY CAPISTRÁN, E. MONTERO, Y. OCHOA, C. M. BEITL, T. E. MARTÍNEZ, O. CERVANTES, H. H. NAVA, A. K. SPALDING, C. A. GRACE-McCASKEY, N. CORONA Y G. G. MOREIRA-MOURA. 2018. EL COLABORATORIO DE OCEANOGRAFÍA SOCIAL: ESPACIO PLURAL PARA LA CONSERVACIÓN INTEGRAL DE LOS MARES Y LAS SOCIEDADES COSTERAS. *SOCIEDAD Y AMBIENTE* 18: 285-301.
- OCHOA-OCHOA, L. M., P. RODRÍGUEZ, F. MORA, O. FLORES-VILLELA Y R. J. WHITTAKER. 2012. CLIMATE CHANGE AND AMPHIBIAN DIVERSITY PATTERNS IN MEXICO. *BIOLOGICAL CONSERVATION* 150: 94-102.
- OLIVOS-ORTIZ, A., S. I. QUIJANO-SCHEGGIA, A. PÉREZ-MORALES, J. H. GAVIÑO-RODRÍGUEZ, T. KONO-MARTÍNEZ, G. C. PELAYO-MARTÍNEZ, C. D. ORTEGA-ORTIZ Y M. G. VERDUZCO-ZAPATA. 2016. CONDICIONES HIDROGRÁFICAS EN EL PACÍFICO CENTRAL MEXICANO RELACIONADO CON FLORECIMIENTOS ALGALES EN LA ZONA COSTERA DE COLIMA, FLORECIMIENTOS ALGALES NOCIVOS EN MÉXICO, *CICESE*, pp. 256-267.
- OSBORNES, T., G. VICTORIA, S. BROCK, R. LAVE, R. CHAZDON, M. LEFEVRE, S. CHOMBA, E. GAREN Y J. SUNDBERG. 2021. The POLITICAL ECOLOGY PLAYBOOK FOR ECOSYSTEM RESTORATION: PRINCIPLES FOR EFFECTIVE, EQUITABLE, AND TRANSFORMATIVE LANDSCAPES. *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE* 70: 102320.

- PARRA-OLEA, G., E. MARTÍNEZ-MEYER Y G. P. P. DE LEÓN. 2005. FORECASTING CLIMATE CHANGE EFFECTS ON SALAMANDER DISTRIBUTION IN THE HIGHLANDS OF CENTRAL MEXICO. *BIOTROPICA* 37: 202-208.
- PONTIFES, P. A., P. M. GARCÍA-MENESES, L. GÓMEZ-AÍZA, A. I. MONTERROSO-RIVAS Y M. CASO-CHÁVEZ. 2018. LAND USE/LAND COVER CHANGE AND EXTREME CLIMATIC EVENTS IN THE ARID AND SEMI-ARID ECOREGIONS OF MEXICO. *ATMÓSFERA* 31: 355-372.
- PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL MEDIO AMBIENTE. 2020. INFORME SOBRE LA BRECHA EN LAS EMISIONES DEL 2020. *RESUMEN. NAIROBI*, PP. 16.
- QUIROZ BENÍTEZ, D. E. 2013. LAS CIUDADES Y EL CAMBIO CLIMÁTICO: EL CASO DE LA POLÍTICA CLIMÁTICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *ESTUDIOS DEMOGRÁFICOS Y URBANOS* 28: 343-382.
- RAMÍREZ G. M. C. 2016. ATLAS DE PLANTAS EXÓTICAS INVASORAS EN EL ESTADO DE QUERÉTARO, SIERRA GORDA, MÉXICO. *TESIS DE LICENCIATURA. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO*, PP. 149. ATLAS DE PLANTAS EXÓTICAS INVASORAS EN EL ESTADO DE QUERÉTARO, SIERRA GORDA, MÉXICO.
- RAMÍREZ, M. A. Y., A. G. GARCÍA Y J. BARRERA. 2003. EL CONVENIO DE ESTOCOLMO SOBRE CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES Y SUS IMPLICACIONES PARA MÉXICO. *GACETA ECOLÓGICA* 69: 7-28.
- RIST, S., Y F. DELGADO. 2016. CIENCIAS, DIÁLOGO DE SABERES Y TRANSDISCIPLINARIEDAD. APORTES TEÓRICO-METODOLÓGICOS PARA LA SUSTENTABILIDAD ALIMENTARIA Y DEL DESARROLLO. *AGRU-CO-UMSS*, PP. 379.
- SELLERS, W. D. 1965. PHYSICAL CLIMATOLOGY, *THE UNIVERSITY CHICAGO PRESS, CHICAGO, ILLINOIS, EUA*, PP. 611.
- TÉLLEZ-VALDÉS, O., Y P. DiVILA-ARANDA. 2003. PROTECTED AREAS AND CLIMATE CHANGE: A CASE STUDY OF THE CACTI IN THE TEHUACÁN-CUICATLÁN BIOSPHERE RESERVE, MEXICO. *CONSERVATION BIOLOGY* 17: 846-853.
- TREJO, I., E. MARTÍNEZ-MEYER, E. CALIXTO-PÉREZ, S. SÁNCHEZ-COLÓN, R. VÁZQUEZ DE LA TORRE, Y L. VILLERS-RUIZ. 2011. ANALYSIS OF THE EFFECTS OF CLIMATE CHANGE ON PLANT COMMUNITIES AND MAMMALS IN MÉXICO. *ATMÓSFERA* 24: 1-14.
- TORRES ROJO, J.M., Y A.E. GUEVARA SANGINÉS. 2002. EL POTENCIAL DE MÉXICO PARA LA PRODUCCIÓN DE SERVICIOS AMBIENTALES: CAPTURA DE CARBONO Y DESEMPEÑO HIDRÁULICO. *GACETA ECOLÓGICA* 63: 40-50.
- VITOUSEK, P. 1992. GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE: AN INTRODUCTION. *ANNUAL REVIEW OF ECOLOGY AND SYSTEMATICS* 23: 1-14.
- VITOUSEK, P.M., C.M. DÁNTONIO, L.L. LOOPE Y R. WESTBROOKS. 1996. BIOLOGICAL INVASIONS AS GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE. *AMERICAN SCIENTIST* 84: 468-478.
- WINPENNY, J., I. HEINZ Y S. KOO-OSHIMA. 2013. REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA AGRICULTURA: ¿BENEFICIOS PARA TODOS? ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA. *ROMA*, PP. 144.
- WOODMAN, A. 2021. COMISIÓN NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD AN EXCLUSIVE DISCUSSION WITH NATIONAL COORDINATOR OF CONABIO DR. JOSÉ SARUKHÁN KERMEZ. *ANNALS OF THE ROMANIAN SOCIETY FOR CELL BIOLOGY*: 6003-6009.



Retos y oportunidades de la fundición en México.

F.V. Guerra, A. Bedolla-Jacuinde, J.A. Verduzco, C. Borja-Soto, S. Pacheco-Cedeño

Para citar este artículo: Guerra F.V., Bedolla-Jacuinde A., Verduzco J.A., Borja-Soto, C., Pacheco-Cedeño S. 2022. Retos y oportunidades de la fundición en México. Ciencia Nicolaita, número 83, 248-256 XX. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.580>

Online

[Ver material suplementario](#)

View

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Retos y oportunidades de la fundición en México.

F.V. Guerra ^{1*}, A. Bedolla-Jacuinde ¹, J.A. Verduzco, C. Borja-Soto ¹, S. Pacheco-Cedeño².

¹ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales, México

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 25 de septiembre de 2021

Aceptado: 22 de noviembre de 2021

RESUMEN

En el presente artículo se describen algunos de los retos y oportunidades clave para el crecimiento y desarrollo de la industria de la fundición en México donde se resaltan las ventajas que tiene México como un importante productor de vehículos automotor a nivel internacional lo cual puede ser aprovechado para impulsar la industria de la fundición nacional. Se describen algunas de las innovaciones más importantes en el área de la fundición que se han realizado en los últimos años para las cuales el proceso de desarrollo ha requerido de una gran cantidad de tiempo, recursos económicos y humanos. Por lo tanto, se destaca la importancia de la vinculación entre la industria y las universidades y centros de investigación para desarrollar nuevas tecnologías y generar un mayor valor agregado a los productos.

PALABRAS CLAVE: Fundición, desarrollo, tecnología, colaboración universidad-industria.

ABSTRACT

This article describes some of the key challenges and opportunities for the growth and development of the metal casting industry in Mexico, highlighting the advantages of Mexico as an important international manufacturer of vehicles, which in turn, can be used to boost the domestic foundry industry. This article also describes some of the most important innovations in the area of foundry that have been made in recent years, highlighting the great amount of time, financial and human resources required for its development. Therefore, the importance of the collaboration between the industry, universities and research centers becomes essential to develop new technologies and add a greater value to the products.

KEYWORDS: metal casting industry, relationship university

Introducción

En las décadas recientes la industria automotriz Mexicana ha tenido un notable crecimiento gracias a los diferentes tratados y acuerdos de comercio con diferentes países. Además la manufactura y mano de obra mexicana gozan de cierto prestigio a nivel internacional, lo que hace que los productos fabricados en México tenga un alto grado de aceptación en mercados internacionales. En la última década nuestro país se ha mantenido dentro de los primeros 7 lugares a nivel mundial en producción de vehículos ligeros (IOCA, 2021).

En el caso particular de la industria automotriz, en los últimos 10 años se ha tenido un incremento en la producción de alrededor de un 60%, de acuerdo con los datos proporcionados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) así como un incremento del 80% en la exportación de vehículos ligeros desde el 2010 a inicios del 2021 (INEGI, 2021).

Gran parte de los componentes utilizados para la fabricación de automóviles son fabricados por medio de fundición, algunos de estos elementos son; monoblocks, cabezas de motor, pistones, soportes, árboles de levas, discos de freno, manguetas, bastidores, consolas, rines, carcasas de dirección y transmisión, entre otros.

Además de la producción de vehículos y la fabricación de autopartes de reemplazo, la industria de la fundición de hierro, acero y aleaciones no ferrosas, representan un sector productivo muy importante para nuestro país, en el caso de la industria acerera nacional, en los primeros 2 meses del 2021 se experimentó un crecimiento del 15.6% de acuerdo con lo reportado por la Cámara Nacional de la Industria del Hierro y el Acero (Canacero), este crecimiento se atribuye en gran medida

al alza en consumo por parte de la industria automotriz.

Actualmente, gran parte de las tecnologías utilizadas para la fabricación de aleaciones y componentes por medio de fundición en nuestro país son en su mayoría propiedad intelectual de empresas extranjeras, lo que limita a nuestra industria al ramo manufacturero y en algunos casos a producir aleaciones y componentes más tradicionales que genera un menor valor agregado.

Existe una notable diferencia en el valor agregado que puede generar un producto la cual reside en el grado de innovación, ingeniería y conocimiento (propiedad intelectual) necesarios para su fabricación tal como sucede en la actualidad con los dispositivos móviles, equipos de cómputo, automóviles y medicamentos.

Por lo tanto, el desarrollo de nuevas tecnologías más eficientes, componentes de mayor complejidad, aleaciones novedosas y de alto rendimiento así como la formación de capital humano altamente calificado para esta área representan puntos clave para que este sector industrial pueda seguir experimentando un alto grado de crecimiento.

Desarrollo

Dentro de la industria metal-mecánica y específicamente en el área de la fundición y la solidificación existen nuevas tecnologías que se han sido desarrolladas en las últimas décadas. La mayor aportación a la industria de la fundición por parte de México, ha sido el desarrollo del proceso HyL, también conocido como de reducción directa para la obtención de hierro esponja mediante un gas reductor (F. Weston, 1959). Este proceso fue desarrollado en 1957 por Juan Celada Salomón, el cual dirigía un equipo de ingenieros e investigadores de la empresa HYLSA. A partir de esa fecha, han sido pocos los desarrollos científicos

cos y tecnológicos mexicanos que han logrado trascender a nivel mundial en el área de la fundición.

En décadas subsecuentes, se han realizado investigaciones que han dado como resultado avances significativos en el área de la fundición a nivel internacional, las cuales han sido resultado de investigaciones realizadas por diferentes equipos de trabajo con numerosos miembros y considerables inversiones de recursos económicos. Tal es el caso de aleaciones especiales, materiales solidificados direccionalmente, crecimiento de monocristales, así como novedosos procesos de moldeo y vaciado de metals, entre otros. En el caso particular del crecimiento de monocristales de silicio, esta tecnología ha permitido avances significativos en el área de la electrónica, telecomunicaciones, transporte, generación de energía, entre otros (W.Heywang).

El silicio es elemento metálico más abundante en nuestro planeta y el segundo de todos los elementos después del oxígeno (Kuhlmann, 1963). Este elemento es el principal componente de la corteza terrestre y principal constituyente de la mayoría de las rocas ("9 - Silicon," 1997). Sin embargo, esta abundancia no implica que los componentes fabricados a base de este material tenga un bajo costo. Un circuito integrado fabricado con unos cuantos

gramos de silicio puede llegar a costar miles de pesos. Caso similar al de muchas aleaciones metálicas base Hierro en el cual la transformación del metal a un producto terminado puede generar un incremento en el valor agregado del orden de miles de pesos, por lo que el desarrollo de técnicas o métodos para su obtención y procesamiento son de vital importancia para poder generar el crecimiento industrial y económico.

De la misma forma, las constantes innovaciones, desarrollo de nuevos materiales, mejoras en el diseño y la alta competitividad internacional crean un ciclo en el cual se hace necesario crear materiales para productos de mayor calidad, con mejores propiedades para aplicaciones más demandantes que en muchos tienen la finalidad de producir un mejor rendimiento, una mayor eficiencia energética ó potencia como es el caso de la industria de la aviación y automotriz.

Un ejemplo, es el caso de las fundiciones empleadas para la fabricación de turbinas requieren soportar altas temperaturas ya que a mayor temperatura se obtiene una mayor eficiencia de combustible (figura 1). En este caso, la solidificación direccional representó un avance importante en la que los límites de grano se orientan de una forma específica para obtener una mayor resistencia.

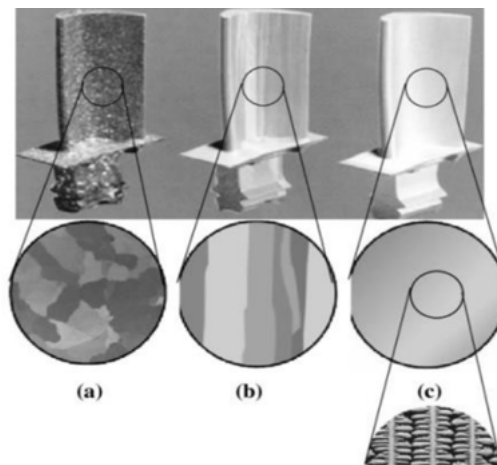


FIGURA 1. Evolución de la tecnología para la fabricación de alabes para turbinas (Dai *et al.*, 2008).

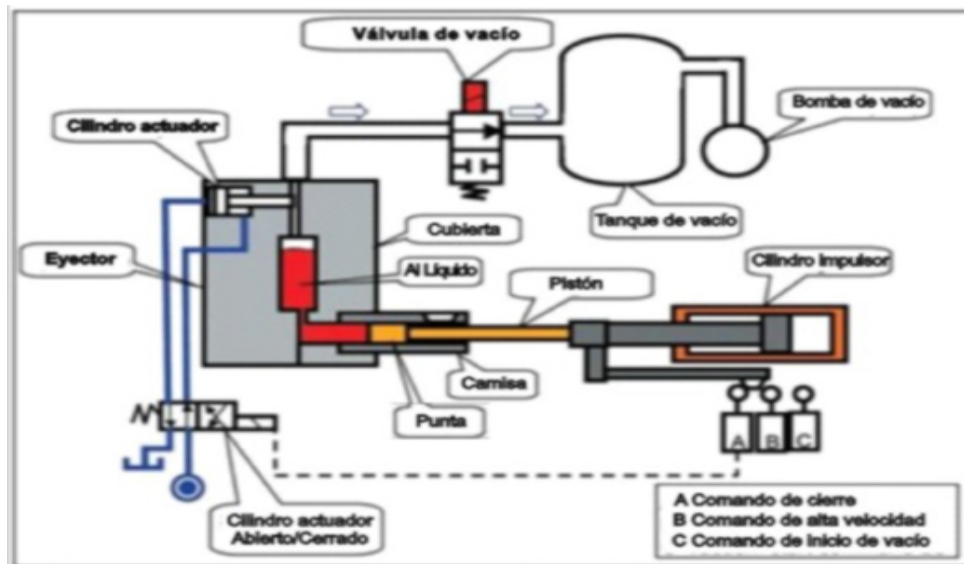


FIGURA 2. Esquema del sistema utilizado para la fundición por inyección de moldes al vacío (Uchida, 2009).

Otro avance importante para este tipo de aplicaciones es el crecimiento de monocristales, eliminando las desventajas que representa la presencia de límites de grano. Este proceso fue desarrollado en 1986 por Maurice “Bud” Shank y Frank VerSnyder. Shank inició su carrera como investigador en el MIT, sin embargo, abandonó su posición como miembro de la facultad de Ingeniería Mecánica para formar parte de la empresa fabricante de turbinas Pratt & Whitney en 1960. Shank reclutó a VerSnyder para después formar un grupo de alrededor de 200 científicos, ingenieros y técnicos enfocados en la investigación y desarrollo de crecimiento de monocristales. La historia de la tecnología muestra que un avance como las superaleaciones monocristalinas generalmente implica un proceso a largo plazo, típicamente 30 años o más (Engineering, 2019) además de una gran cantidad de recursos de diferentes especies.

Otro avance reciente en el área de fundición ha sido la inyección a presión al vacío de moldes (figura 2). Este proceso fue desarrollado en Japón en 1980 (Uchida, 2009), con este proceso se reduce el contacto con el aire disminuyendo el grado de porosidad incremen-

tando la densidad de las fundiciones lo cual se traduce en gran medida a la mejora de la calidad de diferentes componentes.

Este proceso también ayuda a disminuir la presión efectiva sobre los dados de inyección con lo cual se prolonga la vida del herramienta y se mejora la productividad.

La fundición contra-gravedad es otro proceso de reciente desarrollo, en el cual, un molde permeable es alimentado contra gravedad mediante el uso de vacío (figura 3), el cual fue desarrollado en 1982 por Chandley y colaboradores (Chandley, 1999) pertenecientes a la empresa Hitchiner ahora parte de GM. Este proceso ha sido complementado mediante el uso de un de presión positiva durante la solidificación para reducir la porosidad por contracción además de aumentar la distancia de alimentación (Archer, Hardin, & Beckermann, 2018).

Un proceso de moldeo revolucionario en la industria de la fundición para la parte de moldeo fue el moldeo al vacío (V-process) desarrollado por Sinto Group en 1972 (America, 2018). Este proceso utiliza vacío y una película plástica para mantener la forma del molde, con lo cual se evita el endurecimiento de la

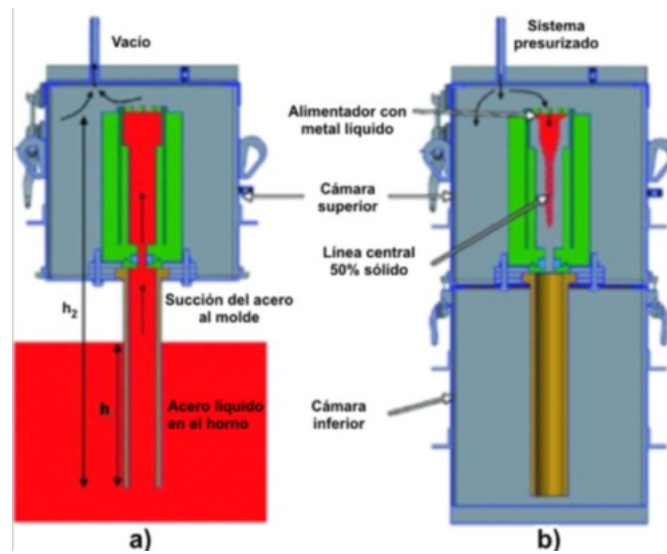


FIGURA 3. Diseño del sistema de vaciado contra gravedad con aplicación de presión positiva (Archer et al., 2018).

arena y facilita su reciclaje (figura 4). Este proceso es actualmente utilizado en más de 200 líneas de producción en 20 países, contribuye a obtener una alta eficiencia y es amigable con el medio ambiente al evitar el uso de resinas o aglutinantes para el endurecimiento de la arena.

Un proceso que ha sido desarrollado de forma más reciente es la fundición de bimetales directo de colada mediante vaciado de forma simultánea.

En este proceso se vacían 2 metales de composición y punto de fusión distintos y ha sido estudiado para vaciado de aleaciones Al/Mg (Jiang *et al.*, 2018) así como algunas aleaciones ferrosas (Xiao, Ye, Yin, & Xue, 2012). Este proceso también puede ser empleado para la fabricación de tubería bimetálica, en este caso, el vaciado no es simultáneo y se hace dentro de una máquina de colada centrífuga. (figura 5).

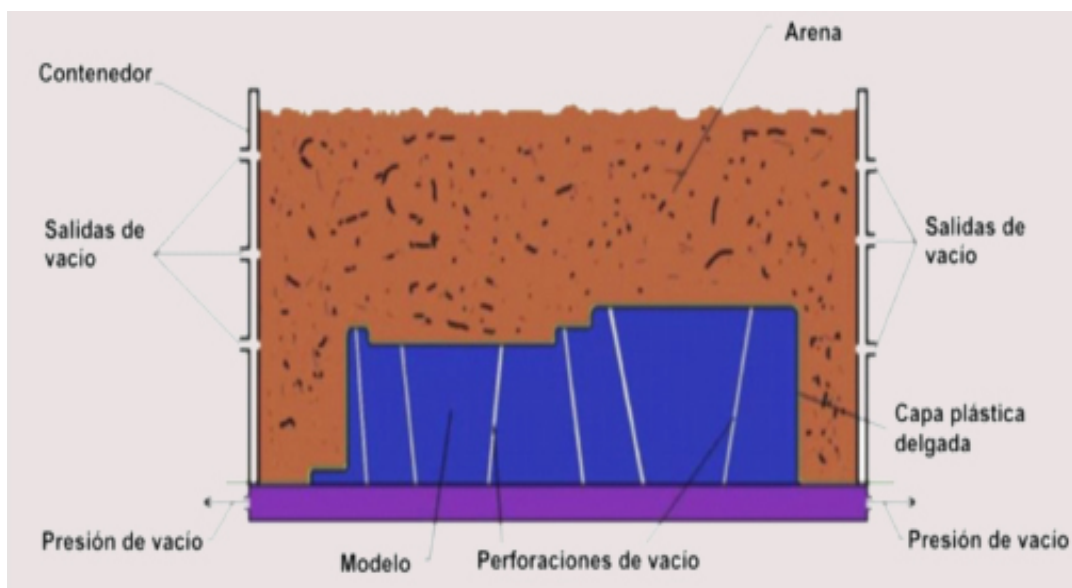


FIGURA 4. Esquema del proceso de moldeo al vacío (Eer, 1999).

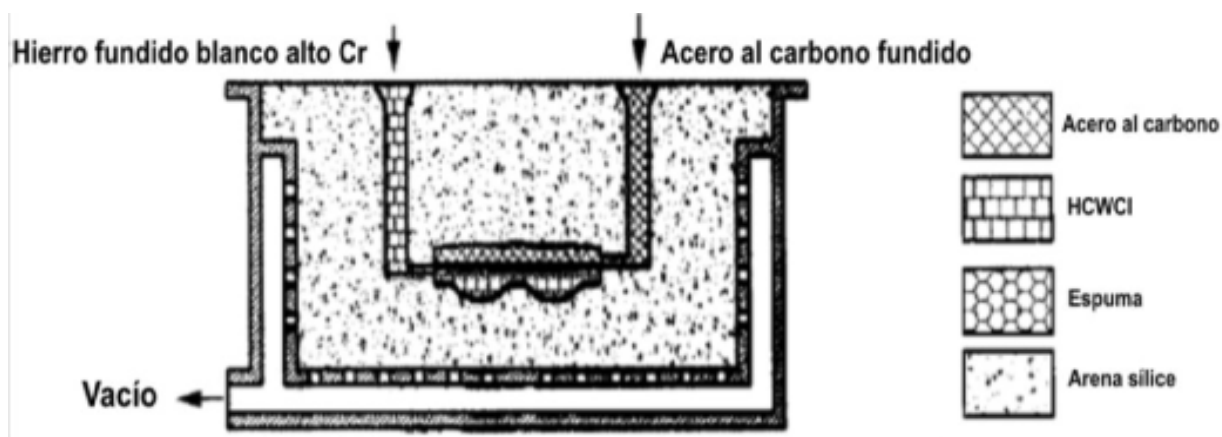


FIGURA 5. Diseño del sistema de vaciado contra gravedad con aplicación de presión positiva (Archer *et al.*, 2018).

Estudios recientes sobre fenómenos que ocurren en los procesos de fundición como son la transición de crecimiento columnar a dendrítico durante la solidificación (figura 6), los efectos de la micro-gravedad durante el llenado y la solidificación de aleaciones (figura 7) así como el arrastre de aire durante el vaciado de metal (figura 8) también representan aportaciones importantes a la ciencia de la fundición ya que el entendimiento de estos fenómenos se puede ver reflejado de forma directa en la calidad y mejora de las aleaciones y procesos.

Todos estos desarrollos científicos y tecnológicos han requerido de una vasta experimentación así como montos considerables de inversión de recursos siendo muchas veces

necesario contar con la colaboración de la iniciativa privada por lo que los resultados de estas investigaciones muchas veces no pueden ser publicados aunque si patentados. Por lo que la vinculación entre las universidades y investigación con la industria resulta de vital importancia para este tipo de desarrollos. Otro punto importante es que este tipo de desarrollos pueden requerir de periodos relativamente largos y algunas veces los resultados que se obtienen no son necesariamente los esperados.

Por lo tanto, muchas veces es los productos de estas investigaciones pueden verse reflejados después de tiempos considerablemente largos lo cual puede ser un factor a considerar para algunos investigadores sujetos a evaluaciones

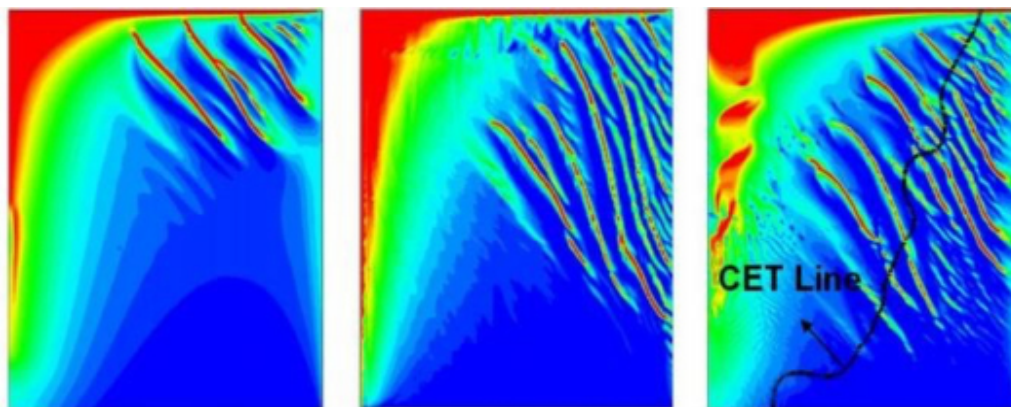


FIGURA 6. Mapa de la segregación en un crecimiento columnar sin sobreenfriamiento (a), crecimiento columnar con sobreenfriamiento (b) y la transición del crecimiento columnar a equiaxial (c) (Rad, 2018)

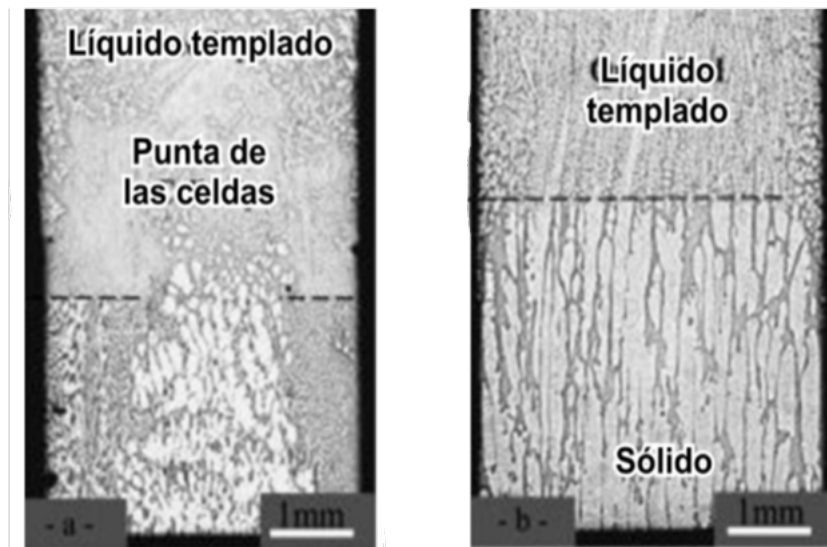


FIGURA 7. Comparación de la microestructura obtenida en tierra bajo el efecto de la gravedad (a) y en microgravedad (b) (Nguyen-Thi, Reinhart, & Billia, 2017)

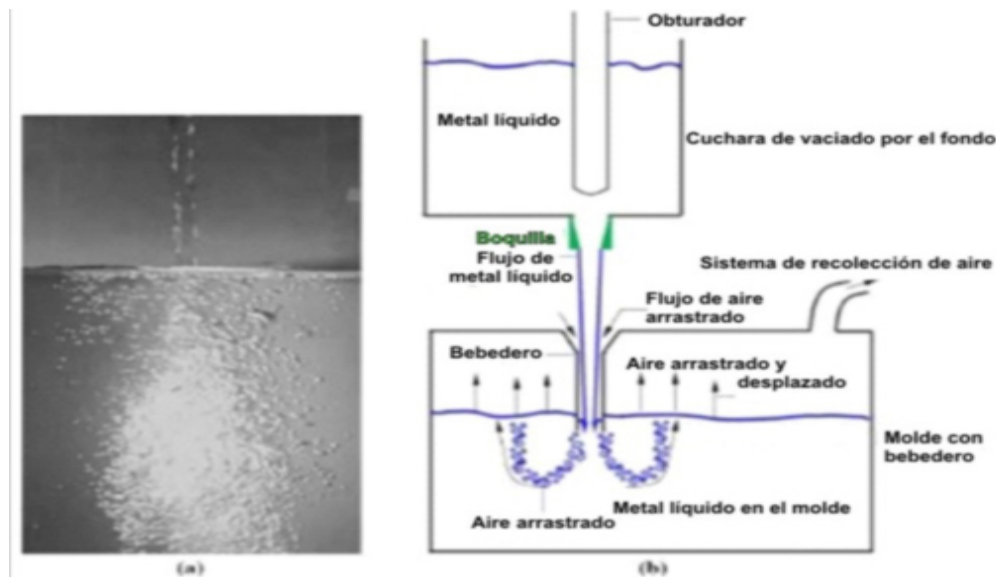


FIGURA 8. Fenómeno de arrastre de aire. (a) Arrastre de aire en agua, (b) desgrama esquemático del fenómeno de arrastre (Guerra, Archer, Hardin, & Beckermann, 2020).

periódicas bajo un esquema mayoritariamente cuantitativo lo cual se suma a que muchas de las empresas en el área de la fundición son manufactureras y no se invierte en investigación y desarrollo en nuestro país. Empresas exitosas que residen en nuestro país como el caso de Nemark S.A.B. de C.V. han invertido por décadas importantes sumas de dinero y creado grandes grupos de investigadores enfocados en la investigación y desarrollo de

tecnologías y nuevos productos, lo cual es clave para el crecimiento de cualquier empresa. En este caso, Nemark en nuestro país cuenta con un grupo de más de 40 personas dedicadas a la investigación y desarrollo, apoyadas por más de 200 empleados, lo que ha contribuido a ser reconocido a nivel mundial como líder global en la fabricación de cabezas y bloques de motor de aluminio (NEMAK, 2014). La gran cantidad de vehículos que se

ensamblan en el territorio nacional y la reputación que tiene México como fabricante de vehículos y autopartes representa una gran ventaja para el crecimiento de la industria de la fundición, la cual puede ser aprovechada si se fabrica un mayor número de componentes con altos estándares de calidad lo cual permitiría escalar a posiciones más altas a la que ocupa México actualmente en la producción de vehículos en los próximos años. Es evidente que el crecimiento de la industria de la fundición en nuestro país, requiere del desarrollo de tecnologías propias para generar un mayor valor agregado a los productos que se fabrican por medio de esta técnica en nuestro país. Para esto será necesaria la inversión de recursos económicos y capital humano.

El desarrollo recursos humanos especializados y calificados en esta área se pueden lograr mediante la vinculación la industria de la fundición con las universidades, lo cual a mediano y largo plazo puede ser la clave para mantener la competitividad de la industria de la fundición mexicana a nivel internacional al ofrecer nuevos y mejores productos que permitan ser líderes en este sector. Sin embargo esta vinculación representa un reto importante ya que un gran número de empresas de este sector son manufactureras a las cuales la investigación y desarrollo de nuevos productos no les es muy atractivo. Así mismo, se debe de trabajar de manera conjunta para que las universidades de nuestro país puedan dar respuesta a las necesidades de la industria de forma inmediata, lo cual suele dificultarse al ser la docencia y el cumplimiento de indicadores sus principales prioridades. Es importante tomar en cuenta que los esfuerzos de las universidades y sus investigadores deben de verse reflejados sobre un beneficio social y económico para el pueblo mexicano, lo cual se puede lograr al promover la vinculación con la industria para aterrizar los proyectos

de investigación y formar capital humano con el conocimiento necesario para dar solución a problemas reales y generar innovación.

El desarrollo y crecimiento de la industria metal-mecánica y en el caso particular de la fundición nacional, debe traer como consecuencia la generación de una mayor derrama económica promoviendo la inversión de capital extranjero al contar con recursos humanos calificados, las condiciones climáticas, geográficas, estratégicas así como los acuerdos comerciales con los que cuenta nuestro país.

Conclusiones

La industria de la fundición representa un sector de gran importancia para fortalecer a la economía nacional al aprovechar las ventajas que ofrece el alto volumen de vehículos que se ensamblan en el territorio nacional. El desarrollo de nuevas tecnologías mediante la formación de capital humano calificado y la vinculación entre la industria con las universidades y centros de investigación puede ser una ruta viable para generar un alto grado de crecimiento en este sector, lo cual se debe ver reflejado en un crecimiento paulatino de la economía nacional.

Referencias

- 9 - Silicon. (1997). In N. N. Greenwood & A. Earnshaw (Eds.), *Chemistry of the Elements (Second Edition)* (pp.328-366).Oxford: Butterworth-Heinemann.
- AMERICA, S. 2018. V-PROCESS TECHNOLOGY. RETRIEVED FROM [HTTPS://WWW.SINTO.COM/WHATTWEDO/TECHNOLOGIES/VPROCESS.HTML](https://www.sinto.com/whattwedo/technologies/vprocess.html)
- ARCHER, L., HARDIN, R. A., & BECKERMAN, C. 2018 . COUNTER-GRAVITY SAND CASTING OF STEEL WITH PRESSURIZATION DURING SOLIDIFICATION. *INTERNATIONAL JOURNAL OF METALCASTING*, 12(3), 596-606. DOI:10.1007/s40962-017-0200-5
- CHANDLEY, G. D. 19. USE OF VACUUM FOR COUNTER-GRAVITY CASTING OF METALS. *MATERIALS RESEARCH INNOVATIONS*, 3(1), 14-23. DOI:10.1007/s100190050120

- DAI, H., GEBELIN J.-C., NEWELL, M., REED, R. C., D'SOUZA, N., BROWN, P. D., & DONG, H. B. 2008. GRAIN SELECTION DURING SOLIDIFICATION IN SPIRAL GRAIN SELECTOR. *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SUPERALLOYS*. DOI:10.7449/2008/SUPERALLOYS_2008_367_374
- EER. 1999. VACUUM CASTING. RETRIEVED FROM [HTTPS://SITES.GOOGLE.COM/SITE/VINAYPOTDARVIT/VACUUM- CASTING](https://sites.google.com/site/vinaypotdarvit/vacuum-casting)
- ENGINEERING, N. A. O. 2019. MEMORIAL TRIBUTES: VOLUME 22. WASHINGTON, DC: *THE NATIONAL ACADEMIES PRESS*.
- GUERRA, F. V., ARCHER, L., HARDIN, R. A., & BECKERMANN, C. 2020. MEASUREMENT OF AIR ENTRAINMENT DURING POURING OF AN ALUMINUM ALLOY. *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS B*. DOI:10.1007/s11663- 020-01998-3
- HEYWANG W., ZAININGER K.H. 2004 SILICON: THE SEMICONDUCTOR MATERIAL. IN: SIFFERT P., KRIMMEL E.F. (EDS) *SILICON*. SPRINGER, BERLIN, HEIDELBERG. [HTTPS://DOI.ORG/10.1007/978-3-662-09897-4_2](https://doi.org/10.1007/978-3-662-09897-4_2)
- INEGI. 2021. REGISTRO ADMINISTRATIVO DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ DE VEHÍCULOS LIGEROS. RETRIEVED FROM [HTTPS://WWW.INEGI.ORG.MX/](https://www.inegi.org.mx/)
- INTERNATIONAL ORGANIZATION OF MOTOR VEHICLE MANUFACTURERS. 2020. *STATISTICS*. RETRIEVED FROM [WWW.OICA.NET](http://www.oica.net). 2021-04-15.
- KUHLMANN, A. M. 1963. THE SECOND MOST ABUNDANT ELEMENT IN THE EARTH'S CRUST. *JOM*, 15(7), 502-505. DOI:10.1007/BF03378936
- NEMAK. 2014. INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO. RETRIEVED FROM [HTTPS://WWW.NEMAK.COM/ES/ PRODUCTOS- TECNOLOG%C3%ADas/?idN=8630](https://www.nemak.com/es/productos-tecnolog%C3%ADas/?idN=8630)
- NGUYEN-THI, H., REINHART, G., & BILLIA, B. 2017. ON THE INTEREST OF MICROGRAVITY EXPERIMENTATION FOR STUDYING CONVECTIVE EFFECTS DURING THE DIRECTIONAL SOLIDIFICATION OF METAL ALLOYS. *COMPTES RENDUS MÉCANIQUE*, 345(1), 66-77. DOI:HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.CRME.2016.10.007
- RAD, M. T. 2018. MULTIPHASE MACROSCALE MODELS FOR MACROSEGREGATION AND COLUMNAR TO EQUIAXED TRANSITION DURING ALLOY SOLIDIFICATION (PhD), UNIVERSITY OF IOWA. RETRIEVED FROM [HTTPS://IR.UIOWA.EDU/CGI/VIEWCONTENT. CGI?ARTICLE=8153&CONTEXT=ETD](https://ir.uiowa.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=8153&context=etd).
- UCHIDA, M. 2009. DEVELOPMENT OF VACUUM DIE-CASTING PROCESS. *CHINA FOUNDRY*, 6, 137-144.
- XIAO, X.-F., YE, S.-P., YIN, W.-X., & Xue, Q. 2012. HCW-CI/CARBON STEEL BIMETAL LINER BY LIQUID-LIQUID COMPOUND LOST FOAM CASTING. *JOURNAL OF IRON AND STEEL RESEARCH, INTERNATIONAL*, 19(10), 13-19. DOI:HTTPS://DOI.ORG/10.1016/S1006-706X(12)60145-9



Estudio experimental de transeferncia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina

Victor Daniel Jiménez Macedo, Carlos Rubio Maya, J. Jesús Pacheco Ibarra, Eduardo Cortéz Neri

Para citar este artículo: Jiménez Macedo V. D., Rubio Maya C., Pacheco Ibarra, J.J., Cortéz Neri E. 2022. Estudio experimental de transferencia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina. Ciencia Nicolaita, número 83, 257-266. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.563>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Estudio experimental de transferencia de calor en motores de combustión interna usando la mezcla etanol-gasolina

Victor Daniel Jiménez Macedo *, Carlos Rubio Maya, J. Jesús Pacheco Ibarra, Eduardo Cortéz Neri

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 19 de julio de 2021

Aceptado: 15 de octubre de 2021

RESUMEN

En el presente estudio se realiza una estimación de la transferencia de calor en sistema de escape en un motor de combustión interna de cuatro tiempos, usando diferentes mezclas de etanol y gasolina como combustible, modificando la concentración de etanol del 2 al 8%. El objetivo del presente trabajo es cuantificar las diferencias porcentuales en las prestaciones del grupo electrógeno, primeramente, las variables de corriente eléctrica y voltaje, por parte del generador eléctrico, seguidamente, las variables termodinámicas como las temperaturas de escape, tanto del gas como de la pared y, en consecuencia, cuantificar su efecto en el calor transferido al exterior. Para determinar la transferencia de calor se han adoptado hipótesis unidimensionales. Los ensayos se realizan modificando el grado de carga del grupo bimotores. Se muestran resultados de las prestaciones del grupo electrógeno, de corriente y voltaje, bajo diferentes cargas. Seguidamente se exponen las temperaturas registradas bajo las diferentes concentraciones de combustible. Por otra parte, en los resultados obtenidos se tienen diferencias de hasta 2.74 y 0.81 % de corriente y voltaje respectivamente en todos los ensayos realizados. También se observaron diferencias inferiores a 4.91, 5.1 y 6.21% en las temperaturas del gas de escape, pared de escape externa y pared de escape interna, respectivamente en todos los ensayos y resultados obtenidos. Finalmente se presenta un estudio paramétrico de transferencia de calor, modificando el coeficiente de convección, donde se observan diferencias de hasta 4.83% en la tasa de calor con todas las concentraciones de combustible etanol-gasolina.

PALABRAS CLAVE: Generador eléctrico, etanol, motores térmicos.

ABSTRACT

In the present study, an estimate of the heat transfer in the exhaust system is carried out in a four-stroke internal combustion engine using different mixtures of ethanol and gasoline as fuel, modifying the ethanol concentration from 2 to 8%. The objective of this work is to quantify the percentage differences in the performance of the electric generator, firstly, the variables of electric current and voltage, by the electric generator, then, the thermodynamic variables such as the exhaust temperatures, both, of the gas and the wall, therefore, quantify its effect on the heat transferred to the outside. One-dimensional hypotheses have been adopted to determine heat transfer. The tests are carried out by modifying the degree of load of the generator unit. Results of the power unit performance, current and voltage, under different loads are shown. Moreover, the temperatures recorded under the different fuel concentrations are exposed. On the other hand, in the results obtained there are differences of up to 2.74 and 0.81% of current and voltage respectively in all the tests carried out. Also, differences of less than 4.91, 5.1 and 6.21% were observed in the temperatures of the exhaust gas, external exhaust wall and internal exhaust wall, respectively in all the tests and results obtained. Finally, a parametric study of heat transfer is presented, modifying the convection coefficient, where differences of up to 4.83% in the heat rate are observed with all concentrations of fuel ethanol-gasoline.

KEYWORDS: Power unit, ethanol, thermal engines.

1. Introducción

El uso del grupo motor de combustión interna y generador de electricidad tienen un amplio uso, primeramente, en lugares donde no está instalada la red eléctrica, en son zonas rurales alejadas generalmente de las principales ciudades. También el uso de estos sistemas son empleados en lugares donde es crítico contar con este recurso de energía eléctrica, como: (i) hospitales, (ii) centros especializados de informática y comunicaciones, (iii) lugares de refrigeración y, (iv) más recientemente, en coches eléctricos.

Como consecuencia entonces de todo ello, se establecen diferentes soluciones para el funcionamiento de este tipo de grupos bimotores de electro-combustión, entre el motor de combustión interna y generador eléctrico. Una investigación sobre el comportamiento de un motor de combustión interna de encendido por compresión de carga homogénea es presentada por Hasan (2021) donde usa concentraciones de etanol inferiores al 30%. Por otra parte, Prashant, G.K. (2016) presenta un trabajo que incluye mezclas de etanol, en un motor de encendido por compresión de cuatro tiempos, usando hasta un 40% de etanol en sus ensayos.

Por otra parte, el proceso de escape tiene lugar una vez concluida la carrera de combustión expansión. La apertura de la válvula de escape da lugar a la salida del gas que hay en el interior del cilindro. Las condiciones geométricas del colector de escape y las condiciones termodinámicas del gas son las que configuran el comportamiento termofluidodinámico del gas de escape, como lo indica Bauer (1997). De esta forma, la transferencia de calor juega un papel muy importante por su influencia en la entrada de aire fresco hacia el interior del motor de combustión y, por consiguiente, del comportamiento del motor como lo demuestra Reyes (1994). Finalmente, modelos unidimen-

sionales son ampliamente usados para estimar la tasa de calor transferido hacia el exterior del sistema de escape en motores de combustión interna de cuatro tiempos de gasolina como lo realiza Jiménez (2018). Por otra parte, los ensayos realizados por Ozsezen (2011) usando etanol de 5 y 10% en un motor de combustión interna de mediana cilindrada muestran incrementos en la potencia del motor del 2.2 y 1.1%, bajo condiciones de velocidad de 40, 60, 80 y 100 km/h. Además, concentraciones del 22% de etanol bajo relaciones de compresión de 10:1, 11:1 y 12:1 mejora el desempeño del motor en todas las condiciones de régimen de giro investigadas (Costa, 2011). También un estudio paramétrico modificando la concentración de etanol y la relación de compresión a plena carga y reducido avance en la combustión proporciona un incremento en el par motor (Yücesu, 2006). Asimismo, Eyidogan, M. (2010) presenta un estudio incluyendo el 5 y 10% de etanol en el combustible que suministra a un motor de combustión interna de cuatro tiempos, con una velocidad de 80 y 100 km/hr, donde se observó un incremento en el calor liberado bajo las concentraciones de etanol experimentadas. Igualmente, un estudio realizado en un motor de combustión interna de inyección directa de encendido por chispa, modificando el 10 y 20% de etanol en el suministro de combustible, se observó un incremento en la masa de combustible quemado bajo diferentes concentraciones de gases recirculados en la fase inicial de combustión del 0 al 10% (Zhang, 2014).

El presente trabajo tiene por objetivo caracterizar el desempeño del grupo electrógeno y la transferencia de calor en el escape. Para cumplir este objetivo, primeramente, se describe un apartado experimental y el sistema motor de combustión y generador eléctrico. Se emplea un motor de cuatro tiempos de encendido por chispa de pequeña cilindrada para la presente investigación. Las principales mediciones son

las temperaturas en la línea de escape, tanto del gas, como de la pared externa. Una motivación del presente escrito es conocer de forma experimental el efecto que tienen las concentraciones de etanol en la termodinámica del motor de combustión interna, en el flujo caliente del sistema de escape bajo las condiciones controladas que se han experimentado. De esta forma, la contribución de este trabajo es caracterizar el funcionamiento del grupo electrógeno bajo diferentes concentraciones de etanol.

2. Apartado experimental

En la presente sección se describe los recursos experimentales empleados para la obtención de las mediciones realizadas en los ensayos. Las medidas de las temperaturas en el interior del tubo de escape y la pared externa, que permite calcular la transferencia de calor en un sistema de escape de un motor de cuatro tiempos, de encendido por chispa modificando concentraciones del combustible etanol gasolina. La obtención del calor transferido es información que sirve para un balance de energía, entre lo que se suministra por la mezcla aire-combustible y el calor transferido por los diferentes sistemas donde se expulsa calor hacia el exterior del motor. No obstante, este balance de energía excede los alcances del presente estudio.

En esta figura 1 se muestran el grupo electrógeno puesto a punto para realizar ensayos

modificando diferentes concentraciones de etanol.

El motor de combustión interna es atmosférico monocilíndrico de refrigeración por aire. Se instrumenta con termopares a la mitad de la longitud total del tubo de escape para medir la temperatura del gas en el interior del sistema de escape. Se han empleado termopares tipo K. También a la mitad de la longitud total del tubo de escape se ha registrado la temperatura de la pared externa. Para registrar las mediciones se ha usado un sistema de adquisición de datos.

También se han usado resistencias eléctricas para consumir energía del grupo electrógeno, esto genera diferentes condiciones de operación del grupo. La potencia consumida por las resistencias son 1000, 2000 y 3000 W. Para la medición de la corriente eléctrica y el voltaje se ha usado un multímetro. Por otra parte, en las mezclas del combustible etanol-gasolina se ha usado un sistema de medida de combustible con la finalidad de proveer de forma cuantitativa el suministro másico de combustible entrante al motor. Las concentraciones de etanol suministradas al motor de combustión interna son del 0, 2, 4, 6 y 8% de etanol.

3. Modelado de transferencia de calor

Una vez obtenidas las temperaturas del gas y la pared externa, modificando la poten-



FIGURA 1. Grupo electrógeno usado en el presente estudio.

TABLA 1 Configuración del grupo electrógeno.

Característica del MCI y Generador de electricidad	
Cilindrada del MCI	420 cc
Número de cilindros	Monocilíndrico
Suministro del combustible	Carburador
Régimen de giro	3600 rpm
Frecuencia	60 Hz

cia de salida del grupo electrógeno y la concentración del combustible suministrado de etanol-gasolina, como se indicó en la sección anterior, ahora, en la presente sección, se presenta la metodología seguida para determinar la temperatura de pared interna y la tasa de transferencia de calor. De esta forma, para calcular la temperatura de pared interna, primeramente, fue obtenida de una relación para conocer la temperatura entre la pared interna y la pared externa. Esta relación se obtiene a partir de la ecuación diferencial unidimensional de transferencia de calor, que es:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad \text{ec. (1)}$$

La ec. (1) es la ecuación diferencial usada para coordenadas cilíndricas, que es apropiada para la geometría del escape. Donde es el radio del tubo de escape y la temperatura. La ec. (1) fue resuelta usando una condición de frontera de convección, que existe entre el gas y la pared interna del sistema de escape. De esta forma, se obtiene una ecuación que determina la temperatura entre la pared interna y la pared externa del tubo de escape que es función del radio del tubo de escape y que es:

$$T(r) = T_{t,ext} + C_1 \ln \left(\frac{r}{r_{t,ext}} \right) \quad \text{ec. (2)}$$

Donde $T_{t,ext}$ es la temperatura del tubo en la pared externa y $r_{t,ext}$ es el radio del tubo considerando el centro de la sección transversal del

tubo hasta la pared externa del mismo. También, en esta misma ecuación, C_1 , Es una constante obtenida aplicando la condición de frontera de convección, y contiene información de las temperaturas medidas con las diferentes condiciones de operación del motor, geometría de la sección transversal del tubo, la conductividad térmica del motor y el coeficiente de convección. De esta forma, al establecer la solución de la ecuación del calor transferido por conducción, obtenemos la pérdida de calor de los gases de escape a través del sistema de escape para esa determinada posición de los termopares, esta solución es:

$$\dot{Q} = -K A \frac{dT}{dr} \quad \text{ec. (3)}$$

La variable $\dot{Q}$ es la tasa de conducción de calor a través del tubo, K es una constante de conductividad térmica del material, A es una constante que representa el área de la sección transversal.

4. Resultados

Los resultados de las prestaciones se muestran en la presente sección. Se revisará de forma individual el comportamiento del generador eléctrico y del motor de combustión interna.

4.1. Generador eléctrico

El funcionamiento del generador eléctrico es objeto de la presente subsección. En la figura 2 se muestra la corriente eléctrica que entrega el generador eléctrico. En esta figura 2 se observan resultados del amperaje registrado con el multímetro bajo las diferentes cargas a las que

fue sometido el generador eléctrico. Los resultados muestran un incremento en el consumo de corriente eléctrica a medida que se va incrementando la carga con las resistencias eléctricas y de la potencia que se es consumida. Estos resultados se han registrado modificando la concentración porcentual de etanol en la mezcla del combustible etanol-gasolina en el motor térmico, con variaciones de etanol de 0, 2, 4, 6, 8%; donde se pueden observar diferencias de hasta 2.74, 1.25, y 2.03% respectivamente, a 1000, 2000 y 3000 W.

Estas diferencias, entre los valores medidos de intensidad de corriente, modificando la carga eléctrica, existen por el par aplicado al eje del rotor del generador eléctrico. Así pues, como se muestra en la figura 2, este par aplicado es directamente proporcional a la potencia eléctrica que entrega el generador de corriente alterna.

Por otra parte, en la Figura 3 al generador eléctrico, donde los resultados de voltaje muestran rangos mínimos y máximos de 116.6 a 123.2 V. Esto se debe principalmente a que a bajas cargas el generador provee la máxima tensión por estar sobre diseñado el generador a bajos consumos de energía.

No obstante, conforme se incrementa la demanda de energía eléctrica, el generador eléctrico va reduciendo la capacidad de tensión eléctrica que es capaz de suministrar. Pero es importante señalar que los valores de voltajes registrados están en un rango de voltaje válido para consumos eléctricos típicos de una casa de bajo a medio consumo de energía eléctrica, que cuenta con suministro eléctrico de 110 V. De esta forma, siguiendo la tendencia que se muestra en esta figura 3, al incrementar más la carga, la tensión será el valor que entrega la red eléctrica, donde evidentemente, esta carga es el límite de diseño del generador eléctrico. También los valores que se muestran en esta misma figura 3 son considerando las mismas diferentes mezclas de combustible etanol-gas-

olina; donde se muestran diferencias inferiores al 0.81, 0.24 y 0.17% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. en cada específica condición de carga y del 5.66% entre los valores mínimos y máximo registrados en todos los ensayos.

4.2. Motor de combustión interna

Por otra parte, se muestran los resultados del desempeño que tiene el motor de combustión interna, que es el que proporciona la energía mecánica al generador eléctrico para que se disponga de energía eléctrica. De esta forma, en la figura 4, se muestran los resultados registrados de la instrumentación del sistema de escape. En esta figura 4 se muestran la temperatura en el interior del sistema de escape, considerando diferentes grados de carga tanto del generador eléctrico como del motor de combustión interna, bajo las mismas diferentes concentraciones del combustible etanol-gasolina de la figura 2 y la figura 3. Así pues, en la figura 4 se observan los resultados de temperatura en su forma adimensional, para contrastar de forma comparativa todas las mediciones, donde se ha usado una condición que ha sido registrada en el grupo electrógeno como de referencia. Las temperaturas se tienen diferencias inferiores al 4.71, 4.91 y 2.62% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. En estos resultados, al modificar las diferentes cargas, se pueden observar bajas variaciones en las temperaturas; principalmente por que el régimen de giro es constante, como se indica en la tabla 1. También las temperaturas de la pared externa del escape se muestran en la figura 5.

En esta figura 5, se muestra las mediciones hechas en la pared externa del sistema de escape, considerando las diferentes condiciones de carga que se han presentado en la figura 4. Se muestran en su forma adimensional, para ello se ha empleado una condición medida.

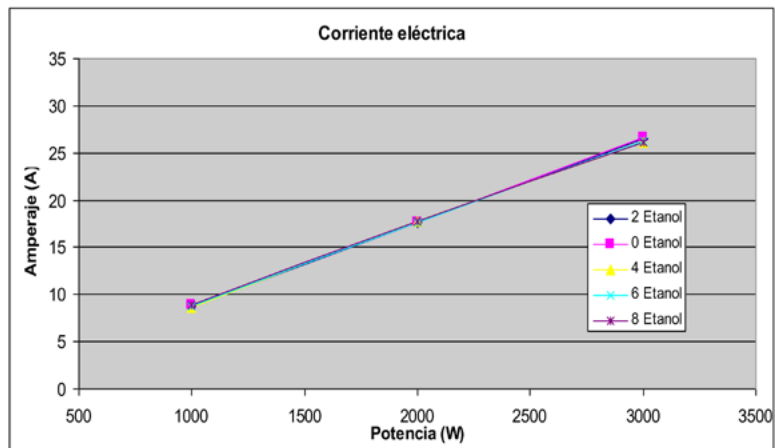


FIGURA 2. Corriente eléctrica suministrada por el generador eléctrico.

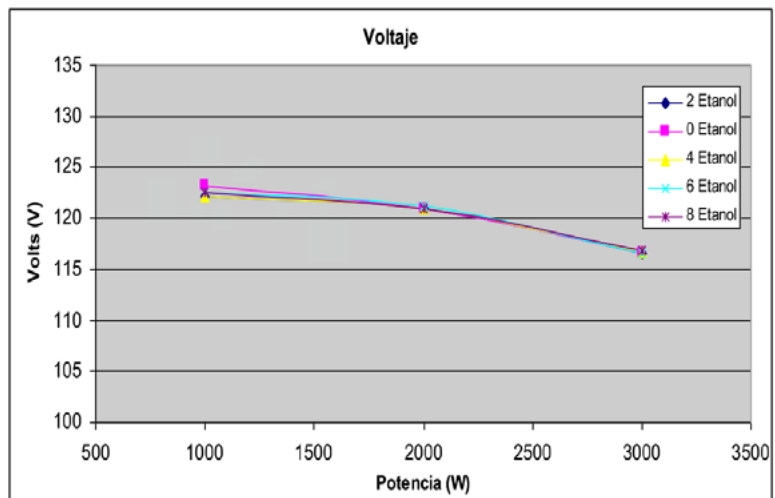


FIGURA 3. Tensión suministrada por el generador eléctrico.

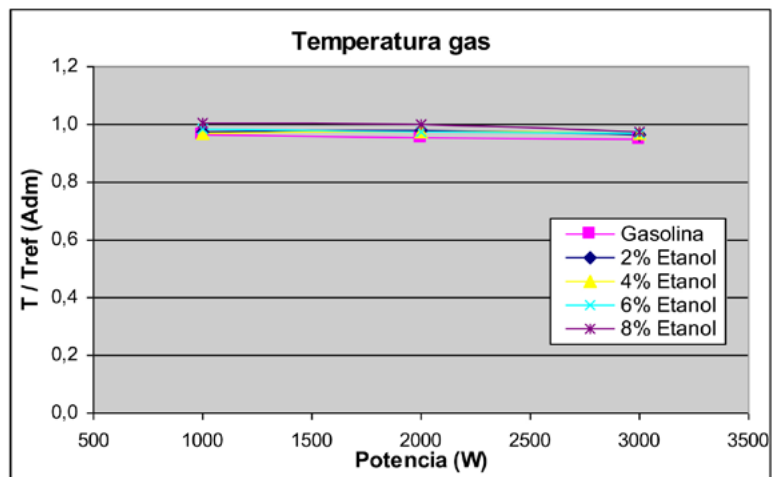


FIGURA 4. Resultados de la temperatura del gas de escape.

Estos resultados muestran diferencias inferiores a 4.83, 5.1 y 3.6% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. Por otra parte, adoptando hipótesis unidimensionales con la ecuación (2), fue posible determinar la temperatura de pared interna, estos resultados se muestran en la figura 6.

Los resultados de temperatura de pared interna muestran diferencias máximas de 4.83, 6.21 y 3.55% respectivamente a 1000, 2000, 3000 W. Ahora los valores obtenidos para determinar la tasa de calor, modificando el coeficiente de convección se muestran en la figura 7.

En esta figura se muestra cómo el flujo de calor se incrementa al aumentar el coeficiente de convección, que es razonable, por el efecto que imprime el coeficiente en la transferencia de calor. Estos resultados se muestran en su forma adimensional, tomando en cuenta una condición de referencia que considera un promedio de los coeficientes de película del estudio paramétrico. También en la figura 8 se muestran estos mismos resultados, pero considerando una carga de 2000 W en el generador eléctrico. Están en su forma adimensional con la misma condición de referencia de la figura 7.

En esta figura 8, al igual que en la figura 7, se muestra que el flujo de calor se incrementa al aumentar el coeficiente de convección. Finalmente, en la figura 9, se muestran los mismos resultados de las figuras 7 y 8, pero con una carga de 3000 W.

En estas figuras se muestran diferencias de hasta 4.83, 4.81 y 2.75% respectivamente, a una carga de 1000, 2000, 3000 W, que son con un coeficiente de convección de $250 \text{ W/m}^2\text{C}$.

Conclusiones

En la presente investigación se ha realizado un estudio de transferencia de calor en el escape en un motor de cuatro tiempos que for-

ma parte de un grupo electrógeno.

Primeramente, se han mostrado resultados de corriente eléctrica y voltaje del generador eléctrico para 1000, 2000, 3000 W. En los resultados obtenidos se tienen diferencias de hasta 2.74 y 0.81% de corriente y voltaje respectivamente en todos los ensayos realizados. Por otra parte, en cuanto al motor de combustión interna, se ha medido la temperatura del gas y de la pared externa bajo diferentes concentraciones de etanol que varían del 0 al 8 %. También se ha resuelto la ecuación diferencial unidimensional de transferencia de calor para, primeramente, obtener una ecuación que determina el perfil de temperatura en función del radio del tubo de escape y, seguidamente, para obtener la tasa de calor que se expulsa al exterior. En las temperaturas se observaron diferencias inferiores a 4.91, 5.1 y 6.21% en las temperaturas del gas de escape, pared de escape externa y pared de escape interna, respectivamente en todos los ensayos y resultados obtenidos. También, se han obtenido diferencias de hasta 4.83% en la tasa de calor con todas las concentraciones de combustible investigadas. Finalmente, estos resultados indican que bajo concentraciones de etanol que varían del 2 al 8 %, en un amplio rango de operación del grupo electrógeno, no hay cambios significativos en las prestaciones del generador eléctrico y motor de combustión interna, de esta forma, con este estudio se demuestra que es posible usar el etanol sin que afecte el comportamiento de ambos motores, principalmente, con las condiciones de combustible experimentadas.

Agradecimientos

Se agradece al Programa para el Desarrollo Profesional Docente, para el Tipo Superior, PRODEP, por el apoyo recibido, así mismo se agradece de igual forma a la Coordinación de

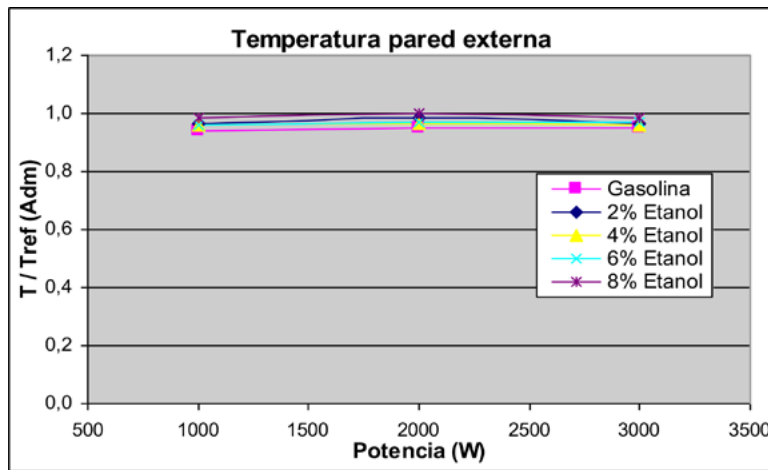


FIGURA 5. Resultados de la temperatura de la pared externa de escape.

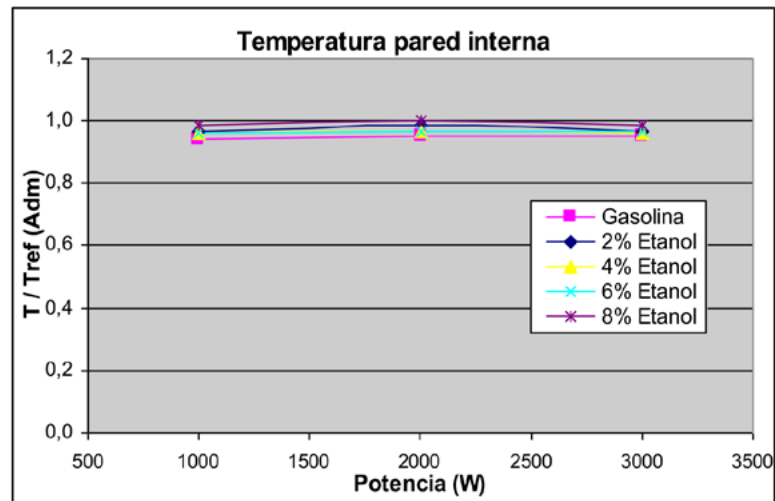


FIGURA 6. Temperatura de la pared interna de escape.

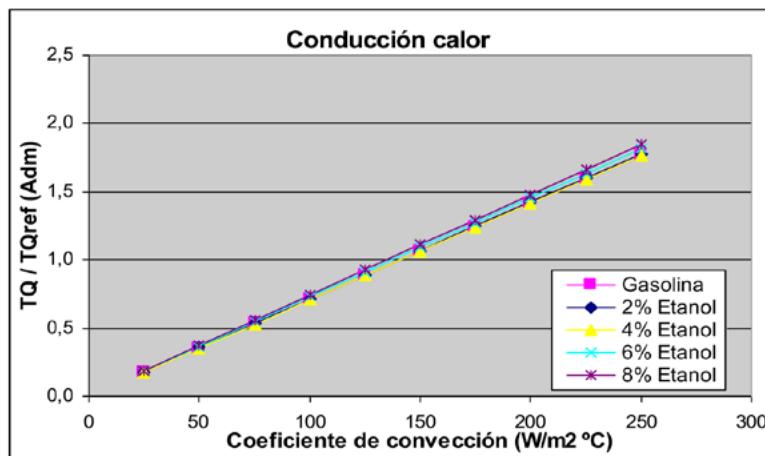


FIGURA 7. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 1000 W

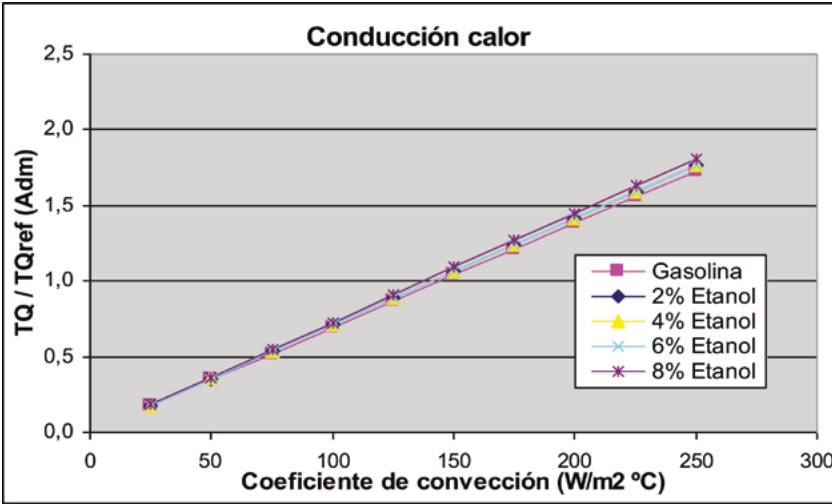


FIGURA 8. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 2000 W.

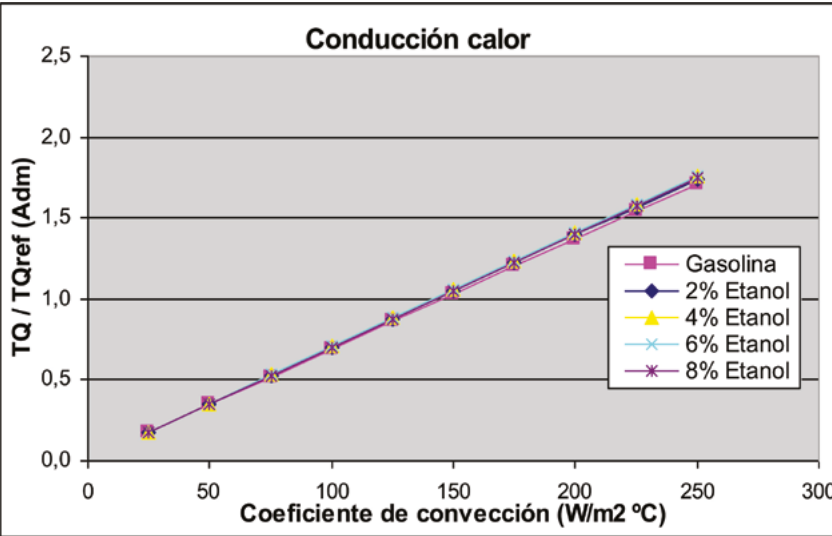


FIGURA 9. Estudio paramétrico de transferencia calor, modificando el coeficiente de convección para una carga de 3000 W

de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo CIC-UMSNH.

Referencias

- BAUER ET AL., 1997 HEAT TRANSFER AND MIXTURE VAPORIZATION IN INTAKE PORT OF SPARK-IGNITION ENGINE. SAE 972983. *M.I.T. SLOAN AUTOMOTIVE LAB*.
- COSTA, R., SODRÉ, J., 2011. COMPRESSION RATIO EFFECTS ON AN ETHANOL/GASOLINE FUELLED ENGINE PERFORMANCE. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 31, 278-283. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2010.09.007](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.09.007).
- EYIDOGAN, M., ÖZSEZEN, A.N., CANAKCI, M., TURKCAN, A., 2010. IMPACT OF ALCOHOL-GASOLINE FUEL BLENDS ON THE PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF AN SI ENGINE.
- HASAN, M.M., RAHMAN, M.M. AND RASUL, M. G., 2021. THE THERMAL AND AUTO-IGNITION PERFORMANCE OF A HOMOGENEOUS CHARGE COMPRESSION IGNITION ENGINE FUELLED WITH DIETHYL ETHER AND ETHANOL BLENDS, *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, Vol. 190.
- JIMÉNEZ, V. D., MENDOZA, C., SOLORIO, G., CEJA, L.E., GUERRERO, R., 2018. TRANSFERENCIA DE CALOR LOCAL EN UN SISTEMA DE ESCAPE EN UN MOTOR DE 4.1 L DE ENCENDIDO POR CHISPA. *ACADEMIA JOURNALS*, Vol. 10, No. 3, ISSN 1946-5351, MORELIA, MÉXICO.
- JIMÉNEZ MACEDO ET AL., 2019. CONSTRUCCIÓN, OPTIMIZACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNA CELDA DE HIDRÓGENO. *CECTI*, MORELIA, MÉXICO.
- MOFIJUR, M., RASUL, M. G., HYDE, J., AZAD, A. K., MAMAT, R., & BHUIYA, M. M. K., 2016. ROLE OF BIOFUEL AND THEIR BINARY (DIESEL-BIODIESEL) AND TERNARY (ETHANOL-BIODIESEL-DIESEL) BLENDS ON INTERNAL COMBUSTION ENGINES EMISSION REDUCTION. *RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, 53, 265-278.
- NATKIN RJ, TANG X, WHIPPLE KM, KABAT DM., 2002. STOCKHAUSEN WF. FORD HYDROGEN ENGINE LABORATORY TESTING FACILITY. *SAE TECHNICAL PAPER NO. 2002-01-0241*.
- OZSEZEN, A., CANAKCI, M., 2011. PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF ALCOHOL-GASOLINE BLENDS AT WIDE-OPEN THROTTLE. *ENERGY*, 36, 2747-2752. DOI:10.1016/J.ENERGY.2011.02.014
- PRASHANT, G.K., LATA, D.B. AND JOSHI, P.C., 2016. INVESTIGATIONS ON THE EFFECT OF ETHANOL BLEND ON THE COMBUSTION PARAMETERS OF DUAL FUEL DIESEL ENGINE. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, Vol. 96.
- RAKOPOULOS CONSTANTINE ET GIAKOUMIS EVANGELOS., 2009. *DIESEL ENGINE TRANSIENT OPERATION*, SPRINGER-VERLAG LONDON LIMITED, ISBN 978-1-84882-374-7, DOI 10.1007/978-1-84882-375-4.
- REYES, MIGUEL, 1994. MODELO DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA COLECTORES DE ESCAPE DE MOTORES ALTERNATIVOS. *TESIS DOCTORAL. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA*.
- YÜCESU, H., TOPGÜL, T., CINAR, C., OKUR, M., 2006. EFFECT OF ETHANOL-GASOLINE BLENDS ON ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS IN DIFFERENT COMPRESSION RATIOS. *APPLIED THERMAL ENGINEERING*, 26, 2272-2278. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2006.03.006](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.03.006).
- ZHANG, Z., WANG, T., JIA, M., WEI, Q., MENG, X., SHU, G., 2014. COMBUSTION AND PARTICLE NUMBER EMISSIONS OF A DIRECT INJECTION SPARK IGNITION ENGINE OPERATING ON ETHANOL/GASOLINE AND N-BUTANOL/GASOLINE BLENDS WITH EXHAUST GAS RECIRCULATION. *FUEL*, 130, 177-188. DOI: [HTTPS://DOI.ORG/10.1016/J.FUEL.2014.04.052](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.04.052)



Medición de temperatura en distintas partes en un motor de combustión interna a velocidades 800 y 1000 rpm

Juan José Piña Castillo, Renato González Bernal

Para citar este artículo: Piña Castillo J.J., González Bernal R. 2022. Medición de temperatura en distintas partes en un motor de combustión interna a velocidades 800 y 1000 rpm. Ciencia Nicolaita, número 83, 267-XX. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.566>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Medición de temperatura en distintas partes en un motor de combustión interna a velocidades 800 y 1000 rpm

Juan José Piña Castillo*, Renato González Bernal

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 9 de septiembre de 2021

Aceptado: 8 de noviembre 2021

RESUMEN

En el presente estudio se realiza el análisis del desempeño de un motor de combustión interna de seis cilindros en posición "V", utilizando como combustible gasolina magna. Se montó un banco de pruebas para monitorear la temperatura en tres puntos: la admisión, el radiador y el escape. El objetivo del trabajo es obtener un banco de datos al monitorear la temperatura a bajos índices de 800 y 1000 revoluciones por minuto. Las pruebas se realizaron utilizando un motor de combustión interna de 4.1 litros y cuatro tiempos. En una primera etapa se llevaron a cabo pruebas utilizando gasolina magna de 87 octanos. Para el registro de las temperaturas, las pruebas se realizaron utilizando el adquisidor de datos marca Fluke de 20 canales con termopares tipo k. El análisis de los resultados muestra el desempeño del motor a las condiciones descritas. Finalmente se presenta un estudio sobre las gráficas obtenidas que servirán para la asociación del incremento de las temperaturas del motor cuando se cambie el tipo de combustible con el funcionamiento del motor.

PALABRAS CLAVE: Motor de combustión interna, banco de pruebas, índices de revolución.

ABSTRACT

This study analyzes the performance of a six-cylinder internal combustion engine in "V" position, using gasoline as fuel. A test bench was set up to monitor the temperature at three points: intake, radiator and exhaust. The objective of the work is to obtain a data bank by monitoring the temperature at low rates of 800 and 1000 revolutions per minute. The tests were carried out using a 4.1-liter, four-stroke internal combustion engine. In a first stage, tests were carried out using 87-octane magna gasoline. For temperature recording, the tests were performed using a Fluke 20-channel data acquirer with k-type thermocouples. The analysis of the results shows the performance of the engine under the described conditions. Finally, a study of the graphs obtained is presented, which will be used to associate the increase in engine temperatures when the type of fuel is changed with engine operation.

KEYWORDS: Internal combustion engine, test bench, revolution indexes.

Introducción

Desde su aparición en siglo XIX, los motores de combustión interna forman parte fundamental en la generación de potencia mecánica con aplicaciones en diversas áreas en la industria hasta nuestros días. Durante su desarrollo y modificación del mismo se ha alcanzado una la eficiencia termodinámica límite, se ha reducido considerablemente las emisiones contaminantes que forman parte de los gases de efecto invernadero, así como la especialización de las tecnologías en función de las necesidades, los entornos socioeconómicos y las condiciones ambientales donde se han de utilizar.

El exitoso empleo de los motores de combustión interna, el diseño estructural de motores estructurales y la elevación de sus índices de potencia y rendimiento fueron posibles en gran medida gracias a las investigaciones y a la elaboración de la teoría sobre el proceso de funcionamiento de los motores (González *et al.*, 2015). Los sistemas de enfriamiento en los vehículos actuales con radiadores, son diseñados para que puedan operar en toda clase de tiempo y altitud sin tener que preocuparse del sobrecalentamiento (PF006., 2000).

Datos de la Organización Mundial de la Salud cita entre las principales fuentes de contaminación del aire provocada por partículas el transporte. Se estima que aproximadamente el 90% de las personas del mundo respiran aire contaminado y que en general los niveles más bajos de contaminación se registran en países de medidas de ingresos altos, aunque se han adoptado medidas a nivel mundial para bajar los índices de contaminación, no debemos olvidar que estas fuentes de contaminación dependen de

la demanda de productos, energía y servicios que utiliza el conjunto de la sociedad (OMS.,2018). La Secretaría de Energía del gobierno mexicano muestra un aumento del 48% en la demanda de petrolíferos en los últimos 20 años, impulsando el sector del transporte e industrial, los cuales han mostrado un incremento del 75% y 36%, respectivamente.

México ocupa el cuarto mayor mercado de gasolina a nivel mundial y la demanda está ligada a diferentes factores económicos, tales como: el crecimiento poblacional, el incremento, composición y eficiencia del parque vehicular, la estacionalidad y el nivel de precio prevalecientes (SENER., 2018). Las emisiones contaminantes que producen los motores de combustión interna son una preocupación a nivel mundial y en la actualidad existen regulaciones respecto a las emisiones de gases y obligan a los fabricantes a diseñar motores que cumplan con la normativa (Rafael M., 2014).

En México existe un gran potencial de recursos biomásicos para producir biocombustibles líquidos (bioetanol y biodiesel), sólidos y biogás. El potencial energético en el país según su tipo y origen son: madera de bosques nativos, residuos industriales, agrícolas de cosechas, cultivos alimenticios caña de azúcar, sorgo, aceite de palma, residuos de ganado. Existe una planta de etanol de maíz (Destilmex), que no opera porque no hay excedentes nacionales de maíz y porque el precio fijado por Petróleos Mexicanos (PEMEX) no compensa el costo de producción (Red Mexicana de Bioenergía, 2011).

Apartado experimental

En la presente sección se describe el apartado experimental realizado para la medición de las temperaturas en los diferentes sistemas del motor de combustión interna. Se ha registrado la temperatura en el sistema de admisión, en el sistema de escape y en el radiador. Estas temperaturas son de importancia ya que representan los parámetros de comparación cuando se cambie el tipo de combustible y se recomienda analizar el aumento de temperatura sobre los elementos y su tribología en otro trabajo futuro. En la figura 1 se muestra el

arreglo experimental para la obtención de las temperaturas a 800 y 1000 rpm, que es objetivo del presente estudio (Ver tabla 1). En las figuras 2 y 3 se muestra el motor que utilizaremos para la obtención de las temperaturas y análisis de esta investigación. En la figura 4, se muestra la posición del termopar que registró la temperatura del aire de admisión después del filtro del aire de entrada. Esta temperatura registrada nos indica las condiciones con las que entra el aire al motor y tiene relación con la densidad de masa en el interior del cilindro del motor. El termopar empleado para registrar dicha temperatura es de tipo K.

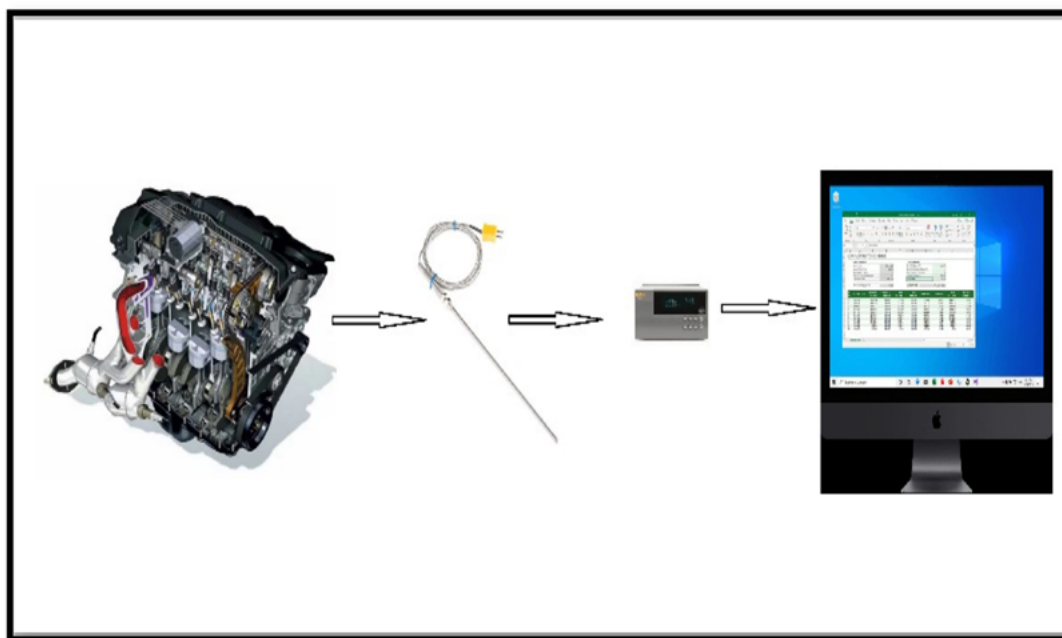


FIGURA 1. Arreglo experimental.



FIGURA 2. Vista superior del motor de 4.1 L.



FIGURA 3. Vista lateral del motor de 4.1 L.

TABLA 1, se muestran las características del motor de combustión.

Cilindro	4097 cc
Número de cilindros	6 en línea
Diámetro	98.43 mm
Carrera	98.66 mm
Válvulas de escape	1 por cilindro
Válvulas de admisión	1 por cilindro
Suministro de combustible	Carburador



Figura 4. Termopar en la admisión.

Por otra parte, el sistema de adquisición de datos marca Fluke de 20 canales, nos hace un registro de temperatura cada segundo y lo presenta en una tabla generada en el programa Excel.

En la figura 5 se muestra que la temperatura que se localiza a la entrada del radiador, es decir, es a la temperatura que sale del motor y que después se enfriará a su paso por el radiador. El objetivo de este punto de medir la temperatura en el interior de este, además, se muestra el punto de registro del termopar del radiador.

En la figura 6, se muestra el punto de registro de la temperatura a la salida de los gases en el escape.

En la carrera de escape, la salida del gas se da de forma espontánea y dependiendo del grado de carga que se tenga en el motor, se libera una cantidad calor, que es la que motiva que se genere por una parte en trabajo que realiza el pistón, por otra parte, una vez finalizada la carrera de trabajo, se evacuan los gases a la apertura de la válvula de escape.



FIGURA 5. Termopar en la radiador.

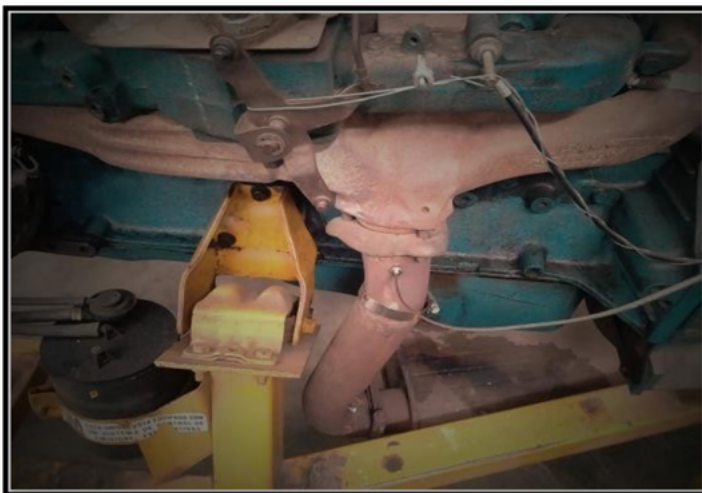


FIGURA 6. Termopar en el escape.

Análisis de resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos del presente trabajo de investigación. Una vez instrumentado el banco de pruebas, se obtuvieron las tablas de datos en un archivo de Excel y a partir de estos se generaron las siguientes gráficas para su análisis.

En la figura 7, se muestran las medidas de temperatura en la admisión registradas en el banco de pruebas de motor a 800 revoluciones por minuto.

En la figura 8, se muestran las medidas de temperatura en el radiador registradas en banco de pruebas del motor a 800 revoluciones por minuto.

En la figura 9 se muestran las medidas de temperatura en el escape registradas en banco de pruebas del motor a 800 revoluciones por minuto.

En la figura 10, se muestra las medidas de temperatura en la admisión registradas en banco de pruebas del motor a 1000 revoluciones por minuto.

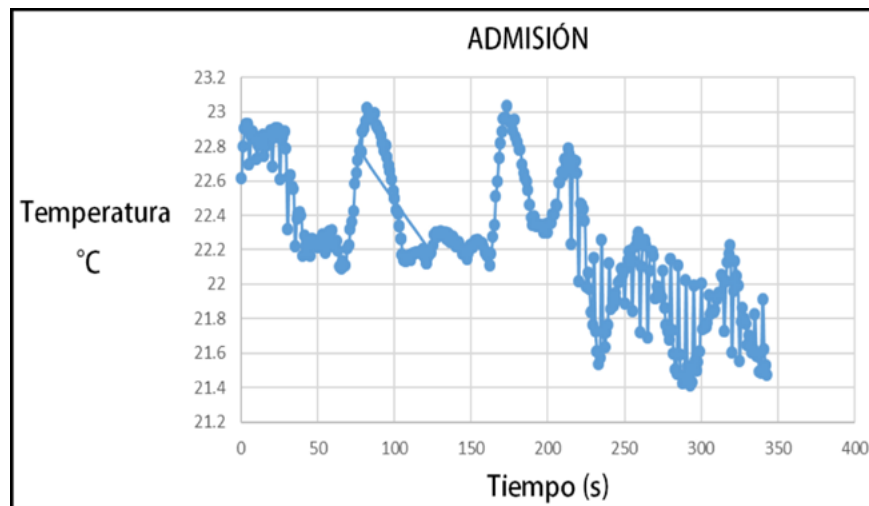


FIGURA 7. Registro de las temperaturas en la admisión registradas a 800 rpm.

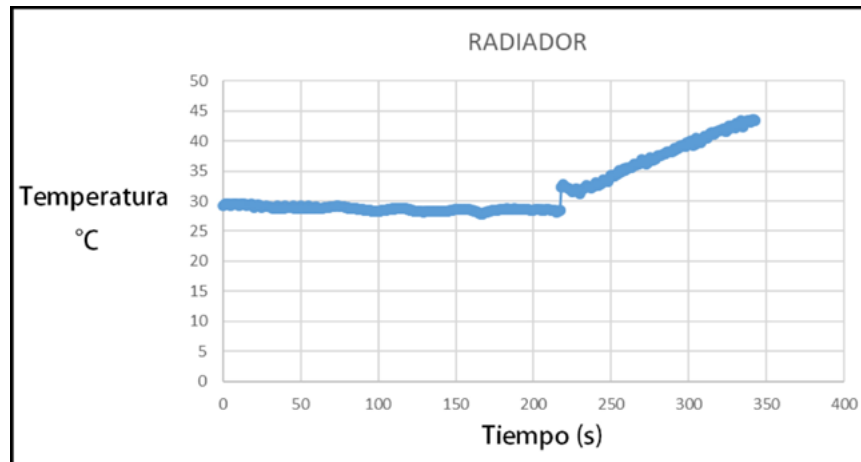


FIGURA 8. Registro de las temperaturas en el radiador registradas a 800 rpm.

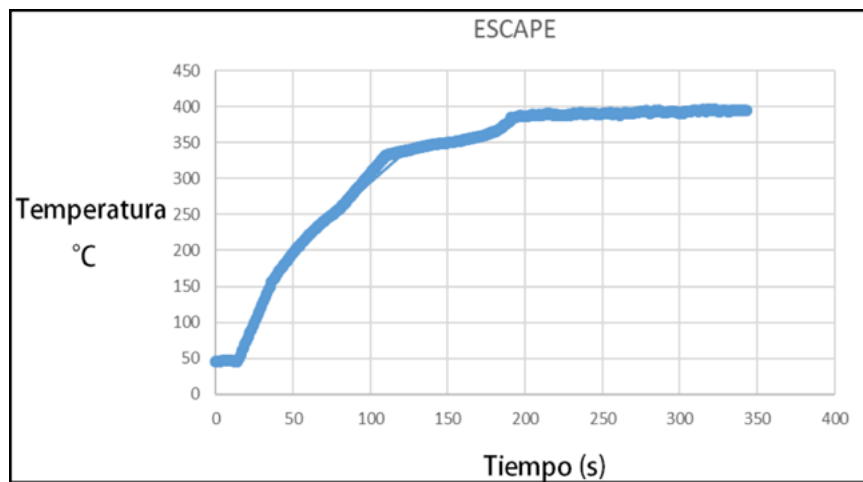


FIGURA 9. Registro de las temperaturas en el escape registradas a 800 rpm.

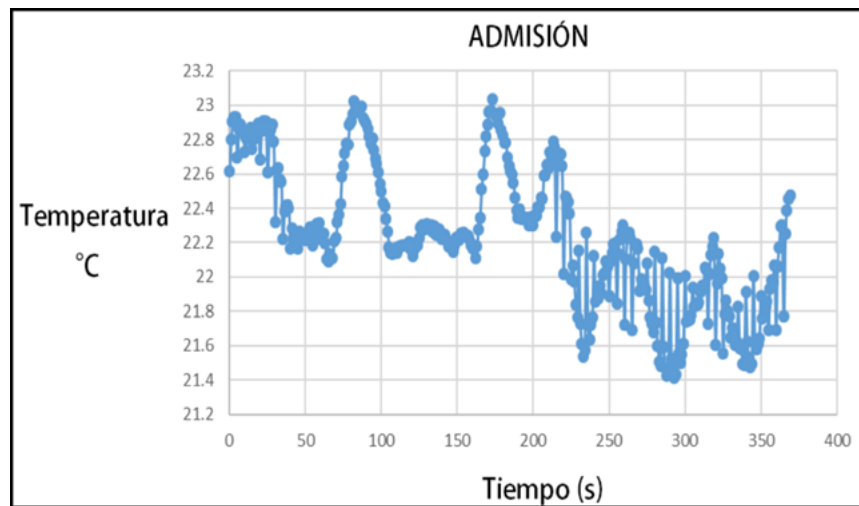


FIGURA 10. Registro de las temperaturas en la admisión registradas a 1000 rpm.

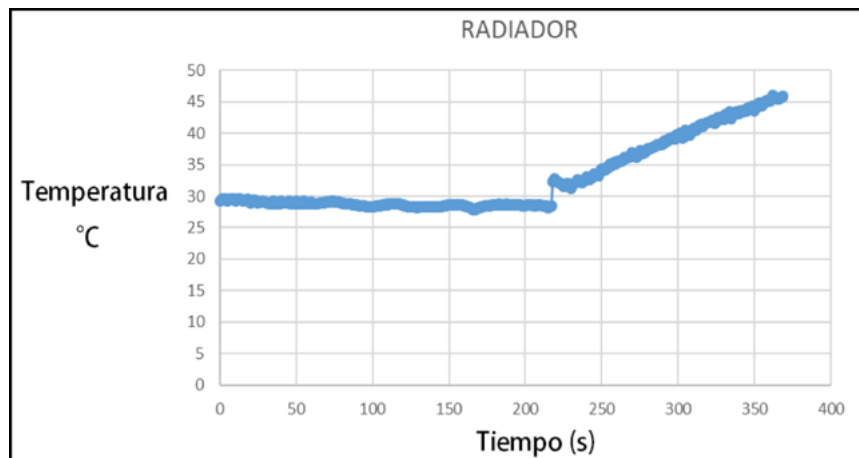


FIGURA 11. Registro de las temperaturas en el radiador registradas a 1000 rpm.

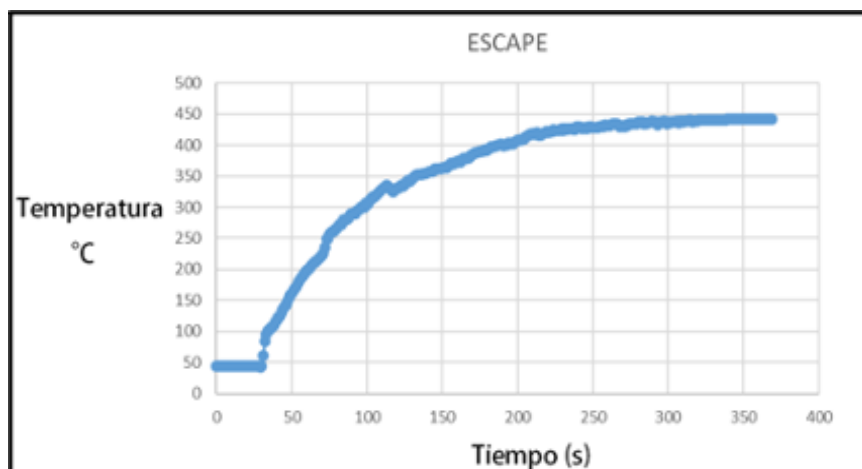


FIGURA 12. Comparación de las temperaturas en el escape registradas a 800 y 1000 rpm.

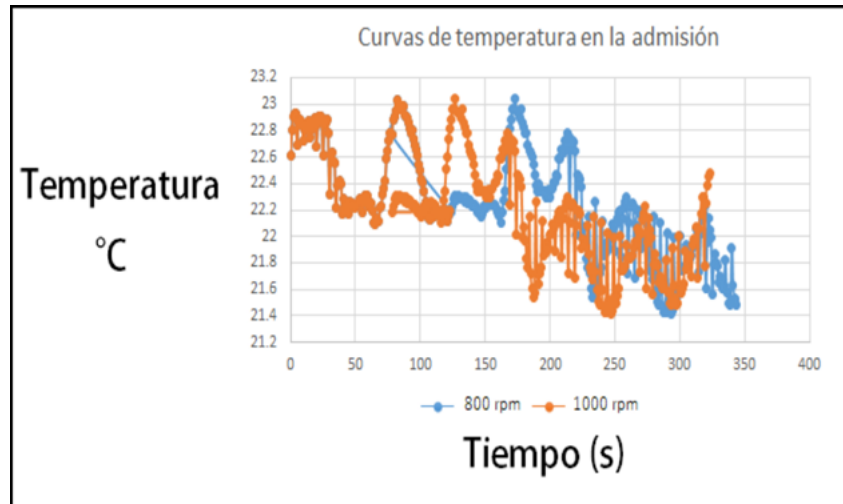


FIGURA 13. Comparación de las temperaturas a 800 y 1000 rpm

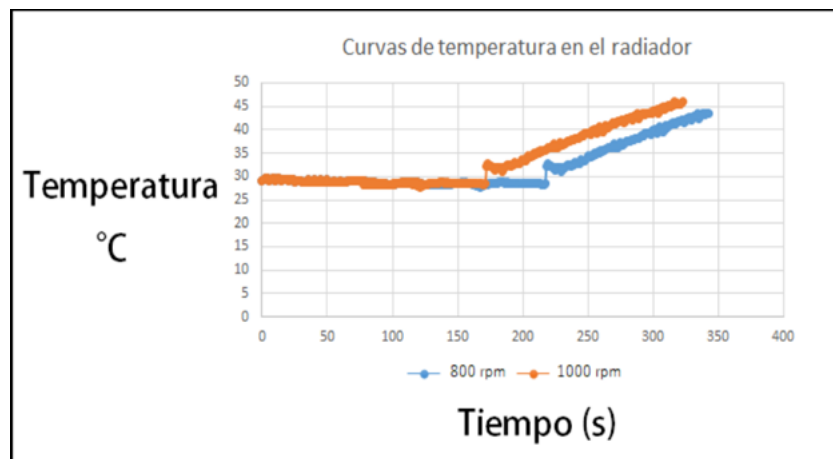


FIGURA 14. Comparación de las temperaturas a 800 y 1000 rpm

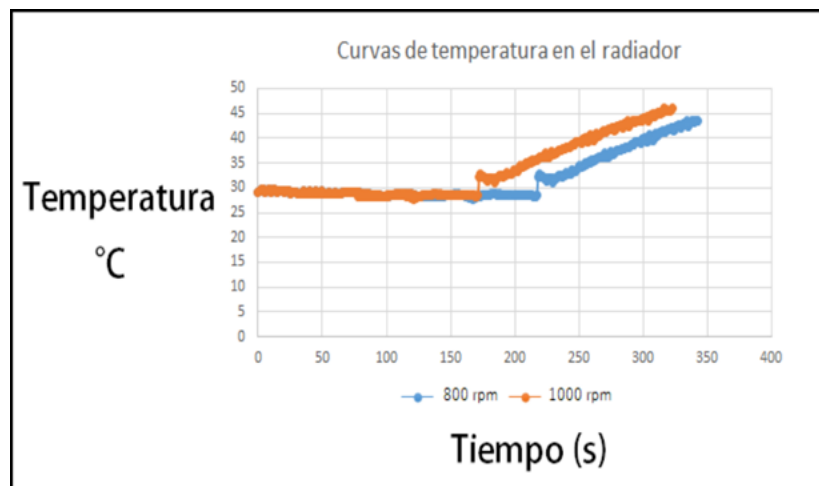


FIGURA 15. Registro de las temperaturas a 800rpm

En la figura 11, se muestran las medidas de temperatura en el radiador registradas en banco de pruebas del motor a 1000 revoluciones por minuto.

En la figura 12 se muestran las medidas de temperatura en el escape registradas en banco de pruebas del motor a 1000 revoluciones por minuto.

En la figura 13, se observa que en la admisión al aumentar el número de revoluciones se puede observar en la gráfica una disminución de temperatura a medida que aumenta el flujo de aire debido a la compresibilidad de la mezcla aire combustible. En los casos a 800 rpm y 1000 rpm se observa un registro de temperatura alrededor de los 21.5°C, que se puede considerar de operación para mantener la relación aire/combustible a dichas revoluciones.

En la figura 14 las revoluciones de operación de 800 rpm y 1000 rpm son muy similares y tienen una temperatura inicial de 28.64°C, tarda un tiempo para la estabilización aproximadamente de 3 minutos hasta la temperatura de 43.38°C. Haciendo un análisis de las gráficas entre las revoluciones del radiador, se obtuvo una variación alrededor de 13.27°C.

En la figura 15 para el escape se observa que para los índices de revolución de 800 y 1000 rpm inician con un registro de temperatura desde los 42°C y que en el menor índice de revolución de operación el motor se estabiliza aproximadamente en 3 minutos, mientras que al aumentar el índice de revolución se incrementa a 4.2 minutos.

Conclusiones

En el desarrollo del presente trabajo se ha desarrollado una metodología para la medición de temperatura en la admisión, radiador y escape en un motor de combustión interna a velocidades 800 y 1000 rpm. El interés de este procedimiento radica en generar un banco de datos que servirá para compararlos cuando el

motor trabaje con otros tipos de combustible, además, de proponer una modificación de los materiales en algunos componentes del motor con la finalidad de hacerlo más eficiente y que permita cumplir con las normas de emisión de gases tipo invernadero. Para la admisión se observó que a medida que se aumentó el número de rpm hubo una disminución de temperatura. En cuanto al radiador, dentro del 800 y 1000 rpm, el incremento de temperatura fue de 13.27°C. Finalmente, en el escape se observó que a medida que se incrementa el número de revoluciones por minuto, se incrementó la temperatura.

Con este estudio se demuestra que es posible obtener las mediciones de temperatura del motor de combustión interna con las condiciones de combustible utilizadas.

Agradecimientos

Se agradece al Programa Estímulos al Desempeño del Personal Docente, por el apoyo recibido de la Coordinación de la Investigación Científica y a la Revista Ciencia Nicolita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Bibliografía

- CARRERAS, RAMÓN, ANTONIO, AND COMAS, ÁNGEL. 1994. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA: FUNDAMENTOS. EDITORIAL UPC.
- EDWARD F. OBER. 1999. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ANÁLISIS Y APLICACIONES. 2DA EDICIÓN, EDITORIAL CECSA.
- FRANCIS J. A. 2003. DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UNA METODOLOGÍA PARA CARACTERIZAR TÉRMICAMENTE RADIADORES AUTOMOTRICES. [HTTPS://TESIS.IPN.MX/BITSTREAM/HANDLE/123456789/1642/ABUGABER.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y](https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/1642/ABUGABER.PDF?SEQUENCE=1&ISALLOWED=Y)
- GONZÁLEZ GIRALDO O. E. 2015. MODELADO TERMODINÁMICO Y ESTRUCTURAL DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO. [HTTPS://CORE.AC.UK/DOWNLOAD/PDF/71398518.PDF](https://core.ac.uk/download/pdf/71398518.pdf)
- KIAT NG, H. K. 2013. ADVANCES IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND FUEL TECHNOLOGIES. INTECHOPEN.

- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. [HTTPS://WWW.WHO.INT/ES/NEWS/ITEM/02-05-2018-9-OUT-OF-10-PEOPLE-WORLDWIDE-BREATHE-POLLUTED-AIR-BUT-MORE-COUNTRIES-ARE-TAKING-ACTION](https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action)
- OSSERAIN N. 2018. NUEVE DE CADA DIEZ PERSONAS EN EL MUNDO RESPIRAN AIRE CONTAMINADO. (6) ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. [HTTPS://WWW.WHO.INT/ES/NEWS/ITEM/02-05-2018-9-OUT-OF-10-PEOPLE-WORLDWIDE-BREATHE-POLLUTED-AIR-BUT-MORE-COUNTRIES-ARE-TAKING-ACTION](https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action)
- PROF. F. PAYTI, PROF. J. M. DESANTES. 2011. MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS. EDITORIAL UPV.
- RAFAEL M. M. Y. 2014. CARACTERIZACIÓN DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CON DOS TIPOS DE COMBUSTIBLE. [HTTPS://WWW.IMT.MX/ARCHIVOS/PUBLICACIONES/PUBLICACIONTECNICA/PT417.PDF](https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicacionTecnica/PT417.PDF)
- RED MEXICANA DE BIOENERGÍA A.C. 2011. LA BIOenergía EN MÉXICO, SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS. [HTTPS://REMBIO.ORG.MX/WP-CONTENT/UPLOADS/2014/12/CT4.PDF](https://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.PDF)
- SECRETARÍA de Energía, 2018. DIAGNÓSTICO DE LA INDUSTRIA DE PETROLÍFEROS EN MÉXICO. [HTTPS://WWW.GOB.MX/CMS/UPLOADS/ATTACHMENT/FILE/416899/PARTE_1_VF.PDF](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/416899/PARTE_1_VF.PDF)
- SIMÓN J. FYGUEROA S, JESÚS O. ARAQUE M. 2015. EL PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA. EDITORIAL VENEZOLANA 1ª EDICIÓN.



Modelación y construcción de un hidrociclón

Renato González Bernal, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez

Para citar este artículo: [González Bernal R., Cirilo Trujillo Jiménez J.C. 2022. Modelación y construcción de un hidrociclón. Ciencia Nicolaita, número 83, 278-288 DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.571>](#)

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Modelación y construcción de un hidrociclón

Renato González Bernal*, Jesús Cirilo Trujillo Jiménez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Mecánica

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 16 de septiembre de 2021

Aceptado: 9 de noviembre de 2021

RESUMEN

Se realizó la modelación y construcción de un hidrociclón como parte del equipo de perforación de pozos profundos para la extracción de agua y vapor de agua, el cual tiene la función de separar las arenas del suelo del fluido de perforación para no dañar la bomba de lodos. En el presente trabajo se utilizó la modelación matemática para llevar a cabo la construcción del prototipo y finalmente realizar la modelación física. Este modelo matemático se usó para diagnosticar el funcionamiento del diseño previo que se tenía del hidrociclón. Una vez terminada la modelación matemática se llevó a cabo la construcción del prototipo, en acero A 36. Se realizaron las pruebas en el prototipo construido utilizando una mezcla de agua con arena para evaluar el funcionamiento del hidrociclón. Se determinó el tamaño de corte d50, de las partículas. El hidrociclón funciona aceptablemente, separando las partículas de mayor tamaño.

PALABRAS CLAVE: modelación, construcción, hidrociclón, tamaño de corte, torbellino

ABSTRACT

The modeling and construction of a hydrocyclone was carried out as part of the deep well drilling equipment for water extraction, which has the function of separating the sands from the ground from the drilling fluid so as not to damage the slurry pump. In the present work, mathematical modeling was used to carry out the construction of the prototype and finally perform physical modeling.

This mathematical model was used to diagnose the operation of the previous design of the hydrocyclone. Once the mathematical modeling was finished, the construction of the prototype was carried out, in A 36 steel. Tests were performed on the prototype built using a mixture of water with sand to evaluate the operation of the hydrocyclone. The cut size d50 of the particles was determined. The hydrocyclone works acceptably by separating the larger particles.

KEYWORDS: modeling, construction, hydrocyclone, cut size, whirlwind

Introducción

Los pozos excavados se encuentran entre las fuentes de aprovisionamiento de agua más antiguas. Los primeros pozos eran simples agujeros sin protección frente a los desprendimientos y que no han resistido el paso del tiempo, desapareciendo.

Existen tres grandes categorías de pozos: los excavados, los hincados y los aforados, más comúnmente conocidos como perforaciones, término ambiguo que designa al mismo tiempo una obra y una técnica de trabajo. Muchos de los pozos modernos son pozos aforados excavados por percusión de una herramienta en el suelo o por la acción rotatoria de una herramienta cortante que gira alrededor de un eje vertical y rompe y tritura las rocas, cuyos residuos suelen llevarse hasta la superficie a través de lodos. Una vez en la superficie la mezcla de lodo bentónico con residuos del suelo se limpia para separar los residuos del suelo a través de la circulación del flujo en hidrociclones y poder volver a utilizar el lodo bentónico en la bomba de lodos sin causar daños a ésta (Breff *et al.*, 2014).

Los hidrociclones son equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido, ejemplo de ello es el lavado de lodos eliminando partículas nocivas (AMP). La función principal del hidrociclón es separar los sólidos suspendidos en un determinado flujo de la masa de “alimentación”, en dos fracciones, una que acompaña al flujo llamado “descarga” que lleva en suspensión los sólidos más gruesos que un determinado tamaño de corte y otra fracción que acompaña al flujo denominado “rebose”, que lleva en suspensión los sólidos más finos que el citado tamaño. El flujo de masa de alimentación entra tangencialmente en la parte cilíndrica a una cierta presión, lo que genera su rotación alrededor del eje longitudinal del hidrociclón, formándose un “torbellino primario” descendente hacia el vértice inferior del hidrociclón. Las partículas más gruesas giran cercanas a la pared por efecto de la aceleración centrífuga, siendo evacuadas a través de la boquilla en forma de pulpa espesa. Debido a las reducidas dimensiones de dicha boquilla, solamente se descarga una parte de la suspensión, creándose en el vértice inferior un “torbellino secundario” de trayectoria ascende-

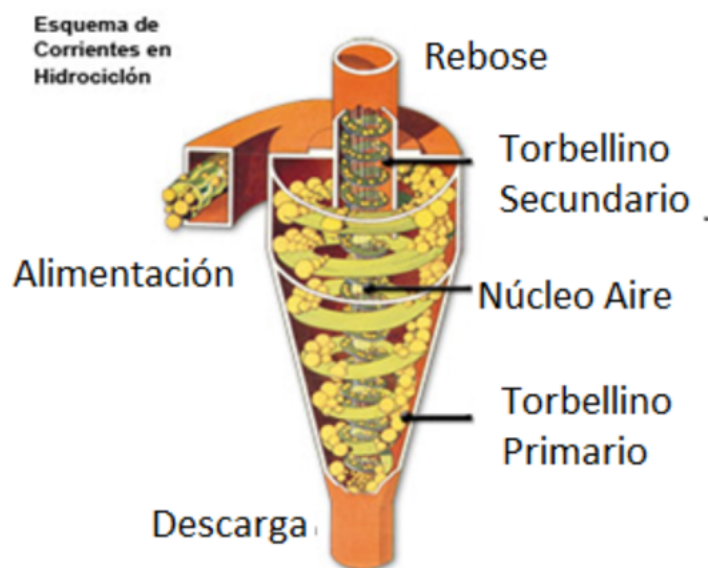


FIGURA 1. Hidrociclón.

nte, que es donde se produce la separación al generarse en este punto las mayores aceleraciones tangenciales. Esta corriente arrastra hacia el rebose las partículas finas junto con la mayor parte del líquido, que se descarga a través de un tubo central situado en el cuerpo cilíndrico superior del hidrociclón. Para ajustar el tamaño de separación de las partículas sólidas entre 10 y 500 micras, se regula la aceleración del torbellino y se modifica la geometría y/o toberas del hidrociclón (Betancourt et al. 2020). La arena de trituración de rocas puede tener un tamaño máximo de 4,76 mm y como tamaño mínimo 0,149 mm. Por lo que en este trabajo se establece separar partículas de 149 micras (cementos Ciba, 2017).

Objetivos

El propósito de este trabajo es modelar y construir un prototipo de hidrociclón en el laboratorio de manufactura de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UMSNH, que contribuya en la perforación de pozos profundos realizados por esta institución.

Dinámica de flujo

El diseño y la operación de los hidrociclones dependen de los patrones de flujo que se producen en el interior del equipo durante la clasificación. Los patrones de flujo son gobernados por el número de Reynolds (Re) de la corriente de pulpa en el hidrociclón (Duran, 2013).

Tamaño de corte

El tamaño de corte es definido como en el diámetro de una partícula que tiene una probabilidad de ser separada. La separación de partículas se basa en la diferencia de densidad entre el líquido y la materia a separar. Una diferencia de densidad más alta da como resultado una separación más fina. El tamaño de partícula separada con

la geometría propuesta y las condiciones de flujo se puede determinar mediante la siguiente expresión matemática (Aryal et al., 2019).

$$d_p = \sqrt{\frac{n \times 0.01 \times 0.5(D - D_o) \times 18\eta}{(\rho_s - \rho_l)a\lambda}} \quad (1)$$

Donde

$$\lambda = \frac{L}{\frac{Q}{\pi(\frac{D^2 - D_o^2}{4})}} \quad (2) \quad \text{y} \quad a = \frac{U_i^2}{D/2} \quad (3)$$

d_p = Diámetro de la particular eliminada, m

n = Probabilidad de atrapamiento de partículas %

D = Diámetro de la parte cilíndrica, m.

D_o = Diámetro de reboso, m

η = Viscosidad dinámica del agua, pa-s

ρ_s = Densidad del sólido, kg/m³

ρ_l = Densidad del líquido, kg/m³

λ = Tiempo de residencia, s

a = Aceleración, m/s²

U_i = Tasa de flujo de entrada, m³/s

Q = Velocidad inicial, m/s

La nitidez de esta clasificación viene dada por la relación $I = d_{75}/d_{25}$, el índice de nitidez indica la pendiente de clasificación de la curva. Por lo general las curvas de clasificación se modelan con funciones sigmoidales por ejemplo Rosin Rammler (Vesiland, 1980)

$$C(x_i) = 1 - e^{(-0.693(\frac{x_i}{d_{50}})^{\gamma})} \quad (4)$$

x_i = el tamaño de partícula

$$\gamma = \frac{1.5725}{\ln(I)} = \text{parámetro experimental dependiente de la nitidez.}$$

Eficiencia de un hidrociclón

El método más utilizado para evaluar la eficiencia de un ciclón es mediante la construcción de la curva de rendimiento. Esta curva relaciona el porcentaje de cada tamaño presente en la sección de alimentación que es enviado al ápice con el tamaño de la partícula. El punto de corte d_{50} se define como el valor del tamaño de partículas que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa o a la fracción fina o como aquel punto sobre la curva para el cual el D50% de las partículas de ese tamaño en la alimentación se presentan en el derrame.

Diferentes modelos matemáticos desarrollados para los hidrociclones incluyen el término d_{50} corregido, tomando de la curva de

de clasificación corregida. La corrección de esta curva puede ser necesaria para sólidos de todos los tamaños que son enviados a la descarga lo cual genera un cortocircuito en proporción directa a la fracción del agua en la alimentación y que llega a la sección de descarga (Pedraza, 2018).

La eficiencia de separación o imperfección se encuentra dada por:

$$I = \frac{d_{75} - d_{25}}{2d_{50}} \quad (5)$$

Se puede tomar como referencia que un valor de cero, indica una clasificación ideal (Pedraza, 2018).

Metodología

El trabajo se organizó de la siguiente manera: primero se obtuvo el diseño de el hidrociclón, se realizó la modelación matemática, construcción y se realizaron pruebas físicas.

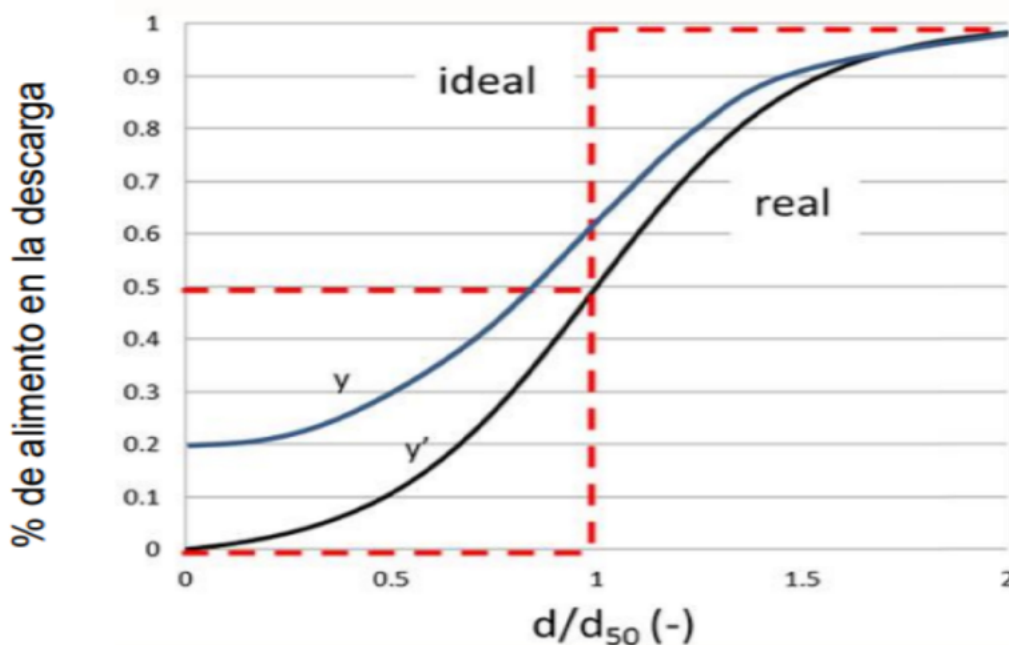


FIGURA 2. Curva de rendimiento sin corregir y corregida.



FIGURA 3. Esquema de metodología.

Geometría

Para la modelación y elaboración del hidrociclón se consideró la geometría mostrada en la figura 4. La elección de las dimensiones se realizó después de revisar en la literatura las relaciones geométricas expuestas (Rietema, 1961; Aryal *et al.*, 2019).

Modelación matemática

Se utilizó el modelo de turbulencia K-Omega SST, el cual combina la formulación de transporte de esfuerzo cortante y el uso de la formulación de capa límite. Con ayuda de un software llamado Simscales® se resuelven las ecuaciones del modelo, aplicando esquemas de discretización y solucionadores de ecuaciones (Mendoza *et al.*, 2019; Simscales®).

Geometría

Se realizó el volumen interior del hidrociclón con ayuda del software Solidworks®.

Materiales

Se seleccionó agua como fluido.

Condiciones iniciales

El tipo de flujo que se seleccionó fue incompresible estacionario.

Condiciones de Frontera

Las paredes se consideraron como muros de no deslizamiento, el flujo de entrada fue de 0.003 m/s, se consideró la presión atmosférica en las salidas.

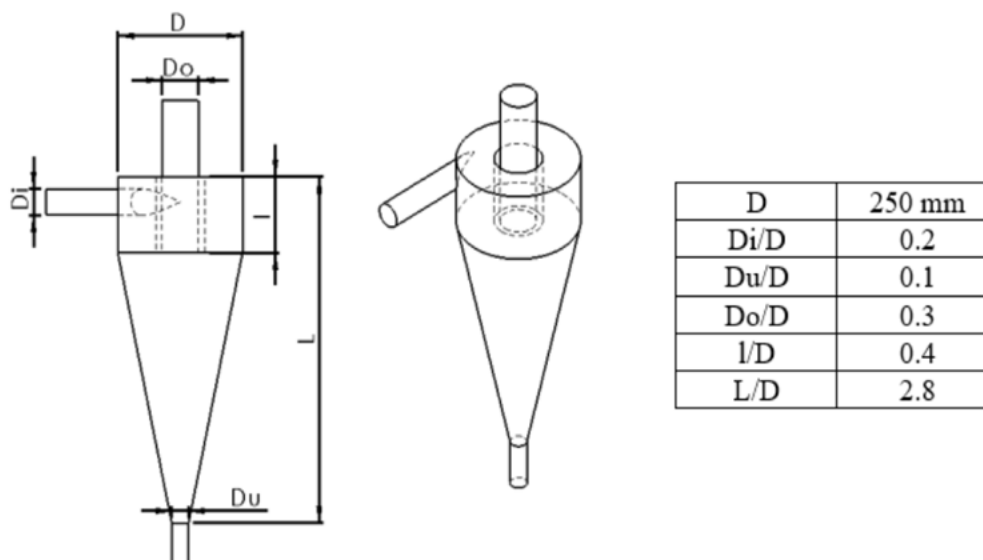


FIGURA 4. Geometría del prototipo del hidrociclón, cotas en milímetros.

Mallado

Se utilizó la herramienta de mallado automático hex-dominant el cual genera una malla que forma parte del software de código abierto OPENFOAM®.

Esta herramienta genera mallas tridimensionales no estructuradas o híbridas que consisten en elementos hexaédricos.

El hidrociclón mallado se muestra en la figura 5. El mallado contiene 3.2 M de elementos.

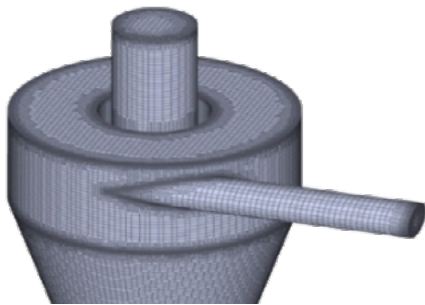


FIGURA 5. Malla del hidrociclón.

Solución

Finalmente se resolvió y se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 3. Representación matemática del modelo (Simscale®)

La energía turbulenta k viene dada por:

$$k = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (6)$$

Donde U es la velocidad media del flujo e I es la intensidad de la turbulencia.

La intensidad de la turbulencia da el nivel de turbulencia y se puede definir a continuación:

$$I = \frac{u'}{U} \quad (7)$$

Donde u' es la raíz cuadrada de las fluctuaciones de la velocidad turbulenta dada como:

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k} \quad (8)$$

La velocidad media U se puede calcular de la siguiente manera:

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2} \quad (9)$$

La tasa de disipación turbulenta específica se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

$$\omega = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{1}{2}}}{l} \quad (10)$$

Donde C_μ es la constante del modelo de turbulencia que usualmente toma el valor 0.09, k es la energía turbulenta, l es la escala de longitud turbulenta.

La escala de longitud de turbulencia describe el tamaño de grandes remolinos que contienen energía en un flujo turbulento.

Por tanto, la viscosidad turbulenta ν_t se calcula como:

$$\nu_t = \frac{k}{\omega} \quad (11)$$

Se obtuvieron las gráficas de campos de velocidades en los diferentes planos xz y xy , como se muestra en las figuras 6 y 7. En la figura 6, plano xz , se pueden observar los vectores de velocidad en tres posiciones diferentes, en la primera posición observamos que el flujo cercano a las paredes va descendiendo, en la parte media tiene velocidades horizontales y cercano al centro el flujo va ascendiendo. En el plano 2 la mayor diferencia que se observa respecto al plano anterior es que el flujo asciende a menor velocidad y conforme bajamos en el hidrociclón la velocidad de ascenso disminuye. También observamos que las mayores presiones se tienen en la pared del hidrociclón.

En la figura 7 se puede observar la formación del torbellino primario y el flujo ascende

dente por la parte interna del hidrociclón.

La aceleración centrífuga en el hidrociclón hace que las partículas de arena que tienen mayor densidad y tamaño, se localicen en el exterior del hidrociclón, descendiendo por el torbellino primario y saliendo por la descarga, debido a la reducción del área en la salida del hidrociclón el flujo no puede salir por la descarga, formándose un torbellino ascendente en el centro, lo que significa que el fluido sale por el reboso. También es posible observar en la figura 6 y 7 que, en la descarga con este flujo, el fluido sale en forma de espiral, por lo que analizado el modelo matemático, se considera pertinente su construcción.

Construcción del hidrociclón

Una vez propuesta la geometría se procedió con la manufactura del prototipo del hidrociclón, para lo cual se dividió en cinco partes principales:

- Cilindro superior y tubo de entrada
- Cono superior.
- Cono inferior.
- Salida inferior.
- Estructura.

Cono superior. Se calcularon las dimensiones de la plantilla para el cono superior. El cono se dividió en dos partes ya que la roladora está limitada a fabricar un diámetro mínimo de 125 mm de diámetro.

Cilindro superior. El cilindro se fabricó de lámina de acero A36 calibre 14. El material fue rolado y soldado. Se acoplaron el tubo de entrada de flujo y la salida de reboso como se muestra en la figura 8.

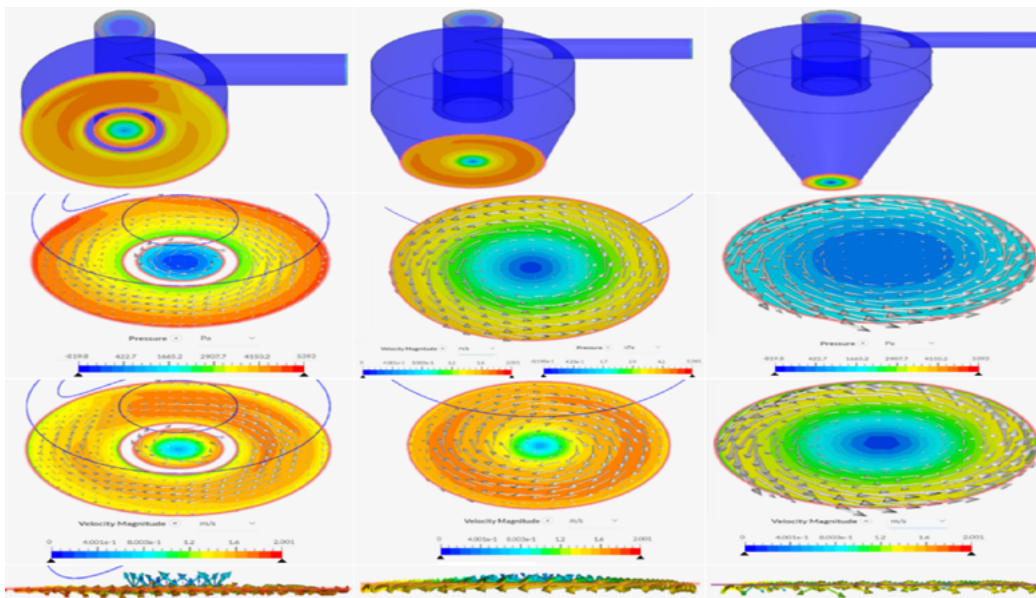


FIGURA 6. Modelación matemática del hidrociclón. Vectores de velocidad en el plano xy, líneas de corriente.

Fila 1 (posición) Fila 2 (contorno de presión) Fila 3 y 4 (contornos y vectores de velocidad a diferentes en el hidrociclón plano xz).

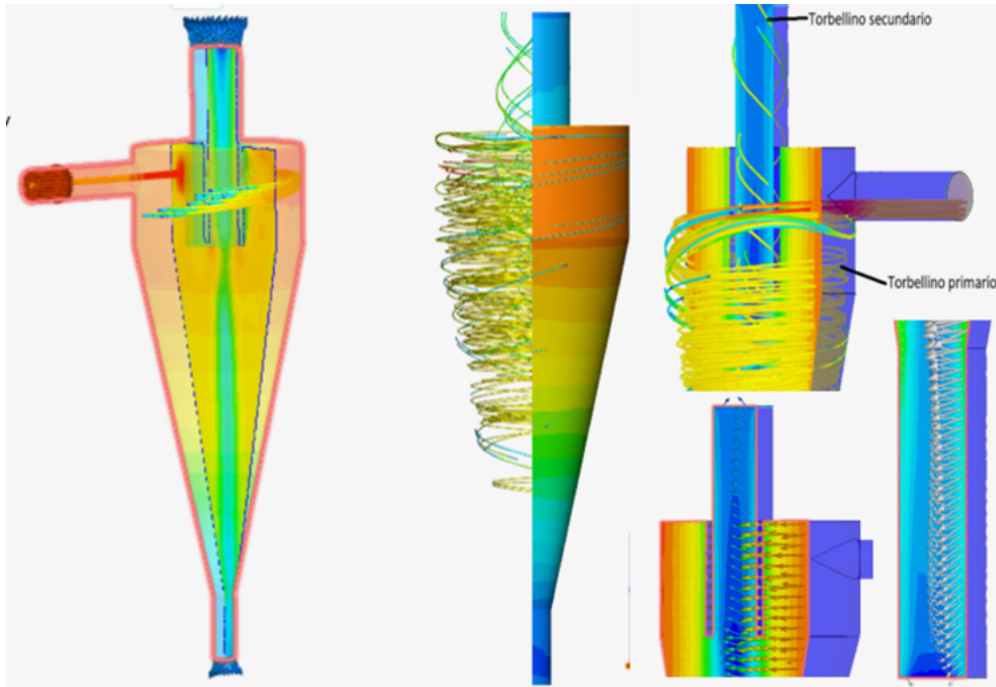


FIGURA 7. Modelación matemática del hidrociclón. Vectores de velocidad en el plano xy, líneas de corriente.



FIGURA 8. Cono superior e inferior.

Cono inferior. El cono inferior se fabricó en tres partes diferentes A, B y C, figura 8. Estas partes fueron torneadas y se unieron por medio de soldadura y reducen el diámetro interior del cono de 125 mm hasta de 50 mm.

Salida inferior. En la salida inferior se utilizó una sección más de reducción acoplado a un tubo de 1 pulgada de diámetro cédula 40 en la descarga.

Soporte. El soporte se fabricó una vez terminado el hidrociclón. Su principal función es mantener estático y en posición vertical al hidrociclón, para lo cual se determinó la fuerza que debería resistir la estructura y no se vuelque. Se realizó en PTR de 1.5 pulgadas cédula 14, se usaron articulaciones para sujetar el hidrociclón, como se muestra en la figura 8.

$$\sum_s F_x + \sum_v F_v = \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV + \int_{sc\ out} upudA - \int_{sc\ in} upudA \quad (12)$$

Sustituyendo valores

$$F_x = 82.73 \text{ N} \quad M = FL = 82.73 * 1.8 = 148.9 \text{ Nm}$$

$$\tau = \frac{F}{A} + \frac{MD}{A} = 1.823 \text{ MPa} \quad (13)$$

Se considera conectar la estructura al piso mediante pernos de ½ pulgada grado SAE 1, con una resistencia de 220 MPa (Budynas *et al.*, 2008), para estabilizar el hidrociclón, los cuales generan una resistencia suficiente agua en el tanque de descarga.

Metodología de la prueba

Inicialmente se hicieron pruebas hidrostáticas en el hidrociclón. Una vez verificado que el prototipo no tuviera pérdidas, se realizó el estudio de funcionamiento de separación de material en el que se manejó una mezcla de agua con arena (5 kg/250 lts), figura 8. La arena simula la roca triturada del suelo. Se usa-

ron tres tanques el alimentador, el de descarga primaria y el de descarga por el tubo de reboso. Para llevar el agua al hidrociclón se utilizó una motobomba. Entre la bomba y el hidrociclón se alimentaba la arena y se obtuvo la mezcla de agua con arena. Se midió el caudal con un flujómetro ultrasónico el cual reportó un promedio de 175 lts/min. En el tubo de reboso del hidrociclón se conectó una tubería que mandaba la mezcla al tanque de descarga de reboso y el tubo inferior descargaba el agua en el tanque de descarga. No se pudieron hacer mediciones del caudal en la descarga con el flujómetro ultrasónico ya que el tubo no se llenaba completamente de fluido.

Una vez terminado el proceso de bombeo, se dejaron sedimentar los sólidos de la mezcla un tiempo de 48 hrs. Finalmente se recolectaron los sólidos en el tanque de descarga, el cual contenía gran cantidad de arena como se observa en la figura 9. Se realizó el mismo procedimiento en el tanque del reboso para observar cuánta arena gruesa había tomado la ruta del reboso, analizando el tanque se encontró una pequeña cantidad de arena muy fina. Una vez seco el material recolectado en la descarga y el reboso se pesó el material dando los resultados mostrados en la tabla 1.

Determinación del tamaño de corte y gráfica de recuperación de partículas

Con los datos de diseño y la ecuación (1) se determinó $d_{50}=92$ micras que es el tamaño de partícula que tiene la misma posibilidad de ir a la fracción gruesa o a la fracción fina. Con la ecuación 4 se obtuvo la curva de clasificación mostrada en la figura 10.

Resultados y conclusiones

Se observó en la modelación matemática la formación de los torbellinos primario y secundario. Se logró el objetivo principal del

proyecto que era la construcción de un hidrociclón.

Las pruebas de uso con arena resultaron adecuadas, sólo se hicieron con un caudal de mezcla, las partículas de arena de mayor tamaño salieron a través de la boquilla de descarga.

Se comprueba con las gráficas de recuperación de partículas el funcionamiento adecuado del hidrociclón con una posibilidad de separar las partículas de 149 micras del 91%. En el tamaño de 190 micras ya tiene una posibilidad de ser desalojada por la descarga de 99%.

Se recomienda realizar un estudio en el cual se pueda variar el caudal para conocer la capacidad máxima del hidrociclón y el punto donde tiene mayor eficiencia.

Se recomienda hacer un estudio variando el diámetro de descarga.

Se recomienda realizar un estudio específico del tamaño de partículas que se puedan expulsar en el hidrociclón.



A)

B)

FIGURA 9. A) Hidrociclón con soporte, B) Pruebas de funcionamiento.

TABLA 1. A) Hidrociclón con soporte, B) Pruebas de funcionamiento.

Arena total agregada (kg)	5
Arena recolectada en la descarga	4.5
Arena recolectada en el reboso	0.5



FIGURA 9. Funcionamiento de hidrociclón.



FIGURA 10. Curva de recuperación de partículas.

Agradecimientos

Se agradece al grupo del GREENER de la UMSNH por su colaboración en este proyecto, al Programa Estímulos al Desempeño del Personal Docente, por el apoyo recibido y a la Revista Ciencia Nicolita de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo UMSNH.

Referencias

- ADVANCED MINERAL PROCESSING AMP, HIDROCICLONES
[HTTP://WWW.AMPMINERAL.COM/EQUIPOS/HIDROCICLONES.PHP](http://www.ampmineral.com/equipos/hidrociclones.php)
- ARYAL, SINGH, RAKISH, KAPALI, DHAKAL. 2019 DESIGN, FABRICATION AND TESTING OF HYDROCYCLONE SEPARATOR AS SEDIMENT SEPARATION SYSTEM, 2^N INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND BIOLOGY AT, LALITPUR, NEPAL
- BETANCOURT LAURENCIO, SIERRA PÉREZ, TAMAYO CABALLERO, 2020. DETERMINATION OF THE DESIGN TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A HYDROCYCLONE FOR SAND WASHING IN THE MAYARI RIVER. *CINAREM. CUBA*.
- BREFF-AZAHAREZ, FALCÓN-HERNÁNDEZ, GÓNGORA-FONSECA, 2014. EVALUACIÓN DE TRABAJO DE UN HIDROCICLÓN PARA LA CLASIFICACIÓN DE LA PULPA DE CIENOS CARBONATADOS. *TECNOLOGÍA QUÍMICA*.
- BUDYNAS NISBETT, 2008, DISEÑO DE INGENIERÍA MECÁNICA SHIGLEY. MC GRAW HILL OCTAVA EDICIÓN. PP.983
- CEMENTOS CİBAO. 2017, ARENA, SUS TIPOS Y SUS CLASIFICACIONES | *CEMENTOS CİBAO*
- DURAN ASCENCIO, 2013, DISEÑO DE UN CICLÓN DE POLVOS METÁLICOS PARA RAPID PROTOTYPING, *TESIS DE LICENCIATURA, UNIVERSIDAD DE SEVILLA, ESPAÑA. PP 6-11*
- MENDOZA, VERA, 2019. ESTUDIO DE DIFERENTES MODELOS DE TURBULENCIA PARA OBTENER LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UN PERFIL NACA 2415 MEDIANTE LA SIMULACIÓN TRIDIMENSIONAL DE FLUJOS. *REVISTA BISTUA FAC. DE CIENCIAS BÁSICAS*.
- PEDRAZA HERNÁNDEZ. 2018, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HIDROCICLÓN A NIVEL LABORATORIO, *TESIS DE LICENCIATURA, ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA, UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, COLOMBIA*.
- RIETEMA, 1961, PERFORMANCE AND DESIGN OF HYDRO CYCLONES-IV, *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, PP. 320 A 325.
- VESILAND AARNE, 1980, THE ROSIN RAMMLER PARTICLE SIZE DISTRIBUTION, ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY, AMSTERDAM, PP275-277



Diseño y construcción de un generador por lotes a diferencia de presiones para la producción de microburbujas.

Fernando Franco Gutiérrez, Bernardo Figueroa Espinoza, Alicia Aguilar-Corona

Para citar este artículo: Franco Gutiérrez, F., Figueroa Espinoza, B., Aguilar-Corona A. 2022. Diseño y construcción de un generador por lotes a diferencia de presiones para la producción de microburbujas. Ciencia Nicolaita, número 83, 289-299.

DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi83.582>

View

[Ver material suplementario](#)

Online

[Publicado en línea, enero de 2022](#)

Send

[Envíe su artículo a esta revista](#)

Diseño y construcción de un generador por lotes a diferencia de presiones para la producción de microburbujas.

Fernando Franco Gutiérrez^{1*}, Bernardo Figueroa Espinoza¹, Alicia Aguilar-Corona^{1*}

¹Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo,
Facultad de Ingeniería Mecánica, México

²Universidad Autónoma de México, Instituto de Ingeniería Laboratorio de Ingeniería y
Procesos Costeros, México

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recibido: 25 de septiembre de 2021

Aceptado: 22 de noviembre de
2021

RESUMEN

Se diseñan y construyen dos generadores de diferentes dimensiones para producción de burbujas en lotes utilizando saltos de presión. A medida que aumenta la diferencia de presiones, el tamaño de las burbujas disminuye. Se obtienen microburbujas de diámetro de 65 a 116 micras en un rango de diferencia de presión de 3 a 7 bares respectivamente. El diámetro equivalente de las burbujas producidas sólo está controlado por la diferencia de presión aplicada y no así por el tamaño del generador.

PALABRAS CLAVE: microburbujas, diferencia de presión, producción de microburbujas, transferencia de oxígeno.

ABSTRACT

Two prototypes of microbubble batch generators were implemented in the laboratory, using the pressure jump method. As the pressure difference increases, the bubble diameter decreases. Equivalent diameters in the range between 56 to 116 microns were obtained, using pressure differences between 3 and 7 bar, respectively. The equivalent diameter is controlled by the suddenly applied depressurization and is independent of the device dimensions.

KEYWORDS: microbubbles, pressure difference, microbubble production, oxygen transfer.

Marco teórico

Es difícil pensar en alguien que no disfrute ver y jugar con burbujas. Aunque parezca extraño, las burbujas son mucho más que un asunto de juego o distracción para los niños; los fenómenos de transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento que se dan en flujos burbujeantes (o multifásicos, que pueden contener también sólidos en suspensión) son de gran importancia en la ciencia y la industria.

Ejemplos de aplicación de flujos burbujeantes hay muchos: desde flujos geofísicos como flujos volcánicos (lava, magma, flujos piroclásticos), hasta aplicaciones en ciencia e ingeniería, como son el bombeo por inyección de aire (airlift) en la industria petrolera y de energía geotérmica (Ahmed et al., 2016), bloqueo de sólidos flotantes en afluentes y reducción de ruido submarino por medio de “paredes de burbujas” (Gao et al., 2021), tratamiento de aguas con procesos aerobios (Azuma et al. 2019; Terasaka et al. 2011), acuicultura y piscicultura (Onari 2005), separación de partículas y nanopartículas (Terasaka y Shinpo, 2007), generación de emulsiones de agua y combustible/hidrocarburos (Watanabe et al., 2010) y su uso como trazadores para técnicas de visualización fotográficas y velocimetría con medios ópticos (Ishikawa et al., 2009).

Recientemente en la Ciudad de México se han utilizado a las burbujas para oxigenar los canales de Xochimilco y evitar la eutrofización de este cuerpo de agua (Toche 2021). En varias de esas aplicaciones es recomendable usar burbujas pequeñas o microburbujas. Una microburbuja está definida como una burbuja cuyo diámetro está entre 1 y 1000 μm . A esta escala de tamaño la tensión superficial no permite que la burbuja se deforme de su forma esférica casi perfecta. La ventaja del uso de microburbujas con respecto al uso de burbujas estándar (diámetro mayor a 1mm) es debido a las siguientes propiedades

(ver Figura 1):

- Las burbujas más pequeñas poseen mayor área interfacial y volumen comparados con las burbujas estándar lo que permite una mayor transferencia de oxígeno (Figura 1a).
- Entre más pequeña es la burbuja su flotabilidad disminuye por lo que su tiempo de residencia en el fluido es mayor. Esto permite una mayor transferencia de oxígeno (Figura 1b)
- Al ser más pequeñas las burbujas, éstas se adhieren más a las partículas promoviendo el arrastre de éstas. Esto beneficia a la mejor remoción de las partículas en suspensión (Figura 1c).

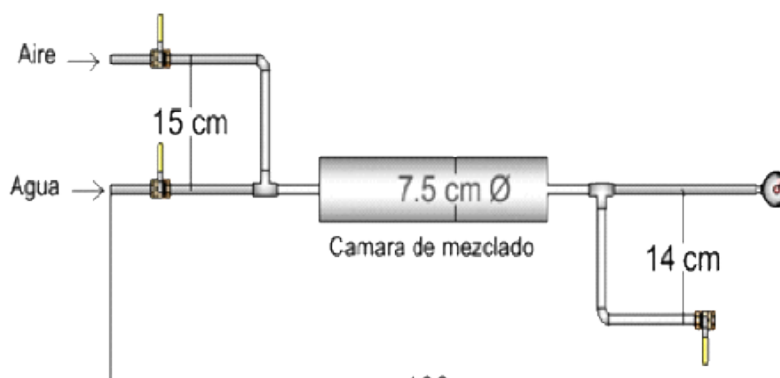


FIGURA 1. Ilustración de los beneficios del uso de microburbujas en relación con burbujas estándar: a) mayor área interfacial y volumen, b) mayor tiempo de residencia y c) remoción de partículas.

Dependiendo de la aplicación, muchas veces es deseable hacer burbujas muy pequeñas. Aunque esto suene fácil de hacer, resulta sorprendente lo difícil que es hacer burbujas de diámetro menor a 1 mm. La razón de esta curiosa situación es que a escalas pequeñas las fuerzas de tensión superficial son importantes y se dan una serie de efectos que hacen difícil hacer burbujas pequeñas: si se hace pasar gas por un orificio muy pequeño, la tensión superficial anclará la burbuja y ésta crecerá hasta que la flotación sea superior a la tensión superficial. De modo que para diámetros de perforación del orden de medio milímetro o menores, la burbuja resultante siempre resulta mucho mayor que el orificio por donde salió.

Adicionalmente, al producir burbujas pasando gas por arreglos de pequeñas perforaciones, las burbujas tienden a coalescer y el resultado será un flujo de burbujas más grandes. Finalmente, cuando se usan arreglos de perforaciones interconectadas, existe un efecto de inestabilidad de percolación paralela (Zimmerman et al., 2008), de modo que una vez formada una burbuja en una perforación, la diferencia de presión en la primera burbuja creada (inversamente proporcional al radio de la burbuja) será menor que en las demás perforaciones y todas las burbujas fluirán por un solo agujero. Existen formas de superar estos obstáculos. Entre los métodos utilizados para la generación de microburbujas encontramos (Terasaka 2011):

1. Método de disolución presurizada

Este método utiliza un flujo de aire comprimido (que tiene una mayor capacidad de disolver oxígeno) y se hace pasar por algún dispositivo o boquilla que provoque la nucleación de burbujas. Estos núcleos crecen una vez que son creadas las burbujas debido a la sobresaturación del líquido bajo las nuevas condiciones de presión al pasar por la bo-

quilla. Es posible también realizar un proceso por lotes (batch), de modo que cierta cantidad de líquido se presurice y una vez alcanzada la concentración de equilibrio se despresurice, inyectando el agua con microburbujas al afluente. Se pueden tener varios dispositivos batch intercalados para tener un funcionamiento casi continuo (Terasaka et al., 2011).

2. Método tipo Jet y Venturi

El segundo método consta de un flujo de dos fases que pasa a través de un tubo Venturi o cambios repentinos en sección, si la variación de presión debido al cambio en la sección transversal es lo suficientemente fuerte, las microburbujas se forman debido a la cavitación y la distorsión de las burbujas pre-existentes.

3. Método de sonificación.

El tercer método consiste en usar poderosos generadores de ultrasonido, que provocan un efecto de cavitación en ciertos puntos de una onda estacionaria ultrasónica (Terasaka et al., 2011).

4. Método de oscilación mecánica

El cuarto método usa un flujo de gas a una presión moderada y requiere de un método secundario para romper el flujo de aire en pequeñas burbujas. Los métodos secundarios pueden ser por ejemplo con agitación, vibración mecánica y esto provoca un rompimiento de la burbuja mientras está en etapa de formación como una copa hemisférica (Terasaka et al., 2011).

5. Método de flujo espiral de líquido

Este tipo de dispositivos consiste en un flujo espiral descendente de agua que se inyecta tangencialmente en la parte superior de un tubo o cilindro vertical. Éste fluye a con-

contra-corriente de un chorro de gas que se inyecta por la parte inferior. El efecto de “centrifugado” genera una suspensión uniforme de microburbujas que sale por una boquilla en el centro de la parte superior (Terasaka et al., 2011).

6. Otros métodos

Pimentel et al. (2012) reportan que es posible generar microburbujas a partir de fibras ópticas recubiertas con nanopartículas usando una luz láser, por medio de un efecto foto-térmico.

Esencialmente de los cuatro métodos descritos anteriormente el primero y segundo requieren grandes cantidades de energía, mientras los métodos tercero, cuarto y quinto requieren bajas energías, sin embargo escalar éstos últimos es una tarea que se revela difícil.

Las microburbujas alrededor del mundo

En medio de la creciente preocupación y las restricciones ambientales, la utilización de microburbujas presenta un gran potencial como una tecnología prometedora para la purificación del agua y tratamiento de aguas residuales (Hirai et al., 2009). Un ejemplo de ello es la degradación de contaminantes orgánicos realizado eficazmente por medio de la inyección de oxígeno al agua.

En Japón, hay muchas aplicaciones de microburbujas para propósitos industriales. Por ejemplo: la acuicultura, el cultivo hidropónico, fermentación aeróbica y tratamiento aeróbico de aguas residuales. También se han reportado mejoras en la reducción de la cantidad de lodos en aguas con un bajo consumo de energía comparado con otros métodos.

(Onari 2005; Hensirisak et al. 2002; Hoage y Messer 2005). Terasaka et al. (2007) propusieron un nuevo sistema de flotación para recuperar partículas de carbono finas suspendidas en agua residual mediante aireación de microburbujas. Terasaka (2008) aplicó la tecnología de flotación de microburbujas para recuperar hierro fino y partículas de óxido de residuos suspendidos en agua. Kobayashi et al. (2011) investigaron el comportamiento de microburbujas en un campo ultrasónico. Watanabe et al. (2010) propone una aplicación para generar microgotas de agua utilizando microburbujas de vapor. Miyazaki et al. (2010) desarrolló una nueva técnica para generar burbujas de orden micrométrico utilizando un microcanal con una unión T con estrangulación. Terasaka et al. (2011) investigó el rendimiento de la absorción de oxígeno en el agua, comparando siete clases de distribuidores de gas. Los generadores de microburbujas mostraron mejores tasas de transferencia de oxígeno que los típicos distribuidores de gas.

En otras partes del mundo como en España, Gordillo et al. (2004) presentó un nuevo método para la producción de suspensiones de burbujas compuesta de burbujas de tamaño micrométrico, empleando un nuevo tipo de dispositivo de microfluidos y empleando microcanales convencionales, en forma de T. El mismo año Gañán-Calvo (2004) presenta un método para producir microburbujas monodispersas corregido. Herrada y Gañán-Calvo (2009) utilizó un método numérico de volumen de fluido para predecir la dinámica de la formación de microburbujas en un dispositivo de microfluidos de enfoque de flujo (flow focusing) simétrico al eje para un sistema de gas-líquido.

En Canadá, Najafi y Masliyah (2008) propuso un nuevo método para la generación de burbujas de gas de una micropipeta. Este mé-

todo de pulsos de paso de presión de gas se utiliza para inyectar micro-volúmenes de gas en un líquido.

En Singapur, Xu et al. (2008) evaluó la eficiencia de generación de microburbujas de dos métodos de uso general, la agitación mecánica y sonificación, los resultados indicaron que el tratamiento con ultrasonidos genera microburbujas de una manera más eficaz que la agitación mecánica. Demostró también que el efecto del tamaño de las microburbujas puede ser afectado en gran medida por el método de generación; por lo tanto, el uso de un método de generación adecuado es especialmente importante para la aplicación de microburbujas.

En Irán, Nouri et al. (2009) mejora el rendimiento de un generador de microburbujas a través de la dependencia de las características de la dinámica de fluidos numéricamente y luego se ejecutan algunos experimentos.

En México, la investigación de las microburbujas es escasa pero no inexistente. Roldán (2005) propuso una aplicación de las microburbujas en el área de la medicina durante un ecocardiograma para incrementar la señal acústica proveniente del torrente sanguíneo. Gutiérrez-Torres (2008) implementó la inyección de microburbujas en la capa límite turbulenta en el flujo dentro de un canal cerrado utilizando la técnica de Velocimetría por Imágenes de Partículas (PIV) para ver las modificaciones en la vorticidad y tasa de deformación, así entender el fenómeno físico de la reducción del arrastre por inyección de microburbujas. Martínez et al. (2012) investigó la flotación con microburbujas como una técnica en la industria de la concentración de minerales.

Aunque varias técnicas están disponibles para la generación de microburbujas,

se ha reportado que las propiedades de las microburbujas pueden ser afectadas por el método empleado para su generación (Onari 2007, Himuro 2007).

La investigación de microburbujas se ha convertido recientemente en un área activa de interés científico y tecnológico. Existen patentes de generadores de microburbujas, sin embargo, los conocimientos básicos de la actuación de los diferentes métodos de generación de microburbujas son insuficientes. Así mismo, las propiedades hidrodinámicas de las microburbujas no se conocen bien y los mecanismos de formación, reacción y destrucción no se han aclarado por completo.

La aportación de este trabajo es la construcción de un generador de microburbujas por lotes. En el generador por lotes, la producción de microburbujas no es constante ya que necesita un tiempo de recarga, así como de preparación para repetir el ciclo de producción. Tiene la ventaja de ser un método simple, con pocas partes móviles y se escala fácilmente debido a que el líquido puede estar en reposo durante la formación de las burbujas. En este trabajo se explora el efecto de control del tamaño de burbuja por medio de saltos de presión.

Metodología

Se diseñan y construyen dos generadores por lotes usando el método de salto de presión (ver Figura 2). El primer generador se construye en PVC y consta de una cámara de mezclado con un diámetro de 75 mm que está conectada a un tubo de 12 mm de diámetro y éste a su vez está acoplado a dos tubos del mismo diámetro mediante los que se suministra un flujo de aire y agua a una presión determinada. El flujo de estos fluidos es controlado mediante válvulas de globo. Del otro ex-

remo de la cámara, se tiene conectado un manómetro y un tubo de 12 mm de diámetro con una válvula para controlar el flujo de salida de las microburbujas y la generación por lotes.

transparente de polimetilmetacrilato. En la Figura 3 se muestra el dispositivo. La cámara es llenada con agua usando las válvulas de entrada y salida del lado izquierdo cerrándolas al terminar el proceso.

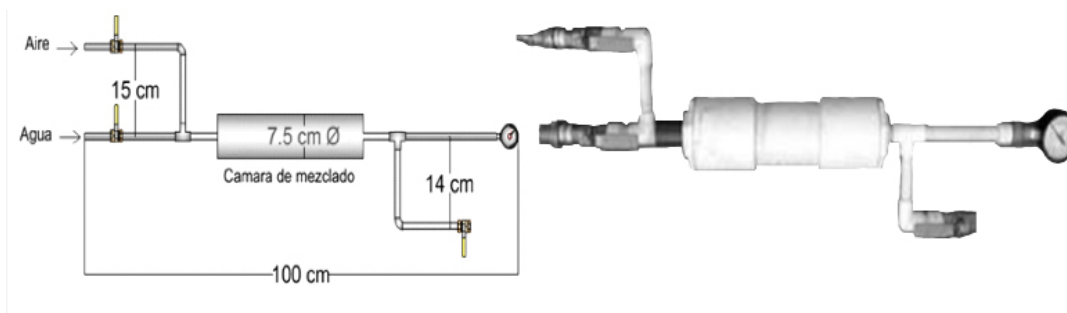


FIGURA 2. Diagrama y prototipo del generador de burbujas por salto de presión y lotes.

El generador se opera llenándolo completamente con un volumen de 500 ml de agua, posteriormente se introduce el aire hasta obtener el valor de la presión deseada. El rango de presiones analizado es de 0 a 7 bares, el cual se encuentra en el rango de seguridad para trabajar tubos de PVC. Sin embargo, por debajo de 3 bares no hubo producción de microburbujas. Así, el efecto de la presión es determinado para 3, 4, 5, 6, y 7 bares.

Con el fin de poder observar el mecanismo de formación de microburbujas la cámara de PVC fue remplazada por un tubo de sección transparente de polimetilmetacrilato. En la Figura 3 se muestra el dispositivo. La cámara es llenada con agua usando las válvulas de entrada y salida del lado izquierdo cerrándolas al terminar el proceso. El aire entra por la válvula del lado derecho hasta llegar a la presión deseada. La lectura del manómetro permite controlar la presión del experimento.

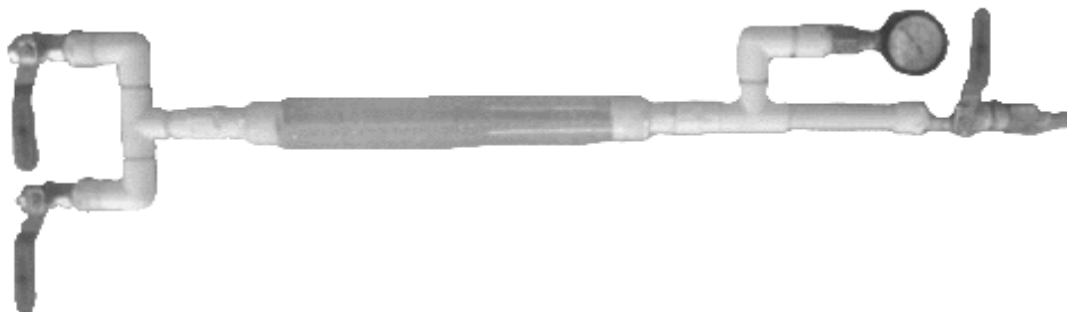


FIGURA 3. Segundo dispositivo generador de microburbujas por lotes.

Una vez estabilizada la presión al valor deseado (Figura 4), se libera abruptamente el fluido a presión atmosférica. En ese momento se observa la formación de una nube de microburbujas. Posteriormente se vierte en un contenedor el fluido con las microburbujas. Un microscopio estereoscópico y un objetivo micrométrico de 1mm con divisiones 0.01 se utilizaron para realizar las capturas de imagen

La determinación del diámetro de las burbujas fue realizada mediante un software de tratamiento de imágenes. Se observa que el tamaño de la cámara de mezcla no afecta al mecanismo de formación si se mantienen las mismas presiones, lo que facilita el proceso de escalamiento, pues se obtienen resultados idénticos con ambos prototipos.

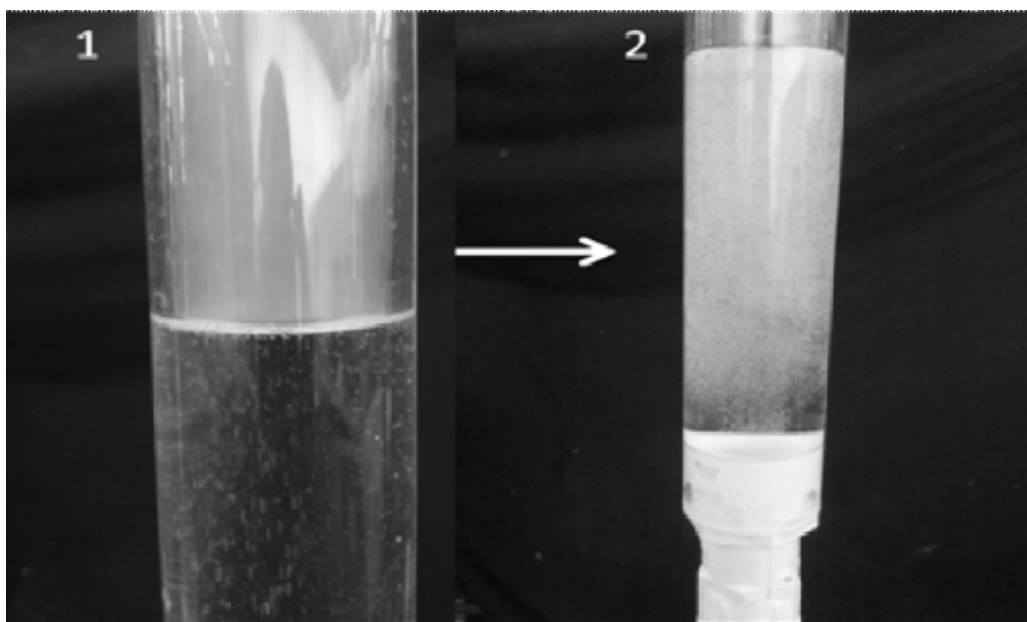


FIGURA 4. Sección transparente de polimetilmetacrilato con microburbujas.

Resultados y discusión

La Figura 5 muestra el diámetro equivalente medio obtenido con respecto a la diferencia de presión utilizada en los experimentos. Se registra una disminución del diámetro de las burbujas obtenidas a medida que la presión aumenta.

Para una presión de 3 bares se tiene un diámetro promedio de 116 micrómetros llegando a un diámetro de 65 micrómetros a 7 bares reduciendo su tamaño al 44%.

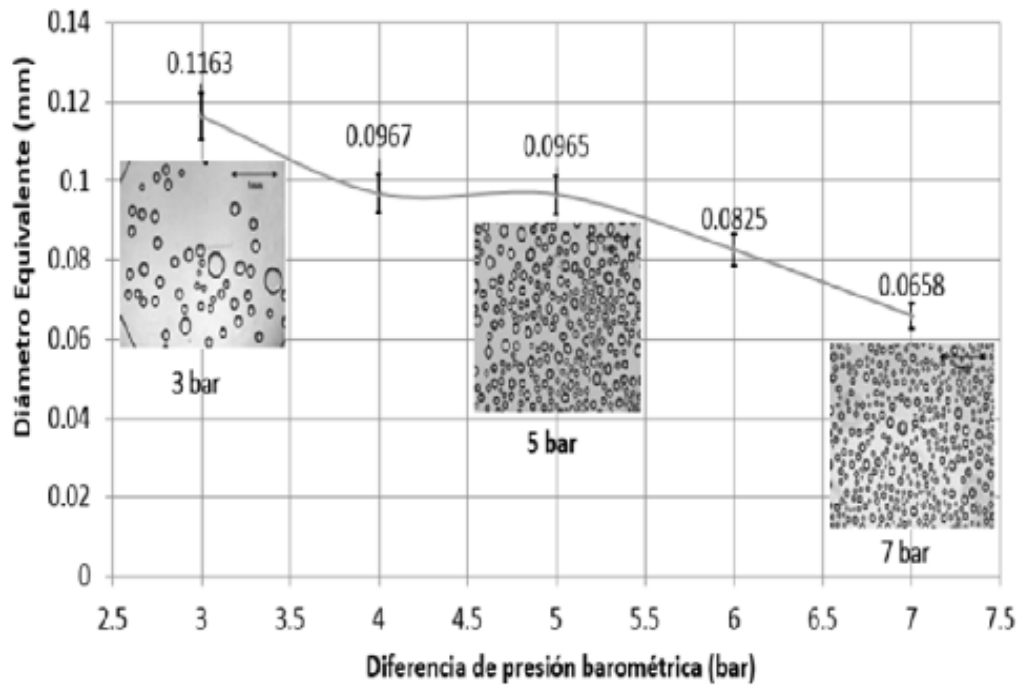


FIGURA 5. Gráfica del diámetro equivalente con respecto a la diferencia de presión. El tamaño de las barras de error representa la desviación estándar.

El fenómeno de crecimiento de la burbuja es complejo, ya que depende de la presencia de pequeñas imperfecciones en las superficies (y de diminutas partículas) conocidas como “sitios de nucleación”. A alta presión el fluido puede disolver gran cantidad de gas, de modo que si se hace bien el experimento, a alta presión se tendrá la concentración de saturación de gas c_s . Al cambiar bruscamente a una menor presión, el líquido queda sobre-saturado a menor presión, de modo que se producirá un número n finito de burbujas en los sitios de nucleación. El radio de estas burbujas iniciales R_0 está dado por el equilibrio entre presión, tensión superficial, es decir:

$$R_0 = \frac{\sigma}{\Delta p}$$

Donde Δp es la diferencia de presiones. Es por esto que una mayor diferencia de presiones resulta en diámetros de burbuja menores. Sin embargo el radio final de la burbuja será diferente de R_0 (que para el agua y aire es muy pequeño, del orden de micras). Éstas burbujas crecerán debido al transporte de gas por difusión desde la solución sobre-saturada (que se quiere “deshacer” de este exceso de gas disuelto) al interior de las burbujas. Las ecuaciones (diferenciales parciales) de concentración-difusión que describen este proceso fueron planteadas y resueltas por Epstein y Plesset (1950), tomando en cuenta varios casos entre los que se incluye el efecto de la tensión superficial. Se muestra que el crecimiento es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. Si la solución sobre-saturada no cambiase su concentración, la burbuja continuaría creciendo indefinidamente

sta alcanzar la superficie por flotabilidad). En la realidad la solución pierde una cantidad de gas equivalente a

$$\Delta m = \rho V \Delta c$$

donde m es la cantidad de masa transferida, ρ es la densidad del gas, V es el volumen total de líquido y Δc es la diferencia de concentraciones a las presiones alta y baja. Este transporte se detendrá cuando la concentración llegue a la saturación correspondiente a la presión baja. Si se calcula la cantidad de gas transferido a las burbujas en términos de la variación de volumen de las n burbujas que lo contienen (suponiendo que son del mismo tamaño):

$$n \frac{4\pi}{3} (R^3 - R_0^3) = V \Delta c$$

entonces se puede calcular el radio final de las burbujas, si se conoce el número de burbujas por unidad de volumen n/V (que en este caso no se pudo medir¹):

$$R = \left[\frac{3}{4\pi n} V \Delta c + R_0^3 \right]^{1/3}$$

Nótese que el segundo término del lado derecho es despreciable, por ser radio inicial tan pequeño. Esta última ecuación podría servir para estimar la densidad volumétrica de burbujas en términos de los radios efecti

vos de burbuja medidos (que para este caso es del orden de 105 burbujas/m³). Queda claro de estas simples expresiones que una diferencia de presiones mayor implica una densidad de burbujas mayor, así como un radio de burbujas menor. Ambos fenómenos se observaron en el experimento.

Conclusiones

Este trabajo presenta una revisión sobre las aplicaciones y los métodos existentes para la producción de micro burbujas. En particular se utiliza el método de saltos de presión, para determinar la relación entre la presión y el diámetro equivalente resultante de las burbujas. Las conclusiones de esta serie de experimentos se enlistan a continuación:

- Se diseñan y construyen dos generadores de microburbujas basados en diferencias de presión.
- Se obtienen burbujas con diámetros en el rango de 65 a 116 micras.
- Se determinan que la diferencia de presión a la cual inicia la formación de microburbujas es de 3 bares.
- Se encontró que a medida que aumenta la diferencia de presiones, las burbujas obtenidas son de menor diámetro.

• El tamaño del cuerpo del generador no influye en el diámetro de las burbujas formadas, mientras se utilicen las mismas presiones.

Esto es una ventaja, que permite escalar fácilmente este tipo de dispositivos.

• Se presenta un estimado del radio final de burbuja en función de la densidad de burbujas y los parámetros medidos que concuerda cualitativamente con las observaciones.

• Queda claro de estas simples expresiones que una diferencia de presiones mayor implica una densidad de burbujas mayor, así como un radio de burbujas menor. Ambos fenómenos se observaron en el experimento

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento de la Coordinación de la Investigación Científica - UMSNH y del programa UNAM-DGAPA-PAPIIT IN103321.

Bibliografía

AHMED, W. H., AMAN, A. M., BADR, H. M., & AL-QUTUB, A. M. (2016). AIR INJECTION METHODS: THE KEY TO A BETTER PERFORMANCE OF AIRLIFT PUMPS. *EXPERIMENTAL THERMAL AND FLUID SCIENCE*, 70, 354-365. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/ABS/PII/S0894177715002678](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177715002678)

AZUMA, T., OTOMO, K., KUNITOU, M., SHIMIZU, M., HOSOMARU, K., MIKATA, S., & HAYASHI, T. (2019). REMOVAL OF PHARMACEUTICALS IN WATER BY INTRODUCTION OF OZONATED MICROBUBBLES. *SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY*, 212, 483-489. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/ABS/PII/S1383586618324195](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1383586618324195)

EPSTEIN, P. S., & PLESSET, M. S. (1950). ON THE STABILITY OF GAS BUBBLES IN LIQUID-GAS SOLUTIONS. *THE JOURNAL OF CHEMICAL PHYSICS*, 18(11), 1505-1509.

GAÑÁN-CALVO, A. M. (2004). PERFECTLY MONODISPERSE MICROBUBBLING BY CAPILLARY FLOW FOCUSING: AN ALTERNATE PHYSICAL DESCRIPTION AND UNIVERSAL SCALING. *PHYSICAL REVIEW E*, 69(2), 027301.

GAO, Y., MA, J., & DING, Y. (2021). NUMERICAL SIMULATION ON THE NOISE REDUCTION OF UNDERWATER PILE-DRIVING USING A BUBBLE CURTAIN. IN *JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES* (VOL. 1865, No. 3, P. 032027). IOP PUBLISHING. [HTTPS://JOURNALS.APS.ORG/PRE/ABSTRACT/10.1103/PhysRevE.69.027301](https://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.69.027301)

GORDILLO, J. M., CHENG, Z., GANAN-CALVO, A. M., MARQUEZ, M., & WEITZ, D. A. (2004). A NEW DEVICE FOR THE GENERATION OF MICROBUBBLES. *PHYSICS OF FLUIDS*, 16(8), 2828-2834. [HTTPS://AIP.SCITATION.ORG/DOI/ABS/10.1063/1.1737739](https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.1737739)

GUTIÉRREZ TORRES, C. D. C., HASSAN, Y. A., JIMÉNEZ BERNAL, J. A., & BARBOSA SALDANA, J. G. (2008). DRAG REDUCTION BY MICROBUBBLE INJECTION IN A CHANNEL FLOW. *REVISTA MEXICANA DE FÍSICA*, 54(1), 8-14. [HTTP://WWW.SCIELO.ORG/MX/SCIELO.PHP?PID=S0035-001X2008000100003&SCRIPT=SCI_ABSTRACT&TLNG=PT](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0035-001X2008000100003&script=sci_abstract&tlng=pt)

HENSIRISAK, P., PARASUKULSATID, P., AGBLEVOR, F. A., CUNDIFF, J. S., & VELANDER, W. H. (2002). SCALE-UP OF MICROBUBBLE DISPERSION GENERATOR FOR AEROBIC FERMENTATION. *APPLIED BIOCHEMISTRY AND BIOTECHNOLOGY*, 101(3), 211-227. [HTTPS://LINK.SPRINGER.COM/ARTICLE/10.1385/ABAB:101:3:211](https://link.springer.com/article/10.1385/ABAB:101:3:211)

HERRADA, M. A., & GAÑÁN-CALVO, A. M. (2009). SWIRL FLOW FOCUSING: A NOVEL PROCEDURE FOR THE MASSIVE PRODUCTION OF MONODISPERSE MICROBUBBLES. *PHYSICS OF FLUIDS*, 21(4), 042003. [HTTPS://AIP.SCITATION.ORG/DOI/ABS/10.1063/1.3123533](https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.3123533)

HIMURO, S. (2007). A NEW WASHING METHOD USING MICROBUBBLES. *PROGRESS IN MULTIPHASE FLOW RESEARCH*, 2, 39-45. [HTTPS://CI.NII.AC.JP/NAID/10021105087/](https://ci.nii.ac.jp/naid/10021105087/)

- HIRAI, S., KOMURA, M., SAECHOUT, V., SUGAYA, S., AOKI, S., & TAKAHASHI, T. (2009). DEVELOPMENT OF HIGH DENSITY MICRO-BUBBLE GENERATOR FOR ENVIRONMENTAL TECHNOLOGY. *EL EKTRONIKA IR ELEKTROTECHNIKA*, 92(4), 37-40.
[HTTPS://WWW.EEJOURNAL.KTU.LT/INDEX.PHP/ELT/ARTICLE/VIEW/10222](https://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/view/10222)
- HOAGE, J. B., & MESSER, L. A. (2005). U.S. PATENT NO. 6,884,353. WASHINGTON, DC: U.S. PATENT AND TRADEMARK OFFICE.
- ISHIKAWA, M., IRABU, K., TERUYA, I., & NITTA, M. (2009). PIV MEASUREMENT OF A CONTRACTION FLOW USING MICRO-BUBBLE TRACER. IN *JOURNAL OF PHYSICS: CONFERENCE SERIES* (VOL. 147, NO. 1, P. 012010). IOP PUBLISHING. [HTTPS://IOPSCIENCE.IOP.ORG/ARTICLE/10.1088/1742-6596/147/1/012010/META](https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/147/1/012010/meta)
- KOBAYASHI, D., HAYASHIDA, Y., SANO, K., & TERASAKA, K. (2011). AGGLOMERATION AND RAPID ASCENT OF MICROBUBBLES BY ULTRASONIC IRRADIATION. *ULTRASONICS SONOCHEMISTRY*, 18(5), 1193-1196. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S1350417710002208](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417710002208)
- MARTÍNEZ-GÓMEZ, V., PÉREZ-GARIBAY, R., RUBIO-ROJAS, J. (2012), FLOTACIÓN DE PARTÍCULAS FINAS UTILIZANDO MICROBURBUJAS. XXI CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA EXTRACTIVA, MÉXICO, D.F.
- MIYAZAKI, R., OGASAWARA, T., TAKEUCHI, S., TAKAGI, S., & MATSUMOTO, Y. (2010). SCALING AND DYNAMICS OF MICROBUBBLE GENERATION IN MICROFLUIDIC T-JUNCTION. IN 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW-ICMF 2010.
- SCALING AND DYNAMICS OF MICROBUBBLE GENERATION IN MICROFLUIDIC T-JUNCTION. IN 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW-ICMF 2010.
- NAJAFI, A. S., XU, Z., & MASLIYAH, J. (2008). SINGLE MICRO-BUBBLE GENERATION BY PRESSURE PULSE TECHNIQUE. *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, 63(7), 1779-1787. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0009250907009025](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250907009025)
- NOURI, N. M., SARRESHTHDARI, A., & MAGHSOUDI, E. (2009). Improvement of a Microbubble Generator's Performance Via Reliance on Fluid Dynamics Characteristics. *JOURNA*
- ONARI, H. (2005). MICROBUBBLES AND ITS APPLICATION TO THE FISHERIES TECHNOLOGY. *CONCEPTS IN BASIC BUBBLE AND FOAM ENGINEERING*, 475-484.L
- PIMENTEL-DOMÍNGUEZ, R., HERNÁNDEZ-CORDERO, J., & ZENIT, R. (2012). MICROBUBBLE GENERATION USING FIBER OPTIC TIPS COATED WITH NANOPARTICLES. *OPTICS EXPRESS*, 20(8), 8732-8740. [HTTPS://WWW.OSAPUBLISHING.ORG/OE/FULLTEXT.CFM?URI=OE-20-8-8732&ID=231659](https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-20-8-8732&id=231659)
- ROLDÁN, F. J. (2005). INTERACCIÓN ENTRE MICROBURBUJAS Y ULTRASONIDO. *APLICACIONES PRESENTES Y FUTURAS DE LOS EECORREALZADORES*. *ARCHIVOS DE CARDIOLOGÍA DE MÉXICO*, 75(2), 222-226. [HTTP://WWW.SCIELO.ORG.MX/SCIELO.PHP?SCRIPT=SCI_ARTTEXT&PID=S1405-99402005000200015](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-99402005000200015)
- TERASAKA, K., & SHINPO, Y. (2007). RECOVERY OF FINE CARBON PARTICLES FROM WATER USING MICROBUBBLE FLOTATION. IN *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW*.
- TERASAKA, K. (2008). REMOVAL OF IRON OXIDE FINE PARTICLES FROM WASTE WATER USING MICROBUBBLE FLOTATION. *PROG. MULTIPHASE FLOW RES.*, 3, 43-50. [HTTPS://CI.NII.AC.JP/NAID/80019580709/](https://ci.nii.ac.jp/naid/80019580709/)
- TERASAKA, K., HIRABAYASHI, A., NISHINO, T., FUJIOKA, S., & KOBAYASHI, D. (2011). DEVELOPMENT OF MICROBUBBLE AERATOR FOR WASTE WATER TREATMENT USING AEROBIC ACTIVATED SLUDGE. *CHEMICAL ENGINEERING SCIENCE*, 66(14), 3172-3179. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/PII/S0009250911001382](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0009250911001382)
- TOCHE N., 04 DE AGOSTO 2021, OXIGENAR LOS CANALES DE XOCHIMILCO CON AYUDA DE LA PROPIA COMUNIDAD, *EL ECONOMISTA*. [HTTPS://WWW.ELECONOMISTA.COM.MX/ARTESEIDEAS/OXIGENAR-LOS-CANALES-DE-XOCHIMILCO-CON-AYUDA-DE-LA-PROPIA-COMUNIDAD-20210804-0013](https://www.eleconomista.com.mx/arteseideas/OXIGENAR-LOS-CANALES-DE-XOCHIMILCO-CON-AYUDA-DE-LA-PROPIA-COMUNIDAD-20210804-0013). HTML
- WATANABE, C., TODA, Y., SAITO, J., TERASAKA, K., & KOBAYASHI, D. (2010). GENERATION OF MICROWATER DROPLETS IN OIL USING CONDENSATION OF STEAM BUBBLES. IN *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON MULTIPHASE FLOW P* (VOL. 2, P. 71).
- XU, Q., NAKAJIMA, M., ICHIKAWA, S., NAKAMURA, N., & SHIINA, T. (2008). A COMPARATIVE STUDY OF MICROBUBBLE GENERATION BY MECHANICAL AGITATION AND SONICATION. *INNOVATIVE FOOD SCIENCE & EMERGING TECHNOLOGIES*, 9(4), 489-494. [HTTPS://WWW.SCIENCEDIRECT.COM/SCIENCE/ARTICLE/ABS/PII/S1466856408000325](https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1466856408000325)
- ZIMMERMAN, W. B., TESAR, V., BUTLER, S., & BANDULASENA, H. C. (2008). MICROBUBBLE GENERATION. *RECENT PATENTS ON ENGINEERING*, 2(1), 1-8. [HTTPS://WWW.INGENTACONNECT.COM/CONTENT/BEN/ENG/2008/00000002/00000001/ART00001#RES](https://www.ingentaconnect.com/content/ben/eng/2008/00000002/00000001/ART00001#RES)

Ciencia Nicolaita 83, año 30, diciembre 2021-enero 2022, es una publicación cuatrimestral editada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, con domicilio en Edificio C-2, Ciudad Universitaria, C. P. 58030, Morelia, Michoacán. Tel. +52 (443) 3272366, (443) 316 7436 (443) 322 35 00 EXT. 4112. Correo electrónico: ciencianicolaita.publicaciones@umich.mx. Página web: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn>. Editor responsable: Pedro Corona Chávez. ISSN: 2007 7068 gestionado ante el Instituto Nacional de Derechos de Autor, Registro Latindex No. 21693. Responsable de la última actualización de este número: Hugo Cesar Guzmán Rivera, fecha de última modificación: 9 de febrero de 2022.

Ciencia Nicolaita 83 fue formada y preparada para su versión electrónica, Arte y Diseño editorial por Lic, Artes Visuales: Cesar Eduardo Gallardo Arciga Morelia, Mich. México. Tel. 443-7261108. Correo electrónico: cesarnucleoarte@gmail.com

DERECHO DE USO

Se permite la reproducción, publicación, transmisión, difusión en cualquier modo o medio de cualquier parte del material contenido en el archivo (únicamente texto sin imágenes) sin alterar o modificar el original, con fines de referencia y/o reproducción, académicos o educacionales, con excepción de los personales o comerciales, citando la fuente de referencia y otorgando el crédito correspondiente al autor y al editor.

Sitio implementado por el equipo de la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo sobre la plataforma OJS3/PKP