

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

Abril - Junio 2025

ISSN:2683-2607

No. 142

**Ejercicio físico y envejecimiento
activo: una propuesta integral para
adultos mayores desde la UAM-I**

**Genotipos de coral resistentes:
el santo grial de la
restauración coralina**

**Listando las aves en un conjunto
urbano mediante ciencia ciudadana.**

El nombre de mi hermano.



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA

Revista de las divisiones de CBI y CBS



Contenido

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería

No. 142 Abril - Junio 2025

| | | |
|---|----|--|
| Editorial | 3 | Dr. Hernán Celaya Michel Dra. Susana Marlene Barrales Heredia Dra. Ana Laura Bautista Olivas Biól. Maryela Celaya Rosas |
| <i>Ejercicio físico y envejecimiento activo: una propuesta integral para adultos mayores desde la UAM-I</i> | 5 | <i>Detrás de los camarones de tu coctel</i> 49 Biól. Jocelyn Saharaim Corzas Cruz |
| M. en I Alfonso Martínez Ortiz Mtro. Ernesto Palacios González L.N.H. Itzel Hernández Ramírez L.N.H. Alejandra Bermeo Arellano Mtra. Nora Patricia Rosales Silva C.D. Araceli Hernández Alpízar Mtra. Betsabé Jiménez Ceballos Med. Margarita Rodríguez González Dr. Fernando Ortíz Lachica LED. Yatziri Gabriela Fernández Morales LED. Devin Israel Morales Mendoza Dr. Ramón González Camarena Dra. Laura Mercedes Santiago Fuentes Lic. Lidya Ponce Espina Lic. Carolina Brito Vargas Mtro. Roberto Salazar Guerrero | | <i>Selección de aceros para el rediseño mediante mecánica computacional de un herramental para doblar tubos</i> 66 Dr. Javier Flores Méndez Dr. Gustavo M. Minquiz Xolo Dr. M. Claudia Denicia Carral Dr. Ana Luisa Ballinas Hernández Dr. Héctor Medina Cruz Dr. Manuel Aparicio Razo |
| <i>Genotipos de coral resistentes: el santo grial de la restauración coralina</i> | 17 | <i>Potencial de las levaduras autóctonas del café como cultivos iniciadores para el proceso de fermentación de masa madre</i> 82 M.C. Sara Paola Romero Isaza Dra. Mirna L. Suárez Quiroz Dr. Oscar González Ríos Dr. Zorba Josué Hernández Estrada Dra. Claudia Yuritzi Figueroa Hernández |
| Dr. Sergio D. Guendulian García Dr. Luis P. Suescún Bolívar Mtra. Rita Sellares Blasco Dr. Aldo Croquer | | <i>¿La intuición a veces puede traicionarte?</i> 95 Dr. Francisco J. Valdés Parada M.C. Jessica Sánchez Vargas |
| <i>Listando las aves en un conjunto urbano mediante ciencia ciudadana</i> | 27 | <i>Residuos sólidos municipales en exvertederos clandestinos de la Sierra de Guadalupe: en búsqueda de microorganismos degradadores de plástico</i> 106 Biól. Ana Paula Romero Calderón Biól. Fernando Basilio González Dra. Aída V. Rodríguez Tovar M. E. A. Alejandra García Mares Dr. José Roberto Ángeles Vázquez Dra. Patricia Castilla Hernández M. E. A. Luis Gerardo Hernández Fernández Dr. Facundo Rivera Becerril |
| <i>El nombre de mi hermano</i> | 35 | |
| Dr. Carlos Escobar | | |
| <i>¿Cómo puede la ganadería contribuir a reducir la problemática ambiental del planeta?</i> | 41 | |

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería
en la WEB

Lea los artículos publicados en
<https://contactos.izt.uam.mx>

Rector General

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia

Secretaria General

Dra. Norma Rondero López

UNIDAD IZTAPALAPA

Rectora

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Secretario

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Director de la División de Ciencias

Básicas e Ingeniería

Dr. Román Linares Romero

Director de la División de Ciencias

Biológicas y de la Salud

Dr. José Luis Gómez Olivares

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería:

Consejo Editorial:

Dra. Verónica Medina Bañuelos

Dr. Javier Rodríguez Lagunas

Dr. Román Linares Romero

Dr. José Luis Gómez Olivares

UAM- Iztapalapa

Editora en Jefe:

M. C. Alma Edith Martínez Licona

Asistente Editorial:

Lic. Paula López Andrés

Comité Editorial por CBS:

Dra. Edith Arenas Ríos, Dra. Laura

Josefina Pérez Flores, Dr. Pedro Luis

Valverde Padilla

Por CBI:

Dr. Hugo Ávila Paredes

Por la Universidad Iberoamericana:

Mtro. Adolfo G. Fink Pastrana

CONTACTOS, REVISTA DE EDUCACIÓN EN CIENCIAS E INGENIERÍA.

3^a Época, No. 142, Abril-Junio 2025, es una publicación trimestral de la Universidad Autónoma Metropolitana a través de la Unidad Iztapalapa, División de Ciencias Básicas e Ingeniería y División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Av. Prolongación Canal de Miramontes 3855, Col. Rancho los Colorines, Alcaldía Tlalpan, C.P. 14386, México, Ciudad de México y Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Col. Leyes de Reforma 1a Sección, Iztapalapa, Cd. de México. C.P. 09310, Edificio T144, Tel. 5804 – 4600. Ext. 1144. Página electrónica de la revista: <https://contactos.izt.uam.mx/> y dirección electrónica: cts@xanum.uam.mx Editora responsable MC Alma E. Martínez Licona. Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo de Título No. 04-2023-061914482700-102, ISSN 2683-2607, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Mtra. Alma E. Martínez Licona; Unidad Iztapalapa, División de CBI y CBS; fecha de última modificación 30 de Junio de 2025. Tamaño del archivo 70.1 MB.

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

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la Universidad Autónoma Metropolitana.

Fecha de Publicación:

Abril - Junio 2025.

Los artículos publicados en **Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería** son sometidos a arbitraje; para ello se requiere enviar

el trabajo en Word a <https://contactos.izt.uam.mx/>

Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería,

UAM – Iztapalapa, T144, Tel. 5804-4600. Ext. 1144

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186. C.P. 09310

e-mail cts@xanum.uam.mx

Editorial

Quisiera comenzar esta editorial agradeciendo el desempeño eficiente y responsable de nuestra asistente editorial, la Lic. Paula López Andrés, quien deja de colaborar con nosotros a partir del 1 de julio, tomando un nuevo cargo dentro de nuestra querida UAM Iztapalapa. El equipo de la Revista Contactos le desea mucho éxito en esta nueva etapa de su carrera. Al mismo tiempo, le damos la bienvenida a la Ing. Gabriela López Rodríguez, quien toma el puesto de asistente editorial dentro de nuestra revista, es un gusto contar con su presencia y valioso trabajo, estamos seguros de que será muy enriquecedor para todos. ¡Bienvenida!

Sobre este número, nos complace presentar artículos variados como lo son:

Ejercicio físico y envejecimiento activo: una propuesta integral para adultos mayores desde la UAM-I. Este artículo presenta los resultados del programa “55 y +” implementado en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I), cuyo objetivo es fomentar un envejecimiento activo mediante un enfoque multidisciplinario basado en el ejercicio físico.

Por otro lado, está el artículo, *Listando las aves en un conjunto urbano mediante ciencia ciudadana.* En este se presenta el siguiente estudio: invitaron al público en general a cursos de identificación de aves, con el propósito de generar un listado de la avifauna de un conjunto urbano en el Estado de México, y al mismo tiempo, evaluar el impacto de esta actividad en el bienestar emocional de los participantes. Como resultado, se identificaron 24 especies, pertenecientes a cuatro órdenes taxonómicos. Además, los participantes en los cursos reportaron mejoras en su estado de ánimo al participar en los mismos.

En el artículo, *Detrás de los camarones de tu coctel,* nos comentan todo lo relacionado a las variedades de camarón y sobre la pesca de este.

Residuos sólidos municipales en exvertederos clandestinos de la Sierra de Guadalupe: en búsqueda de microorganismos degradadores de plástico es un artículo que nos explica la investigación enfocada en los microorganismos vinculados con la degradación de plástico en tres antiguos vertederos (“basureros”), con el objetivo de determinar la diversidad, así como el comportamiento fúngico y bacteriano frente al plástico. La finalidad es de constituir una colección de aislados microbianos con el potencial de ser utilizados en procesos biotecnológicos de gestión de plásticos.

Como siempre, invitamos a nuestros amables lectores a descubrir el contenido de este número, el cual cuenta con más artículos interesantes como los ya mencionados.

Esperando sean de su agrado

Atentamente
MC Alma E. Martínez Licona
Editora en Jefe, Revista Contactos

Información para autores

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería, Revista dirigida a profesores y a estudiantes de estas disciplinas. Está registrada en el índice de revistas de divulgación de Conacyt, así como en Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal. Para publicar, los trabajos deberán ser originales y accesibles a un público amplio con formación media superior o universitaria pero no especializada; los temas deberán presentarse en forma clara. Cada colaboración debe incluir figuras, diagramas, ilustraciones, fotografías, etc. (otorgando el crédito correspondiente en caso de no ser original), que hagan más accesible la presentación.

Las secciones que la constituyen son:

Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

1. Divulgación. Artículos que presentan temas científicos con enfoques novedosos y accesibles (15 cuartillas).

2. Educación científica. Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

3. Artículos especializados. Reportes breves de investigación, relacionados con una problemática concreta (15 cuartillas).

4. Crónicas. Enfoques originales en la enseñanza de temas particulares (15 cuartillas).

5. Divertimentos. Juegos y acertijos intelectuales (5 cuartillas).

6. Noticias breves. Información de actualidad en el mundo de la ciencia (4 cuartillas).

7. Los laureles de olivo. Los absurdos de la vida cotidiana y académica (4 cuartillas). En todos los casos se debe incluir los nombres completos de los autores con su adscripción, dirección, teléfono y dirección de correo electrónico.

Normas

Las colaboraciones a las secciones 1 a 4 deberán ajustarse a las siguientes normas:

1. Resumen escrito en español e inglés.
2. 4 palabras clave en español e inglés.
3. Cuando se incluya una abreviatura debe explicarse por una sola vez en la forma siguiente: Organización de los Estados Americanos (OEA). . .
4. Cuando se utilice un nombre técnico o una palabra característica de una disciplina

científica deberá aclararse su significado de la manera más sencilla posible.

5. Las citas textuales deberán ir de acuerdo al siguiente ejemplo: En cuanto a la publicación del placebo se asevera que “el efecto placebo desapareció cuando los comportamientos se estudiaron en esta forma“ (Núñez, 1982, p.126).

6. Las referencias (no más de 10) se marcarán de acuerdo al siguiente ejemplo: Sin embargo, ese no es el punto de vista de la Escuela de Copenhague (Heisenberg, 1958), que insiste en...

7. Al final del artículo se citarán las referencias por orden alfabético de autores. Pueden añadirse lecturas recomendadas (no más de 5).

8. Cada referencia a un artículo debe ajustarse al siguiente formato: Szabadváry, F. y Oesper, E., Development of the pH concept, J. Chem. Educ., 41 [2], pp.105 -107, 1964.

9. Cada referencia a un libro se ajustará al siguiente formato: Heisenberg, W., Physics and Philosophy. The Revolution in Modern Science, Harper Torchbook, Nueva York, pp.44-58, 1958.

10. Para páginas electrónicas: dirección (fecha de acceso).

11. Los títulos de reportes, memorias, etcétera, deben ir subrayados o en itálicas.

Envío y características del artículo

El envío del artículo deberá ser en archivo electrónico, en Word, tipo de letra Times New Roman, tamaño 12 con interlineado sencillo y uso de editor de ecuaciones.

En el caso de ilustraciones por computadora (BMP, JPG, TIFF, etc.) envíelos en archivos por separado. El material es recibido en:

Contactos, Revista de Educación en Ciencias e Ingeniería.

UAM – Iztapalapa, T144,

Información: cts@xanum.uam.mx,

Tel. 5804-4600. Ext. 1144.

Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186.

C.P. 09310

Arbitraje

El Comité utiliza un sistema de arbitraje anónimo que requiere un mes. Se entiende que los autores no han enviado su artículo a otra revista y que dispondrán de un plazo máximo de un mes para incorporar las observaciones de los árbitros. La decisión final de publicar un artículo es responsabilidad exclusiva del Comité Editorial.

Ejercicio físico y envejecimiento activo: una propuesta integral para adultos mayores desde la UAM-I

M. en I Alfonso Martínez Ortiz
Mtro. Ernesto Palacios González
L.N.H. Itzel Hernández Ramírez
L.N.H. Alejandra Bermeo Arellano
Mtra. Nora Patricia Rosales Silva
C.D. Araceli Hernández Alpizar
Mtra. Betsabé Jiménez Ceballos
Med. Margarita Rodríguez González
Dr. Fernando Ortíz Lachica
LED. Yatziri Gabriela Fernández Morales
LED. Devin Israel Morales Mendoza
Dr. Ramón González Camarena
Dra. Laura Mercedes Santiago Fuentes
Lic. Lidya Ponce Espina
Lic. Carolina Brito Vargas
Mtro. Roberto Salazar Guerrero
Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa
Coordinación de Servicios Integrados para el Bienestar

Abstract

Population aging demands new strategies to promote comprehensive health in older adults. This article presents the results of the "55 y +" program implemented at the Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa Unit (UAM-I), which focuses on promoting active aging through a multidisciplinary approach centered on physical exercise. For over 12 weeks, participants received different services such as health, nutritional, psychological care, and customized physical exercise. In order to obtain the results, in each generation the monitoring and assistance from these services were essential. Results demonstrate significant improvements in regards to strength, flexibility, balance, body composition, sleep quality, and social skills.

Keywords: active aging, physical exercise, comprehensive health, older adults, multidisciplinary

Resumen

El envejecimiento poblacional exige nuevas estrategias para promover la salud integral de los adultos mayores. Este artículo presenta los resultados del programa "55 y +" implementado en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa (UAM-I), que su objetivo es fomentar un envejecimiento activo mediante un enfoque multidisciplinario basado en el ejercicio físico. Durante 12 semanas, los participantes recibieron atención médica, nutricional, psicológica, sexual, odontológica y ejercicio personalizado. El seguimiento e intervención de los diferentes servicios resultó fundamental en cada una de las generaciones para la obtención de los resultados. Los resultados evidencian mejoras significativas en fuerza,

flexibilidad, equilibrio, composición corporal, calidad del sueño y habilidades sociales. Se concluye que un programa de ejercicio físico estructurado y acompañado profesionalmente puede ser una herramienta transformadora para mejorar la calidad de vida en adultos mayores de 55 años, incluso en contextos universitarios.

Palabras clave: envejecimiento activo, ejercicio físico, salud integral, adultos mayores, multidisciplinariedad

Introducción

El envejecimiento de la población es uno de los retos demográficos más relevantes del siglo XXI. La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2020) destaca que para el año 2050, una de cada seis personas en el mundo tendrá 65 años o más. Este fenómeno, acompañado de una mayor esperanza de vida, plantea el desafío de garantizar una vejez saludable, activa y autónoma.

El envejecimiento conlleva una serie de cambios fisiológicos, cognitivos y sociales que inciden en la calidad de vida de las personas. La sarcopenia, la pérdida de densidad ósea, el deterioro de la función cardiorrespiratoria y los trastornos del sueño son solo algunos de los factores que pueden limitar la funcionalidad y la autonomía (Nelson *et al.*, 2007; Cruz-Jentoft *et al.*, 2019). En este escenario, el ejercicio físico ha demostrado ser una intervención eficaz para contrarrestar muchos de estos efectos, mejorando la fuerza muscular, la movilidad, el equilibrio y la salud cardiovascular (Peterson *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2017).

Frente a esta realidad, la Coordinación de Servicios Integrados para el Bienestar (COSIB), en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad

Iztapalapa desarrolló el programa “55 y +”, una iniciativa pionera dirigida a trabajadores universitarios y público externo mayores de 55 años, cuyo objetivo principal es promover el envejecimiento activo mediante la implementación de un plan integral centrado en el ejercicio físico y la intervención multidisciplinaria.

1. Marco contextual y justificación

El envejecimiento no es un proceso uniforme, sino una etapa compleja que integra cambios biológicos, sociales, psicológicos y culturales. Si bien la vejez puede implicar retos funcionales y de salud, también representa una etapa con gran potencial de crecimiento y bienestar, si se acompaña de intervenciones adecuadas. En este contexto, el ejercicio físico ha emergido como una estrategia costo-efectiva y accesible para mejorar la calidad de vida, la autonomía y la salud mental de las personas mayores (Chodzko-Zajko *et al.*, 2009).

Diversos estudios han evidenciado que el ejercicio físico regular mejora la capacidad funcional, reduce el riesgo de enfermedades crónicas, fortalece la densidad ósea y disminuye los síntomas depresivos en la población adulta mayor (Di Pietro *et al.*, 2019; Peterson *et al.*, 2010). No obstante, el acceso a programas estructurados, personalizados y con seguimiento profesional sigue siendo limitado, especialmente en el contexto latinoamericano.

La UAM-I, reconociendo esta problemática y con un compromiso hacia el bienestar integral de su comunidad, diseñó e implementó el programa “55 y +”. Este programa se dirige a la comunidad universitaria y público interesado mayor de 55 años, brindando

una intervención integral a través de la evaluación continua en cada uno de los servicios, en donde cada especialista determina un tratamiento a seguir para cada participante acorde al diagnóstico obtenido. Su modelo de atención integra ejercicio físico regular con acompañamiento médico, nutricional, psicológico, odontológico, de higiene del sueño y orientación sexual.

El presente artículo expone los fundamentos, metodología, resultados y reflexiones derivadas de este esfuerzo institucional, con el objetivo de contribuir a la difusión de estrategias efectivas para la promoción de un envejecimiento saludable y activo.

2. Metodología del programa

El programa “55 y +” fue concebido como una intervención integral de 12 semanas para asegurar las adaptaciones fisiológicas de los participantes. El programa integra ejercicio físico sistemático con atención médica, nutricional, psicológica, de higiene del sueño, salud bucodental y sexualidad. La metodología se fundamenta en la colaboración multidisciplinaria y en la personalización de los planes de acción para cada participante. Cada integrante fue evaluado de forma individual al inicio del programa, y los resultados determinaron las recomendaciones específicas de cada servicio.

2.1 Evaluaciones iniciales

Las evaluaciones iniciales permitieron establecer una línea base de salud general, condición física y estilo de vida. Estas incluyeron:

- **Valoración médica y bioquímica:** Consulta clínica, historial de enfermedades, electrocardiograma, química sanguínea, biometría hemática y pruebas específicas (como antígeno

prostático), para detectar riesgos metabólicos y cardiovasculares.

- **Evaluación de composición corporal y capacidad funcional:**

Medición de grasa corporal, masa muscular, índice de masa corporal y pruebas físicas como la marcha de 6 minutos, silla-sentadilla, equilibrio y flexibilidad, para clasificar el nivel de aptitud física inicial.

- **Estado emocional y cognitivo:**

Aplicación del test de depresión geriátrica (GDS) y MOCA para detectar signos de depresión, deterioro cognitivo leve o ansiedad que pudieran requerir intervención psicológica.

- **Salud bucodental, del sueño y sexualidad:**

Evaluación estomatológica completa, detección de trastornos del sueño y asesoría sobre salud sexual y autoestima, fortaleciendo dimensiones clave del bienestar.

- **Diagnóstico nutricional personalizado:**

Análisis de hábitos alimenticios, horarios y consumo calórico, permitiendo diseñar planes nutricionales adaptados a las metas y necesidades individuales.

2.2 Estructura del plan de ejercicio físico

El eje del programa fue el ejercicio físico, con sesiones grupales de una hora, cinco veces por semana. La rutina semanal se estructuró de la siguiente manera:

- **Lunes a viernes:**

- Calentamiento y movilidad articular (5 minutos)
- Ejercicios de fuerza (30-35 minutos)
- Flexibilidad y estiramientos (10 minutos)

- Actividades específicas: propiocepción, equilibrio y coordinación (1 vez por semana cada una)

Cada rutina fue adaptada a las capacidades individuales y se evitó cualquier actividad que implicara sobreesfuerzo o riesgo de lesión. Además, se registraron signos vitales antes, durante y después de cada sesión.

2.3 Acompañamiento multidisciplinario

Durante las 12 semanas, cada participante tuvo acceso a:

- **Consultas médicas personalizadas** para monitoreo de enfermedades crónicas.
- **Asesoramiento nutricional mensual** y plan de alimentación individualizado.
- **Orientación psicológica y emocional** con estrategias de afrontamiento.
- **Educación para la salud sexual y reproductiva** en etapa madura.
- **Intervenciones para mejorar el sueño**, basadas en hábitos higiénicos y pautas conductuales.

El trabajo coordinado entre especialistas permitió una retroalimentación constante, lo cual facilitó ajustes y mejoras continuas durante todo el proceso.

2.4 Evaluación final

En la semana 12, se aplicaron nuevamente las pruebas y cuestionarios iniciales para evaluar el progreso.

- Prueba de InBody
- Química sanguínea de 12 elementos, biometría hemática y examen general de orina.

- Senior Fitness Test
- Test de MOCA
- Cuestionario de Pittsburg de Calidad de sueño

3. Cambios fisiológicos a partir de los 55 años y el rol del ejercicio físico

El envejecimiento conlleva transformaciones progresivas en todos los sistemas del organismo humano. A partir de los 55 años, estos cambios fisiológicos se hacen más evidentes y requieren una atención preventiva para evitar el deterioro funcional. A continuación, se describen los principales sistemas afectados y cómo el ejercicio físico, en el contexto del programa "55 y +", actúa como modulador positivo de estos procesos.

3.1 Sistema musculoesquelético

La sarcopenia, caracterizada por la pérdida de masa y fuerza muscular, es uno de los cambios más prominentes en esta etapa. Asimismo, la densidad mineral ósea disminuye, aumentando el riesgo de fracturas. El ejercicio de resistencia y fortalecimiento muscular, pilar del programa, ha demostrado aumentar significativamente la masa magra y reducir el riesgo de caídas, mejorando el equilibrio y la movilidad (Cruz-Jentoft *et al.*, 2019).

3.2 Sistema cardiovascular y vascular

Con el envejecimiento, se produce rigidez arterial, disfunción endotelial y disminución de la frecuencia cardíaca máxima. Estas alteraciones incrementan el riesgo de hipertensión y enfermedades coronarias. El ejercicio aeróbico regular mejora la elasticidad vascular, reduce la presión arterial sistólica y promueve una mejor perfusión tisular (Seals *et al.*, 2011).

3.3 Sistema respiratorio

La disminución de la elasticidad pulmonar y de la fuerza de los músculos respiratorios reduce la capacidad vital. A través del entrenamiento funcional y cardiovascular, los participantes mejoraron su tolerancia al esfuerzo, redujeron la disnea y aumentaron su independencia en actividades cotidianas (Lipsitz, 2017).

3.4 Sistema endócrino y metabolismo

El metabolismo basal disminuye, al igual que la producción de hormonas anabólicas como la testosterona y la hormona del crecimiento. Esto afecta la composición corporal, la sensibilidad a la insulina y el control glucémico. El ejercicio físico contribuye a restablecer el equilibrio metabólico, mejorar la regulación hormonal y reducir el riesgo de diabetes tipo 2 (Pedersen & Saltin, 2015).

3.5 Sistema nervioso y función cognitiva

El envejecimiento cerebral implica una reducción de la plasticidad sináptica, el volumen cerebral y la velocidad de procesamiento. El ejercicio se ha relacionado con un aumento en el flujo sanguíneo cerebral y la liberación de neurotrofinas, favoreciendo la función cognitiva, la memoria y el estado de ánimo (Erickson *et al.*, 2011).

3.6 Sistema inmunológico

La inmunosenescencia reduce la eficiencia del sistema inmunitario, favoreciendo infecciones y enfermedades inflamatorias. Estudios indican que el ejercicio regular disminuye la inflamación crónica y mejora la vigilancia inmunológica (Fülöp *et al.*, 2016).

En conjunto, el programa "55 y +" ha sido capaz de generar mejoras medibles

en varios de estos sistemas, lo que se traduce en mayor funcionalidad, mejor salud subjetiva y prevención de patologías asociadas al envejecimiento.

4. Beneficios sociales y psicológicos del ejercicio en adultos mayores

El impacto del ejercicio físico en los adultos mayores no se limita al plano fisiológico. Diversas investigaciones han demostrado que también cumple un papel crucial en la mejora del bienestar emocional, la autoestima y la integración social (Bherer *et al.*, 2013; Bamidis *et al.*, 2014). Estos beneficios fueron evidentes en el desarrollo del programa "55 y +" de la UAM-I.

4.1 Bienestar emocional y salud mental

Durante el programa, muchos participantes manifestaron una disminución notable en los niveles de estrés, ansiedad y síntomas depresivos. La inclusión de estrategias de afrontamiento, acompañamiento psicológico y una rutina estructurada contribuyeron a la estabilización emocional. La regularidad del ejercicio promueve la liberación de endorfinas y serotonina, lo que genera una sensación sostenida de bienestar (Hess & Dieberg, 2017).

4.2 Fomento de la autoestima y percepción de logro

A lo largo de las semanas, los participantes percibieron cambios visibles en su cuerpo y en su capacidad funcional, lo que aumentó su confianza personal. El seguimiento individualizado y la devolución de resultados al final del programa reforzaron el sentido de logro. La posibilidad de cumplir retos físicos y mejorar su condición general fue valorada como una victoria personal.

4.3 Dinámicas sociales positivas

Uno de los logros más valiosos del programa fue la creación de una red de apoyo social entre los participantes. La interacción diaria en las sesiones generó un ambiente de confianza, empatía y solidaridad. Un caso destacado fue el de un profesor universitario de matemáticas, quien inicialmente se mostraba introvertido, pero con el paso del tiempo se integró plenamente al grupo, participó en charlas informales y compartió su pasión por el deporte y la estadística con entusiasmo. Estas interacciones fortalecieron la cohesión del grupo y redujeron el aislamiento.

4.4 Reducción del aislamiento y promoción de comunidad

Para muchos adultos mayores, la jubilación, la pérdida de relaciones laborales o la reducción de la actividad social pueden derivar en aislamiento. El programa "55 y +" actuó como un catalizador social, promoviendo nuevas amistades, intercambio de experiencias y sentimientos de pertenencia. Esto fue particularmente notorio en las convivencias organizadas al final del programa.

En conjunto, los beneficios psicológicos y sociales observados refuerzan la idea de que el ejercicio físico en adultos mayores debe considerarse una estrategia integral de salud mental y conexión humana, más allá de los beneficios fisiológicos.

5. Resultados del programa: indicadores cuantitativos y cualitativos

Los resultados obtenidos tras la implementación del programa "55 y +" fueron analizados tanto desde una perspectiva cuantitativa como cualitativa, permitiendo valorar el impacto en la salud física, mental y

social de los participantes.

5.1 Indicadores fisiológicos

- **Composición corporal:** En el 78% de los participantes se observó una reducción significativa de masa grasa (entre 2% y 4%) y un aumento proporcional de masa muscular magra.
- **Presión arterial:** En quienes presentaban hipertensión controlada,

el 65% logró una reducción de entre 5 y 10 mmHg en la presión sistólica.

- **Resistencia cardiovascular:** Se registraron mejoras en pruebas de marcha de 6 minutos y tiempo en silla-sentadilla, incrementando el rendimiento físico funcional en más del 80% de los casos.
- **Flexibilidad y equilibrio:** Las pruebas de equilibrio unipodal y alcance funcional mejoraron en promedio un 20% respecto a los valores iniciales.

Presentamos algunos gráficos:

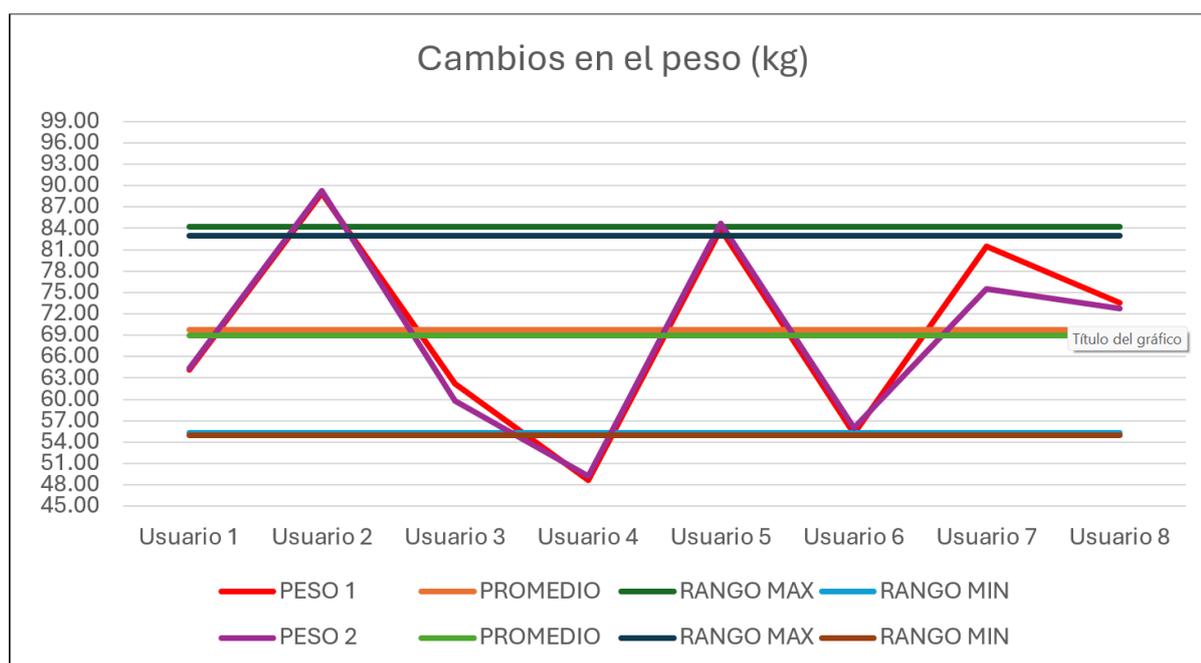


Figura 1: Gráfica comparativa del peso inicial vs peso final en el programa

De acuerdo a la figura 1, se observa (entre 0.80 y 6.00 kg); el participante que entre los participantes, 5 mostraron aumentos ligeros de peso (entre 0.30 y 7 mostró la mayor modificación con una pérdida de 6.0 kg y el participante 3 tuvo una pérdida significativa de 2.40 kg.

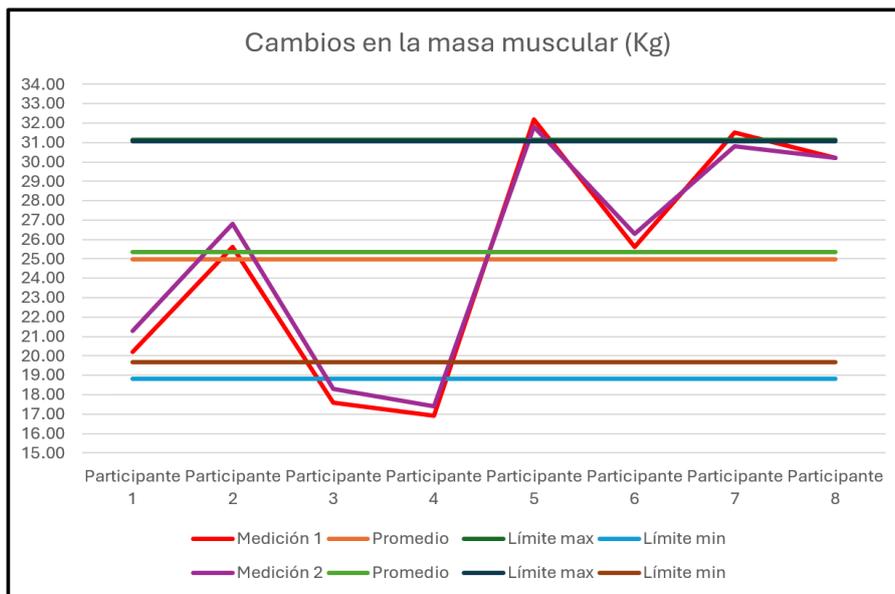


Figura 2: Gráfica comparativa de la masa muscular pre y post intervención del ejercicio físico

Se observa que entre los participantes, leves y 1 participante mantuvo su masa muscular sin cambios. La media inicial fue de 24.9 kg y la final de 25.36 kg donde 2 de ellos tuvieron ganancias significativas mayores a 1 kg y los tres restantes ganancias moderadas (entre 0.5 – 1 kg); 2 presentaron pérdidas

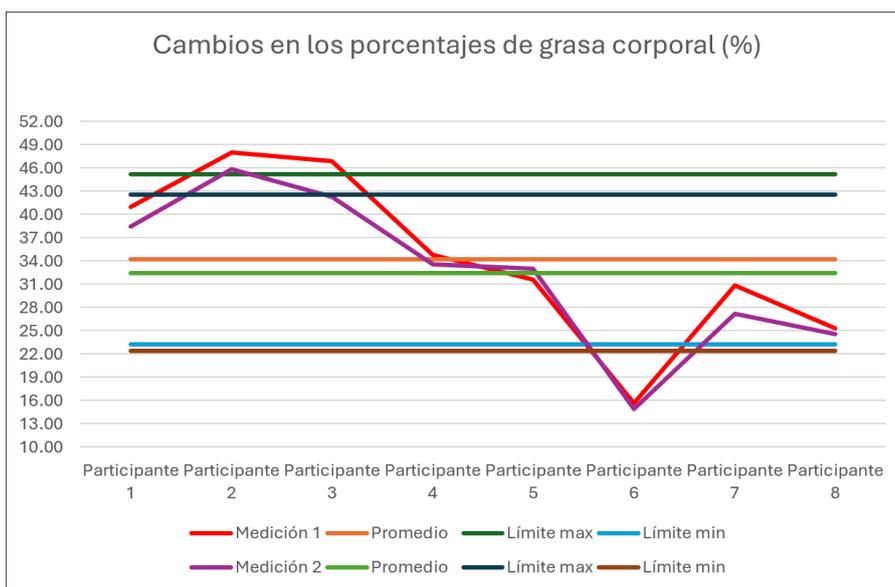


Figura 3: Gráfica comparativa del porcentaje de grasa corporal pre y post intervención del ejercicio físico

Se observa que entre los participantes, 7 de 8, es decir el 87.5% mostraron reducción en el porcentaje de grasa corporal. El de mayor reducción fue de 4.60% y los de menor de .70% y un único incremento de 1.40%. Estos resultados muestran que la intervención del programa fue efectiva en la mayoría de los participantes.

5.2 Indicadores psicológicos

- **Depresión y estado de ánimo:** Según el test de depresión geriátrica (GDS), el 60% de los participantes con puntuaciones moderadas al inicio redujeron su sintomatología al rango leve o inexistente.
- **Calidad del sueño:** Se observó una mejora significativa en los patrones de sueño en el 70% de los asistentes, con menor latencia y despertares nocturnos.
- **Percepción de bienestar:** En encuestas de satisfacción, el 92% manifestó sentirse más activo, funcional y con mejor calidad de vida tras el programa.

5.3 Resultados cualitativos

Los testimonios recogidos mediante

entrevistas abiertas permiten identificar elementos clave del éxito del programa:

- **Revalorización de la etapa vital:** Muchos participantes expresaron un cambio en su visión del envejecimiento, pasando de una etapa de declive a una de crecimiento.
- **Empoderamiento personal:** La posibilidad de controlar sus hábitos, recuperar movilidad y sentirse acompañados les brindó un renovado sentido de agencia.
- **Construcción de comunidad:** La experiencia grupal generó vínculos sólidos, apoyo emocional mutuo y redes sociales significativas.

En suma, los datos analizados respaldan la eficacia del programa "55 y +" como una estrategia de intervención integral que genera resultados medibles y sostenibles en el tiempo. La evidencia empírica recolectada sienta las bases para su continuidad, escalabilidad y adaptación en otros contextos universitarios o comunitarios.

5.4 Resultados cuantitativos

A continuación se presenta un cuadro resumen con algunos de los principales indicadores cuantitativos observados antes y después del programa "55 y +":

| Indicador | Antes del Programa | Después del Programa |
|------------------------------|---|---|
| Masa grasa corporal | Alta proporción con exceso (>30%) | Reducción del 2% al 4% en el 78% |
| Masa muscular magra | Disminuida por sedentarismo | Incremento proporcional en el 78% |
| Presión arterial sistólica | 135–145 mmHg en hipertensos controlados | Reducción de 5–10 mmHg en el 65% |
| Resistencia física funcional | Baja tolerancia a esfuerzo sostenido | >80% mejoró en marcha de 6 min y sentadilla |
| Equilibrio y flexibilidad | Limitaciones en pruebas funcionales | 20% promedio de mejora |
| Síntomas depresivos (GDS) | 60% con puntuaciones moderadas | Reducción a leve o nulo en la mayoría |
| Calidad del sueño | Sueño fragmentado y poco reparador | 70% reportó sueño profundo y continuo |
| Percepción de bienestar | Baja energía y motivación inicial | 92% reportó sentirse más funcional y activo |

Estos datos fueron recopilados en indicadores reportes individuales y compartidos con cada participante, lo cual reforzó la percepción de logro y empoderamiento personal.

Se observaron mejoras significativas en

6. Conclusiones y recomendaciones

El programa "55 y +" de la UAM-I se consolida como una estrategia exitosa de intervención integral en salud para adultos mayores, combinando

ejercicio físico regular con un abordaje multidisciplinario personalizado. A lo largo de 12 semanas, los participantes mejoraron significativamente su condición física, redujeron síntomas psicológicos y fortalecieron sus redes sociales, reafirmando el valor del ejercicio como pilar del envejecimiento activo.

Desde una perspectiva científica, los resultados obtenidos respaldan la evidencia internacional sobre los beneficios del ejercicio físico en la prevención de enfermedades crónicas, la mejora del bienestar emocional y la prolongación de la autonomía funcional en la vejez.

Entre las recomendaciones derivadas del estudio, se proponen las siguientes:

- **Institucionalizar el programa de forma permanente**, permitiendo su repetición semestral y abriendo nuevas convocatorias para trabajadores y jubilados.
- **Extender el modelo a otras unidades académicas** o instituciones interesadas en el envejecimiento saludable, adaptando su implementación a distintos contextos socioculturales.
- **Fortalecer el seguimiento longitudinal**, permitiendo medir impactos a mediano y largo plazo para evaluar la sostenibilidad de los cambios logrados.

- **Difundir el modelo como buena práctica**, mediante publicaciones, foros y colaboraciones interinstitucionales en el ámbito de la salud pública y la educación.

En suma, el programa "55 y +" demuestra que el envejecimiento no tiene por qué ser sinónimo de deterioro, sino una etapa de transformación activa, bienestar y crecimiento cuando se brindan las herramientas adecuadas. Su éxito radica en el acompañamiento humano, la evidencia científica aplicada y la creación de comunidad, lo cual puede inspirar políticas públicas de promoción de la salud orientadas a las personas mayores en México y América Latina.

Referencias

- [1] Chodzko-Zajko, W., *et al.* (2009). Exercise and physical activity for older adults. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 41(7), 1510–1530.
- [2] Cruz-Jentoft, A. J., *et al.* (2019). Sarcopenia: revised European consensus on definition and diagnosis. *Age and Ageing*, 48(1), 16–31.
- [3] Di Pietro, L., *et al.* (2019). Exercise as a prescription for older adults: current recommendations. *Sports Medicine*, 49(1), 69–79.
- [4] Fülöp, T., *et al.* (2016). Immunosenescence and

- inflamm-aging as two sides of the same coin. *Frontiers in Immunology*, 7, 196.
- [5] Liu, C. J., & Latham, N. K. (2017). Exercise interventions for preventing falls in older people living in the community. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, (8).
- [6] Nelson, M. E., *et al.* (2007). Physical activity and public health in older adults. *Circulation*, 116(9), 1094–1105.
- [7] OMS. (2020). Decade of Healthy Ageing 2020–2030. Organización Mundial de la Salud.
- [8] Peterson, M. D., *et al.* (2010). Resistance exercise for muscular strength in older adults: a meta-analysis. *Ageing Research Reviews*, 9(3), 226–237.



**Genotipos de coral
resistentes:
el santo grial de la
restauración coralina**

Dr. Sergio D. Guendulian García

Unidad Académica de Sistemas Arrecifales,
(UNAM), Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

Dr. Luis P. Suescún Bolívar

Programa de Licenciatura en Educación con
Énfasis en Ciencias Sociales y Ambientales.
Universidad de Cartagena, Colombia.

Mtra. Rita Sellares Blasco

Fundación Dominicana de Estudios Marinos,
República Dominicana.

Dr. Aldo Croquer

The Nature Conservancy, Dominican Republic.

Abstract

Coral reefs are one of the most important ecosystems on the planet. However, in recent decades coral reefs have been one of the most affected ecosystems due local pressures, such as poor water quality, overfishing and coastal development, as well as, global pressures, such as global warming, responsible for coral bleaching. These pressures have reduced coral populations worldwide, particularly in the Caribbean region. In this context, coral restoration emerged as a strategy that seeks to compensate for these losses. These strategies have used different tools (including molecular ones) to reproduce and transplant corals to target sites. In recent years, one of the most popular strategies has been the identification of high temperature tolerant coral genotypes. In this work, we describe and discuss the use of molecular biology for the identification of coral genotypes as a strategy to face the changing environment.

Keywords: Coral reefs, Molecular biology, Climate change

Resumen

Los arrecifes de coral, uno de los ecosistemas más importantes del planeta, se forman principalmente a partir del crecimiento de diferentes especies de coral. En las últimas décadas también han sido uno de los ecosistemas más afectados por presiones tanto locales como la mala calidad del agua, la sobre pesca y el desarrollo costero, así como globales como el calentamiento global de los océanos que ha desencadenado los tan alarmantes eventos de blanqueamiento. Estas presiones han mermado las poblaciones de coral a nivel mundial y en particular en la Región del Caribe. En este contexto, surge la restauración de corales, como un conjunto de estrategias

que buscan compensar las pérdidas. Estas estrategias se han valido de diferentes herramientas (incluyendo las moleculares) que ayuden en la reproducción de corales y trasplante de estas en sitios objetivo. En los últimos años, una de las tendencias de restauración ha sido la identificación de corales (genotipos) capaces de resistir temperaturas altas. En este trabajo, se describe en un contexto amplio el empleo de la biología molecular para la identificación de genotipos de coral como herramienta de conservación de arrecifes. Así mismo, invita a la discusión respecto a las implicaciones de la selección de genotipos de coral como estrategia para enfrentar la situación medioambiental actual.

Palabras clave: Arrecifes de coral, Biología Molecular, Cambio climático.

Introducción

Irene Cassini toma uno de sus cabellos rubios y se lo ofrece a Vincent Freeman para que este pueda decodificar el ADN de la joven y así validar su perfección, pues fue concebida mediante selección genética artificial, lo que le confiere una “superioridad” sobre aquellos que son engendrados de forma natural, así como acceso a una “mejor vida y estatus social”. Esta es la primicia de “GATTACA”, una película de ciencia ficción de 1997 que presenta un futuro distópico en donde la selección genética define la perfección de la humanidad, generando discriminación hacia aquellos seres humanos cuyo código genético es producto del azar.

En 1997, los más afortunados jugaban con su recién lanzada consola Nintendo 64, se estrenaba South Park, Soda stereo brindaba su último concierto, se firmaba el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático y se anunciaba la clonación de

la oveja Dolly. Este alarmante último evento, ponía en claro el poder de las herramientas moleculares, a la vez que levantaba alarmas sobre las implicaciones éticas, morales y religiosas que podrían derivarse de esta tecnología emergente. Aun con estos avances, en 1997, resultaba revelador e increíble que se pudiera por medio del análisis de células cutáneas, sangre o incluso un cabello, determinar el mapa genético de una persona. Las siglas ADN se asumen hoy en día con naturalidad, pero la ciencia ha recorrido un largo camino desde que un monje Agustino Checo de nombre Gregor y apellido Mendel, realizó cruces entre plantas de guisantes, formulando las bases de lo que hoy se conoce como herencia.

El empleo del ADN resulta común en nuestros días, es parte casi obligada de nuestra cotidianidad. Lo vemos continuamente en pruebas forenses en series de televisión o en las noticias, relacionado con tratamientos para curar enfermedades, o con la aparición de nuevas alteraciones fisiológicas o anatómicas. Por lo tanto, ahora resulta poco sorprendente que con solo depositar saliva en un tubo y mandarla a un laboratorio especializado, puedes conocer la composición porcentual de tus antepasados, encontrar parientes lejanos, determinar la paternidad de hijos o padres “perdidos”, y saber si se es propenso a enfermedades, entre otras cosas. ¿Pero exactamente qué es el ADN y donde se encuentra?

El ADN o ácido desoxirribonucleico, es una molécula formada por una doble cadena de nucleótidos estabilizadas por puentes de hidrógeno, donde cada nucleótido dentro de la cadena se une a través de enlaces de fosfato y azúcar. El ADN se encuentra presente en cada célula de los seres vivos,

específicamente en un compartimiento llamado núcleo (a excepción de las bacterias, pero de esas se hablará en otra ocasión). Mediante mecanismos moleculares que suceden a nivel celular, cada componente del ADN se traduce. En este sentido, el ADN es particular para cada organismo, se encuentra organizado en genes y funciona como un sistema de almacenamiento de información, es la unidad básica de la herencia que permaneció oculta para Mendel. El almacenaje de la información de los organismos se genera de manera análoga a una biblioteca, donde cada libro representa una unidad de almacenamiento que contiene muchas huellas específicas que permiten caracterizar (genotipificar) y predecir el funcionamiento de organismos de manera inequívoca. Esto es posible porque en el ADN se guarda toda la información del pasado, y sobre ella se escribe el presente y el futuro de cada uno de los organismos vivos.

Por esta razón, el estudio del ADN ha resultado una herramienta poderosa, empleada en las ciencias médicas y forenses, así como en investigaciones de diversos grupos de organismos e incluso ecosistemas. En tiempos relativamente recientes, estas herramientas moleculares han resultado de gran utilidad en el estudio de diversos organismos y ecosistemas tales como los corales y los arrecifes que estos forman.

Los arrecifes de coral en los tiempos del cambio climático

Sobre los continentes, los bosques y selvas son conocidos por presentar una alta complejidad estructural generada principalmente por los árboles que habitan estos ecosistemas, lo que permite generar una alta abundancia y diversidad de organismos. En el ambiente marino en las zonas poco

profundas y tropicales (regiones que se encuentran entre el trópico de Cáncer y el de Capricornio), los arrecifes de coral generan un hábitat análogo a los bosques, con la gran diferencia en que las estructuras fundacionales de estos ecosistemas, las componen los corales duros, organismos pertenecientes al reino Animal, y no Plantae.

Los arrecifes de coral son ecosistemas de suma importancia que sostienen una gran cantidad de especies marinas; además, poseen importantes funciones como el brindar protección a las costas y generan una gran derrama económica por parte del turismo. Estos ecosistemas se forman mediante el depósito de carbonato de calcio, principalmente a través del crecimiento de los corales, los cuales funcionan como una especie

de bloque que forma la estructura de la matriz arrecifal, por lo que se han ganado el título nobiliario “ingenieros del arrecife”. Los corales observados a simple vista son colonias formadas por un conjunto de individuos denominados pólipos (Figura 1 B), cada uno con la misma información genética que su par. Estos a su vez establecen una asociación simbiótica con algas unicelulares (i.e., zooxantelas), las cuales, por medio de la fotosíntesis, pueden generar nutrientes para el coral. Es por ello por lo que, de forma genérica, a las zooxantelas se les conoce como foto simbiontes, un grupo extremadamente diverso que se asocia a múltiples especies de corales, e incluso a otros organismos marinos. Esta asociación es tan importante que, sin los simbiontes, los corales pueden llegar a morir.

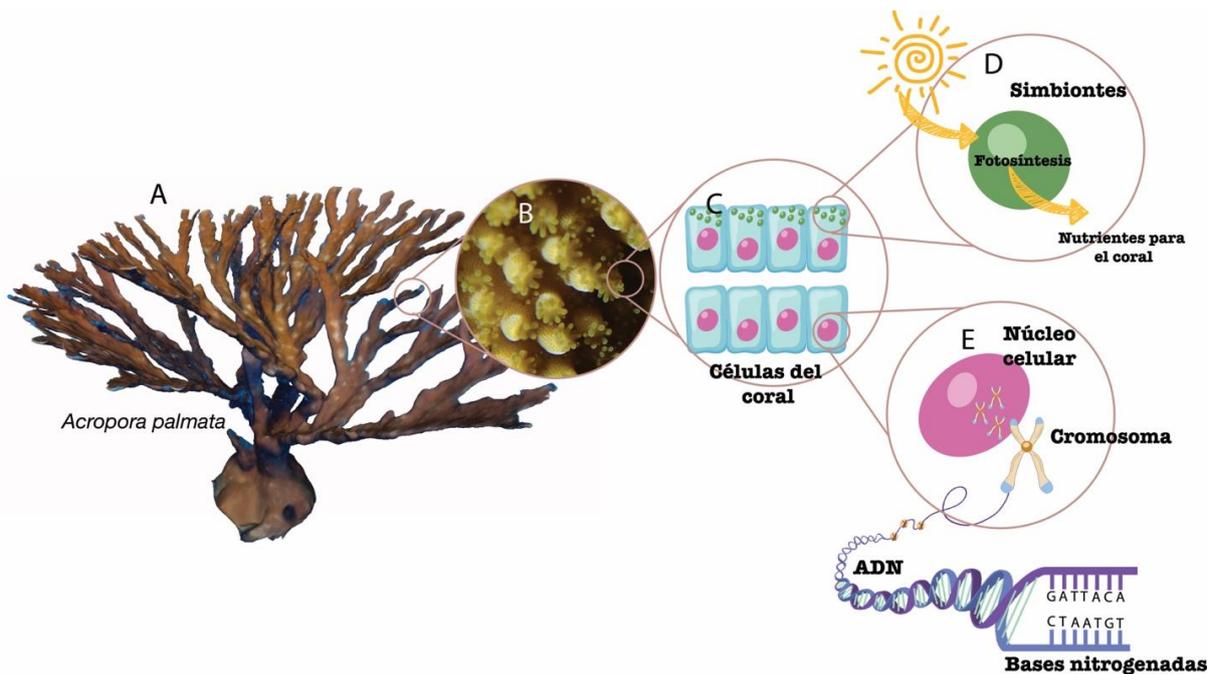


Figura 1: Localización del ADN en un coral. A) Colonia del coral *Acropora palmata*. B) Amplificación de un pedazo de colonia. Muestra que está formada por individuos llamados pólipos con la misma información genética. C) Representación del tejido celular de los corales. D) Representación de la función de los simbiontes dentro del coral. E) Representación del núcleo, el cual contiene el ADN empaquetado (cromosomas).

Actualmente, debido a distintos estresores locales y globales, tales como la contaminación, sobrepesca, y cambio climático, las poblaciones de corales se han reducido de forma considerable a escala mundial. De forma particular, las poblaciones de corales en la región del Caribe han experimentado repercusiones negativas importantes debido principalmente a los constantes eventos de blanqueamiento, así como la aparición de distintas enfermedades de pérdida de tejido rápido (ej. enfermedad de banda blanca, enfermedad de plaga blanca y enfermedad de pérdida de tejido rápido “SCTLD”).

Bajo este escenario, ha resultado necesario el establecimiento de diversos programas y esfuerzos de conservación y restauración de corales (Bayraktarov *et al.* 2019; Boström-Einarsson *et al.* 2020).

La estrategia de la mayoría de los esfuerzos de restauración ha consistido en la reproducción de corales y la introducción de estos a sitios degradados. Los corales poseen dos estrategias de reproducción; asexual y sexual. La primera se debe a la característica colonial, es decir, que cuando una colonia

se rompe (proceso común en aquellos corales con morfologías similares a las ramas de los árboles) el fragmento tiene la capacidad de producir una nueva colonia, esto forma un clon, ósea una colonia con la misma información genética que la “colonia madre”. La segunda, involucra la combinación de espermatozoides y óvulos de colonias diferentes (Figura 2), es decir produce un organismo genéticamente diferente a los padres.

Debido a la practicidad, y la relativa facilidad, la reproducción asexual por fragmentación es una de las estrategias más empleadas a nivel mundial. No obstante, se le atribuye a la población de corales producida, una reducida variabilidad genética, lo que resulta cierto siempre que se emplee un número limitado de colonias donadoras con diferente genotipo.

Por lo que el empleo de herramientas moleculares como la caracterización del ADN de las poblaciones de coral han resultado de gran utilidad para detectar los distintos genotipos que componen a las colonias donantes.

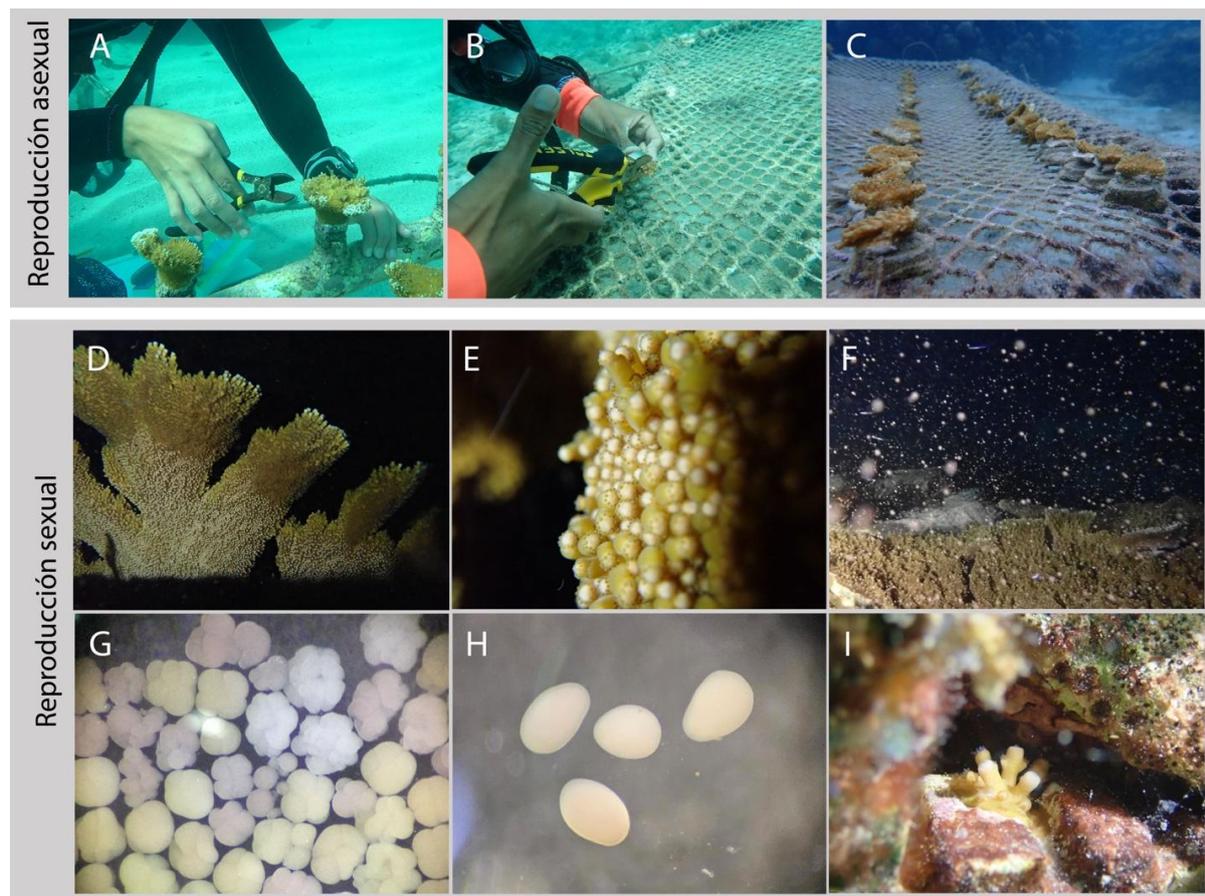


Figura 2: Estrategias asistidas de reproducción de corales. A) Fragmentación de una colonia donante (este evento también puede ocurrir de forma natural). B) Sub-fragmentación de la colonia donante. C) Ejemplo de fragmentos con el mismo ADN, pues provienen de la misma colonia donante. D) Colonia del coral *Acropora palmata* preparada para desovar. E) Detalle de los pólipos sosteniendo gametos. F) Desove de coral, cada “esfera” observada corresponde a un paquete de gametos. G) Divisiones celulares (desarrollo embrionario) después de la fecundación, similar a lo que sucede en humanos. H) Larva de coral a punto de buscar un sustrato duro para establecerse. I) Primeros pólipos de una colonia de coral, cada uno guarda la misma información genética, pero diferente a otra colonia producida sexualmente.

El ADN como herramienta en los esfuerzos de conservación y rehabilitación

Hoy en día los corales son reconocidos como meta-organismos, debido a que en sus tejidos se alberga una multiplicidad de microorganismos que establecen diferentes relaciones simbióticas con el animal, esto se conoce como el microbioma coralino.

La caracterización del ADN de los corales posee distintas aplicaciones en el estudio y conservación de los

arrecifes de coral. Por ejemplo, se puede saber la diversidad genética de las poblaciones de coral, es decir, el número de colonias con distinto genotipo, así como de la población de microalgas simbiotas, ver el grado de parentesco entre distintas poblaciones de coral, estudiar el microbioma, estudiar las enfermedades que afectan a los corales, o la reacción de los corales ante distintos escenarios de estrés como el incremento de la temperatura, enfermedades y reproducción, entre otras.

Independientemente de la aplicación, estas técnicas moleculares inician con la extracción del ADN, en el caso de los corales, esta extracción corresponde a todos los organismos que viven en asociación con el coral, desde el mismo coral, las algas simbiotas, hasta bacterias que se encuentran asociadas al tejido o mucus de estos organismos. Posteriormente, se realiza una codificación de las piezas y el orden en que lo conforman para cada uno de los organismos de interés (en este caso particular del coral). Para lograr esta caracterización o genotipificación en corales, primero es necesario la toma de una pequeña muestra de tejido de la colonia objetivo (Figura 3A), posteriormente se emplean una serie de procedimientos que incluyen la ruptura de los tejidos y células, con el fin de “liberar” el material genético agregando una serie de soluciones que ayudan a estabilizar y a proteger la integridad de las moléculas de ADN (Figura 3B-C), (Fig. 3D) y la evaluación de su calidad por medio de técnicas como la electroforesis (Figura 3E-F). Finalmente, los extractos de ADN son enviados a un laboratorio especializado en donde se determina por medio de marcadores específicos, la composición y orden de cada una de las piezas de la cadena de ADN.



Figura 3: Extracción de ADN en corales. A) Recolecta de un pequeño fragmento con tejido de coral en los viveros de *Acropora cervicornis*. B) Inicio del proceso de ruptura de tejido. C) Inspección de la muestra. D) Extracto final. E-F) detección de ADN mediante electroforesis. Créditos fotográficos: Marvin del Cid

Indiana Jones y la última cruzada

En la creencia cristiana, El Santo Grial, la copa en donde Cristo bebió “el vino” antes de ser crucificado para la salvación de los pecados de la humanidad, ha sido fuente de inspiración generando diversas leyendas y mitos antiguos, así como recientes. Quizás una de las referencias más populares (al menos para la corte de edad de los nacidos entre 1980 y el 1995), sea la película Indiana Jones y la última cruzada, en donde Indiana Jones, un Profesor de Historia, arqueólogo y aventurero, se enfrenta a una serie de adversidades y a un ejército Nazi, para conseguir el Santo Grial y evitar que Hitler se apodere de él, pues este se cree que posee el secreto de la vida eterna. En este y muchos sentidos, el Santo Grial se ha empleado como símbolo de una búsqueda de un objeto valioso pero inalcanzable.

En la conservación de arrecifes, la identificación y selección de genotipos que sean resistentes a diferentes estresores, por ejemplo, a las altas temperaturas, es un objetivo anhelado y perseguido (Baums *et al.* 2005; Baums 2008; Drury *et al.* 2019). Similar a la búsqueda de un Santo Grial, encontrar a un coral resistente o “super coral” mediante la selección de genotipos, se ha vuelto el quehacer principal de muchos. El principio de la selección de genotipos resulta relativamente sencillo. Por ejemplo, existen corales que resisten a la temperatura, y otros que presentan blanqueamiento que resulta en la muerte de las colonias (West and Salm 2003), por lo que se le da “prioridad” a reproducir y cultivar colonias de coral que muestren resistencia.

El primer problema natural de este principio es asumir que la resistencia es debida enteramente al coral, es decir,

asumir al coral como un individuo particular, sin considerar que en realidad se trata de un organismo que vive en asociación con una serie de microorganismos que trabajan en conjunto y cuya delicada interacción es fundamental para el funcionamiento y supervivencia del hospedero. A este conjunto de organismos se le conoce como el microbioma, lo conforman además de las microalgas simbiotes, una serie de bacterias, protozoarios, hongos, etc. Por lo que la búsqueda de este santo grial sólo tendría sentido si se considera al coral como esta unidad, es decir considerar al coral como un meta organismo.

Por otra parte, la selección de genotipos que sean resistentes a las temperaturas altas, no significa necesariamente, que sean resistentes a otras presiones como a las enfermedades actuales o futuras. Es decir, el desempeño de un individuo es individual, pero no invariada. De acuerdo con la evolución, la selección natural actual sobre diferentes atributos de un individuo. En otras palabras, no tiene sentido buscar un meta organismo (coral) que sea resistente a altas temperaturas, pues esto no necesariamente es sinónimo de un alto desempeño por parte de este super coral, ya que naturalmente habrá otras presiones que actúen sobre diversos atributos de ese meta organismo, que determinarán si es seleccionado o no. Obviando las dos posturas anteriores, el tercer problema surge al asumir que de conseguir un organismo resistente este pasará de forma automática esta resistencia a su progenie. Es decir, supongamos que conseguimos al santo grial, ¿cómo nos aseguramos de que lo que introducimos, modificamos, manipulamos en ese organismo para que sea santo y grial?, ¿cómo logramos que esta resistencia termine siendo pasada a

su progenie? Y de ser pasado, ¿cómo nos aseguramos de que ese atributo sea seleccionado de manera que el atributo deseado, termine fijándose en la población?, ¿son siempre los genes que dan ventaja los que se fijan en la población? si es así, cómo explicamos la presencia de genes letales que activan el cáncer o la leucemia en poblaciones humanas.

La eugenesia, es el principio que aboga por el mejoramiento de los rasgos hereditarios no solo físicos sino también intelectuales, analógicamente a la “mejora” de otros organismos como caballos o perros, mediante el control de los entrecruzamientos. En la película GATTACA, la ingeniería genética no solo es empleada para conocer con exactitud el ADN de un recién nacido, saber si es propenso a enfermedades, adicciones o hasta su tiempo de vida, sino que además es empleada para seleccionar los mejores genes pudiendo escoger las características físicas e intelectuales del no nacido.

GATTACA invita a cuestionar ética, moral y biológicamente a la selección artificial; ¿hasta qué punto se considera adecuado el empleo de estas herramientas?, ¿hasta qué punto la selección artificial determina en el caso del protagonista de la película su destino?

Similar a lo que sucede en GATTACA, la selección de genotipos en corales debería invitar a la reflexión, y a generar una discusión respecto a la búsqueda del “super coral” mediante la selección de genotipos específicos como la panacea de la conservación de los arrecifes, o a la conservación de la diversidad como fuente y preservación de pozas genéticas que permitan la selección y diversificación adaptativa

de las poblaciones existentes.

Conclusión

Los arrecifes de coral han existido en el planeta por millones de años; se estima la aparición de los corales hace 700 millones de años, hace 3500 veces el tiempo en el que apareció el ser humano, quienes surgieron hace apenas 200 mil años. Sin embargo, diversos autores señalan que la condición de estos ecosistemas se ha visto seriamente afectada, sobre todo a partir de la revolución industrial, evidenciando a los hábitos de producción y de consumo de la humanidad como el principal causante de este deterioro. Lo cierto es que los arrecifes de coral han dejado de ser lo que eran y este cambio se ha producido en una escala temporal relativamente corta.

No se puede seguir viendo a la restauración como la panacea que salvará a los corales, si bien es una actividad loable, no puede ser la única solución que podemos implementar ante la situación actual de los arrecifes de coral. Este planteamiento naturalmente lleva a repensar la forma en la que se ha abordado el problema, así como las soluciones propuestas. Los autores de este trabajo creemos que es importante siempre y cuando se persigan objetivos específicos y a largo plazo, se empleen herramientas y diseños que permitan ver el efecto de las intervenciones realizadas. Es indudable que cada uno de estos esfuerzos de restauración plantean un escenario y oportunidad única de estudio para responder preguntas elementales que nos ayuden a entender las dinámicas en los sitios de restauración y a realizar mejores prácticas.

El problema de la condición actual de los arrecifes es multidimensional

y sucede a escalas globales, por lo cual, la solución no puede ser tan simple como reproducir corales y plantarlos en arrecifes degradados, requiere un replanteamiento de los hábitos globales de producción; como bien decían nuestros abuelos “a grandes problemas grandes soluciones”. Esta es una batalla que se debe pelear en diferentes trincheras a nivel global y a nivel personal, desde la investigación científica, desde las donaciones económicas, desde nuestros cambios de consumo. Pero, sobre todo, lo más importante es estar conscientes de cada acto de nuestras vidas por muy pequeño que parezca, como en el momento en el que nos despertamos por la mañana y encendemos la luz, el desayuno que nos comemos, el trayecto al trabajo, etc. posee un efecto en el ambiente que nos rodea y a una explotación o contaminación de los recursos naturales de los cuales dependemos.

Agradecimientos

Este artículo de divulgación surge como un producto generado a partir de una serie de talleres y capacitaciones financiadas por el proyecto MONITOREA, cuyos fondos provienen de la Embajada Francesa en República Dominicana. Agradecemos la coordinación de Someira Zambrano para la organización e impartición de estos talleres. Asimismo, agradecemos a la Dra. Natalia Carabantes por su apoyo en la parte práctica del taller de extracción de ADN de corales impartido por la Fundación Dominicana de Estudios Marinos (FUNDEMAR). Agradecemos a Marvin del Cid por el aporte del material fotográfico y a todo el EQUIPO DE FUNDEMAR para la recolecta y procesamiento de muestras de ADN.

Referencias

- [1] Baums IB (2008) A restoration genetics guide for coral reef conservation. *Mol Ecol* 17:2796–2811
- [2] BAUMS IB, MILLER MW, HELLBERG ME (2005) Regionally isolated populations of an imperiled Caribbean coral, *Acropora palmata*. *Mol Ecol* 14:1377–1390
- [3] Bayraktarov E, Stewart-Sinclair PJ, Brisbane S, Boström-Einarsson L, Saunders MI, Lovelock CE, Possingham HP, Mumby PJ, Wilson KA (2019) Motivations, success, and cost of coral reef restoration. *Restor Ecol* 27:981–991
- [4] Boström-Einarsson L, Babcock RC, Bayraktarov E, Ceccarelli D, Cook N, Ferse SCA, Hancock B, Harrison P, Hein M, Shaver E, Smith A, Suggett D, Stewart-Sinclair PJ, Vardi T, McLeod IM (2020) Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLoS One* 15:e0226631
- [5] Drury C, Greer JB, Baums I, Gintert B, Lirman D (2019) Clonal diversity impacts coral cover in *Acropora cervicornis* thickets: Potential relationships between density, growth, and polymorphisms. *Ecol Evol* 9:4518–4531
- [6] Van Oppen MJH, Gates RD (2006) Conservation genetics and the resilience of reef-building corals. *Mol Ecol* 15:3863–83
- [7] West JM, Salm R V. (2003) Resistance and Resilience to Coral Bleaching: Implications for Coral Reef Conservation and Management. *Conservation Biology* 17:956–967



**Listando las aves en un
conjunto urbano mediante
ciencia ciudadana**

Biol. Rodrigo Bata Benítez

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Biol. Atenas Meneses Paredes

Universidad del Mar, México

Dr. Mariusz Janczur

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Dra. Jimena Guerrero

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Abstract

Citizen science has applications in biodiversity research, in addition to providing emotional benefits to the people who participate in this activity. In this study, we invited the general public to a series of bird identification courses, with the purpose of generating a list of the birdlife in an urban complex in the State of Mexico, and at the same time, evaluate the impact of this activity on the emotional well-being of the participants. As a result, we identified 24 species belonging to four taxonomic orders. In addition, self-reported well-being improved in participants as a result of their involvement in the courses.

Keywords: birds, biodiversity, citizen science, State of Mexico, welfare.

Resumen

La ciencia ciudadana tiene aplicaciones en investigación de biodiversidad, además de proveer beneficios emocionales a las personas que participan en ella. En este estudio, invitamos al público en general a cursos de identificación de aves, con el propósito de generar un listado de la avifauna de un conjunto urbano en el Estado de México, y al mismo tiempo, evaluar el impacto de esta actividad en el bienestar emocional de los participantes. Como resultado, identificamos 24 especies, pertenecientes a cuatro órdenes taxonómicos. Además, los participantes en los cursos reportaron mejoras en su estado de ánimo al participar en los mismos.

Palabras clave: aves, ciencia ciudadana, Estado de México, bienestar

Introducción

El monitoreo de aves, permite identificar áreas prioritarias para la conservación

de las mismas, y es muy útil para detectar cambios en la diversidad de especies de aves debido a alteraciones de su hábitat. Esta actividad también ayuda a conectar a las personas con la biodiversidad de su entorno (Ortega-Álvarez, 2015). Sin embargo, realizar monitoreos y/o listas de especies de aves, es un reto importante ya que se necesitan recopilar muchas observaciones y generalmente hay pocas personas disponibles para realizarlos. A este respecto, recientemente se ha comenzado a implementar la denominada “ciencia ciudadana”. Esta actividad implica que el público en general y científicos colaboren para realizar investigaciones. En los proyectos de ciencia ciudadana, los ciudadanos participan activamente en la investigación y se ha comprobado que su participación permite recolectar grandes cantidades de datos y reducir significativamente los costos asociados (Vohland, 2021).

Las áreas urbanas están creciendo aceleradamente, por lo que es crucial encontrar formas de proteger la biodiversidad que aún conservan. Para lograr esto, el primer paso es identificar las especies presentes en dichas áreas. En este sentido, la ciencia ciudadana ha probado ser una herramienta muy útil, sobre todo para obtener listados de aves en ambientes urbanos (McCaffrey 2005). Es así, que en este estudio utilizamos ciencia ciudadana para hacer un listado preliminar de las aves presentes en un conjunto urbano del municipio de Calimaya, Estado de México. Además, se ha observado que participar en proyectos de ciencia ciudadana tiene beneficios emocionales y de bienestar (White *et al.* 2023), por lo que quisimos conocer la percepción de los ciudadanos que participaron en nuestro estudio con respecto a dichos beneficios.

Metodología

Área de estudio

El municipio de Calimaya, Estado de México, forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca. La vegetación en esta área incluye bosque de pino (*Pinus*), bosque de oyamel (*Abies*), bosque de oyamel-pino (*Abies-Pinus*), bosque de pino-encino (*Pinus-Quercus*), bosque de encino (*Quercus*), bosque de aile (*Alnus*) y pastizal. El clima es templado lluvioso, con lluvias en verano (Ayuntamiento de Calimaya, 2022). El conjunto Urbano “Villas del Campo” (VDC) (19.17, -99.61) está localizado en el municipio de Calimaya y tiene una superficie de aproximadamente 150 ha donde se encuentran residencias, vialidades y áreas verdes (Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Gobierno del Estado de México, 2022).

Listado de aves y evaluación de bienestar en asistentes al curso

Durante el mes de julio 2023, realizamos un recorrido preliminar dentro de VDC, a fin de identificar los sitios óptimos para avistamiento de aves, así como las especies comunes que se podrían observar durante subsecuentes cursos de identificación. Además, complementamos esta información con datos del repositorio eBird (*ebird.org*).

Posteriormente, durante agosto y septiembre de 2023 (temporada reproductiva de las aves residentes), se invitó al público en general a tres cursos de identificación de aves dentro del conjunto VDC. Al principio de cada curso, a los asistentes les prestamos binoculares y planillas laminadas con imágenes, nombre científico y nombre común de las aves que podrían observarse en VDC. Se les solicitó que, en las planillas, marcaran las especies de aves que se fueran observando.

Posteriormente, se hizo un recorrido de 2 km con duración aproximada de dos horas (7:30 a 9:30) durante el cual, tres biólogos con experiencia en ornitología señalaban las especies de ave que se observaban y daban información acerca de la ecología de las mismas. A la par, se invitó a los asistentes a realizar observaciones en un telescopio (SV28 5-75x70). Al finalizar cada curso, entregamos diplomas de participación e hicimos preguntas acerca de las aves observadas para que los participantes pudieran obtener premios. Además, registramos las especies observadas durante el recorrido en una base de datos.

Finalmente, enviamos un cuestionario en línea a los participantes, para evaluar la aceptación del curso, conocer su impacto en el estado de ánimo de los asistentes y obtener sugerencias para mejorar futuros cursos. Las preguntas específicas fueron:

1. ¿Cómo calificarías el curso en escala de 1 a 10?
2. ¿Consideras que en el curso aprendiste algo nuevo acerca de las aves? (sí/no)
3. ¿Si se diera la oportunidad, ¿que tan probable sería que tomaras otro curso? (poco/medianamente/muy probable)
4. Durante el curso, consideras que tu estado de ánimo... (mejoró/ni mejoró ni empeoró/ empeoró)
5. ¿Tienes alguna sugerencia para mejorar próximos cursos?

Resultados y Discusión

La biodiversidad en zonas urbanas se ha vuelto un campo de estudio importante en ecología y conservación, debido a las profundas transformaciones que ha experimentado el entorno natural. Como resultado de los recorridos realizados, identificamos 24 especies de aves,

pertenecientes a 23 géneros, 14 familias y 4 órdenes taxonómicos (Tabla 1); de las especies identificadas, 23 eran residentes (Berlanga *et al.*, 2015). Como registros interesantes, observamos leucismo (i.e. alteración de coloración) en un Rascador Viejita (*Melozone fusca*) y la presencia de la especie invasiva Paloma de collar Turca (*Streptopelia decaocto*) (Figura 1), que a decir de los participantes, es de reciente aparición en la zona (estiman dos a cinco años).

Tabla 1: Listado de aves observadas en el conjunto urbano Villas del Campo

| Orden | Familia | Género | Especie | Nombre común |
|---------------|--------------|--------------|------------------------------|------------------------|
| Apodiformes | Trochilidae | Cynanthus | <i>Cynanthus latirostris</i> | Colibrí pico ancho |
| Apodiformes | Trochilidae | Eugenes | <i>Eugenes fulgens</i> | Colibrí magnífico |
| Columbiformes | Columbidae | Columba | <i>Columba livia</i> | Paloma doméstica |
| Columbiformes | Columbidae | Columbina | <i>Columbina inca</i> | Tortolita cola larga |
| Columbiformes | Columbidae | Streptopelia | <i>Streptopelia decaocto</i> | Paloma de collar turca |
| Columbiformes | Columbidae | Zenaida | <i>Zenaida macroura</i> | Huilota común |
| Passeriformes | Fringillidae | Haemorhous | <i>Haemorhous mexicanus</i> | Pinzón mexicano |
| Passeriformes | Fringillidae | Spinus | <i>Spinus psaltria</i> | Jilgerito dominico |
| Passeriformes | Hirundinidae | Hirundo | <i>Hirundo rustica</i> | Golondrina tijereta |
| Passeriformes | Icteridae | Molothrus | <i>Molothrus aeneus</i> | Tordo ojos rojos |
| Passeriformes | Mimidae | Toxostoma | <i>Toxostoma curvirostre</i> | Cuicacoche pico curvo |

| | | | | |
|----------------|----------------|--------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Passeriformes | Parulidae | Cardellina | <i>Cardellina pusilla</i> | Chipe corona negra |
| Passeriformes | Parulidae | Geothlypis | <i>Geothlypis trichas</i> | Mascarita común |
| Passeriformes | Passerellidae | Melospiza | <i>Melospiza melodia</i> | Gorrión cantor |
| Passeriformes | Passerellidae | Melozona | <i>Melozona fusca</i> | Rascador Viejita |
| Passeriformes | Passeridae | Passer | <i>Passer domesticus</i> | Gorrión doméstico |
| Passeriformes | Ptiliognatidae | Ptiliognys | <i>Ptiliognys cinereus</i> | Capulinerero gris |
| Passeriformes | Thraupidae | Diglossa | <i>Diglossa baritula</i> | Picochueco vientre canela |
| Passeriformes | Troglodytidae | Thryomanes | <i>Thryomanes bewickii</i> | Saltapared cola larga |
| Passeriformes | Turdidae | Turdus | <i>Turdus migratorius</i> | Mirlo primavera |
| Passeriformes | Tyrannidae | Empidonax | <i>Empidonax fulvifrons</i> | Papamoscas pecho canela |
| Passeriformes | Tyrannidae | Empidonax | <i>Empidonax occidentalis</i> | Papamoscas amarillo baranqueño |
| Passeriformes | Tyrannidae | Pyrocephalus | <i>Pyrocephalus rubinus</i> | Papamoscas cardenalito |
| Pelecaniformes | Ardeidae | Bubulcus | <i>Bubulcus ibis</i> | Garza ganadera |



a



b

Figura 1: a) Paloma de collar turca (*Streptopelia decaocto*); b) Leucismo dorsal en Rascador viejita (*Melospiza fusca*) (fotografías © Cyril Nycz).

Por otro lado, la urbanización tiene efectos variados en la riqueza de especies. Aunque en general se observa una disminución en la riqueza y abundancia de las mismas, algunos grupos de aves pueden responder de manera diferente (Ordóñez-Delgado *et al.*, 2022). Esto sucedió en el conjunto VDC, donde hubo mayor abundancia en las aves insectívoras y omnívoras que el resto de gremios.

Sin embargo, es muy importante estudiar la diversidad de aves en áreas urbanas ya que así se pueden implementar acciones de manejo que integren ambientes alterados en la conservación de la biodiversidad (Blasio-Quintana y Pineda-López, 2020). En este sentido, recalamos la importancia de la ciencia ciudadana, que en este estudio nos permitió generar un listado preliminar de las aves en el conjunto urbano VDC, observar leucismo en la especie *M. fusca*, así como detectar la presencia de la especie *S. decaocto*, lo que coincide con numerosos estudios que han demostrado la utilidad de la ciencia ciudadana para la detección temprana de especies invasivas (Encarnação *et al.*, 2021). Estas observaciones, refuerzan la utilidad de la ciencia ciudadana como herramienta para profundizar en la ecología y amenazas a las aves en ecosistemas urbanos.

En los cursos participaron 24 personas en total, de las cuales, 17 respondieron el cuestionario (*i.e.* 70%). En cuanto a sugerencias para mejorar los cursos, los participantes mencionaron el incrementar el número de binoculares disponibles para repartir entre los asistentes, profundizar la explicación en cuanto a la dieta de las aves observadas, realizar cursos específicamente para niños y realizar cursos en ecosistemas silvestres. La calificación promedio que

otorgaron al curso fue 9.7/10. El 100% de los participantes consideró que el curso le enseñó algo nuevo acerca de las aves; 82% tomaría otro curso si tuviera la oportunidad y 94% reportó una mejora en su estado de ánimo al participar en el curso.

Las respuestas al cuestionario coinciden con lo reportado por diversos autores en cuanto a que la observación de aves promueve el bienestar emocional de los participantes, además de interesar al público en general en la biodiversidad de su entorno (White *et al.* 2023). En soporte a lo anterior, varios de los asistentes a los cursos continúan participando activamente en el canal de comunicación que establecimos para la logística de los cursos (*i.e.* grupo de whatsapp), donde comparten fotografías de aves que han observado recientemente en el conjunto (J. Guerrero, comunicación personal, 12 de octubre de 2023). Esto resalta la necesidad de mantener áreas verdes dentro de zonas urbanas, a fin de que los habitantes interactúen con la biodiversidad y se interesen en su conservación. Del mismo modo, resaltamos la importancia de continuar realizando actividades colaborativas entre público en general y científicos.

Agradecimientos

Agradecemos al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por la beca postdoctoral otorgada a JG, a los participantes en los cursos: Y. Flores, J.A. Guerrero, M. Guerrero, J. Guerrero, M.F. Sautri, R. Hernández, J. Castro, E. Bolaños, P. Ottalengo, J. Medina, O. Ontiveros, C. Pinzón, R. Vuistiner, M. Núñez, D. Moyers, A. Martínez, R. I. Ciéneaga, W. Nycz, M. Gutaj, C. Nycz, L. Nycz, D. Uri, M. Coria y B. Rayas. Agradecemos también a los revisores por sus valiosas

aportaciones y tiempo dedicado a nuestro manuscrito.

Literatura citada

- [1] Ayuntamiento de Calimaya. 2022. *Plan de Desarrollo Municipal 2022-2024*. Ayuntamiento de Calimaya. Marzo 2022. Calimaya, Estado de México.
- [2] Berlanga, H., Silva, H., Vargas-Canales, V.M., Rodríguez-Contreras, V., Sánchez-González, L., y Ortega-Álvarez, R., *Aves de México: lista actualizada de especies y nombres comunes*, CONABIO, Ciudad de México, México, 2015.
- [3] Blasio-Quintana, C. y Pineda-López, R., Diversidad de aves en ambientes antrópicos en una localidad del semidesierto del centro de México, *Huitzil Revista Mexicana de Ornitología*, 21:2-572, 2020.
- [4] Encarnação, J., Teodósio M.A. y Morais, P., Citizen Science and Biological Invasions: A Review, *Frontiers in Environmental Science*, 8:602980, 2021.
- [5] McCaffrey, R. E., Using citizen science in urban bird studies, *Urban habitats*, 3:70-86, 2005.
- [6] Ordóñez-Delgado, L., Iñiguez-Armijos, C., Diaz, M., Escudero, A., Gosselin, E. N., Waits, L. P., y Espinosa, C. I., The Good, the Bad, and the ugly of urbanization: Response of a bird community in the neotropical Andes, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10, 2022.
- [7] Ortega-Álvarez, R., L.A. Sánchez-González y H. Berlanga-García (eds.). *Plumas de multitudes, integración comunitaria en el estudio y monitoreo de aves en México*, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, 2015, 174 pp.
- [8] Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Gobierno del Estado de México. 2022. *Acta de entrega – Recepción de las obras de urbanización del conjunto urbano “Villas del Campo”*. Metepec: Secretaría de Desarrollo Urbano y Obra del Gobierno del Estado de México.
- [9] Vohland, K., Land-Zandstra, A., Ceccaroni, L., Lemmens, R., Perelló, J., Ponti, M., Samson, R. y Wagenknecht, K. The science of citizen science, Springer Nature, Nueva York, 2021, pp.13-21.
- [10] White, M. E., I. Hamlin, C. W. Butler y M. Richardson., The Joy of birds: the effect of rating for joy or counting garden bird species on wellbeing, anxiety, and nature connection, *Urban Ecosystems*, 26:755-765, 2023.

Lecturas recomendadas

- [1] Hedblom, M., Knez, I., y Gunnarsson, B., Bird Diversity Improves the Well-Being of City Residents. In: Murgui, E., Hedblom, M. (eds) *Ecology and Conservation of Birds in Urban Environments*. Springer, Nueva York, 2017, pp. 287-306.
- [2] McKinney, M. L. Effects of Urbanization on Species Richness: A review of Plants and animals. *Urban Ecosystems*, 11[2], pp.161-176, 2008.

El nombre de mi hermano

Dr. Carlos Escobar

Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa
Departamento de Física

El nombre de mi hermano

Si nos detenemos a pensar un poco, todos los nombres tienen un significado y, en muchas ocasiones, representan algo especial para aquellas personas que los otorgan. Simbolizan desde un simple homenaje a un ser querido hasta un deseo futuro para la vida de quien lo recibe.

la primera vez que reflexioné sobre esta situación. No fue por casualidad, ni por iluminación espiritual, fue algo más mundano, tan simple como un fin de semana con la familia en el parque, donde una tía, refiriéndose a mi hermano, preguntó: “¿y por qué lo llamaron así?”. Fue ahí que mi padre, de manera pasiva, como si de un evento importante se tratase, contestó “por Adrien Maurice, un físico que vivió hace tiempo”. En aquel instante, en aquel lugar, en la mente de un niño de unos 10 años, el nombre de mi hermano, Adrián Mauricio, comenzó a cobrar sentido y, con un sentimiento de haber adquirido un mayor conocimiento, creí haber entendido algo más de la vida, aún cuando aquel personaje, Adrien Maurice,

no me decía nada en lo absoluto.

Muchos años después, por unos vaivenes de la vida misma, decidí estudiar física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Durante todo ese tiempo, en los libros y en las clases, uno lee y escucha el nombre de Dirac y, sin prestar mucha atención, uno advierte que dicho personaje fue alguien notable en la historia de la física. Si uno se adentra más en su vida, tratando de saciar esa curiosidad innata que tenemos y que despiertan esos personajes destacados en la humanidad, encontraremos que Dirac estuvo presente en el mítico quinto congreso de Solvay en 1927, en Bruselas Bélgica, donde 19 de los 27 asistentes que participaron eran, o llegarían a ser, Premios Nobel. La historia misma nos demanda el preguntarnos: ¿Qué tan sobresaliente debe ser uno para que tu nombre no se opaque entre los otros asistentes, cuyos nombres eran nada menos que los de Albert Einstein, Niels Bohr, Max Planck, Marie Curie, Werner Heisenberg, Wolfgang Pauli o Erwin Schrödinger? La respuesta es simple, basta ser tan sobresaliente como Dirac.

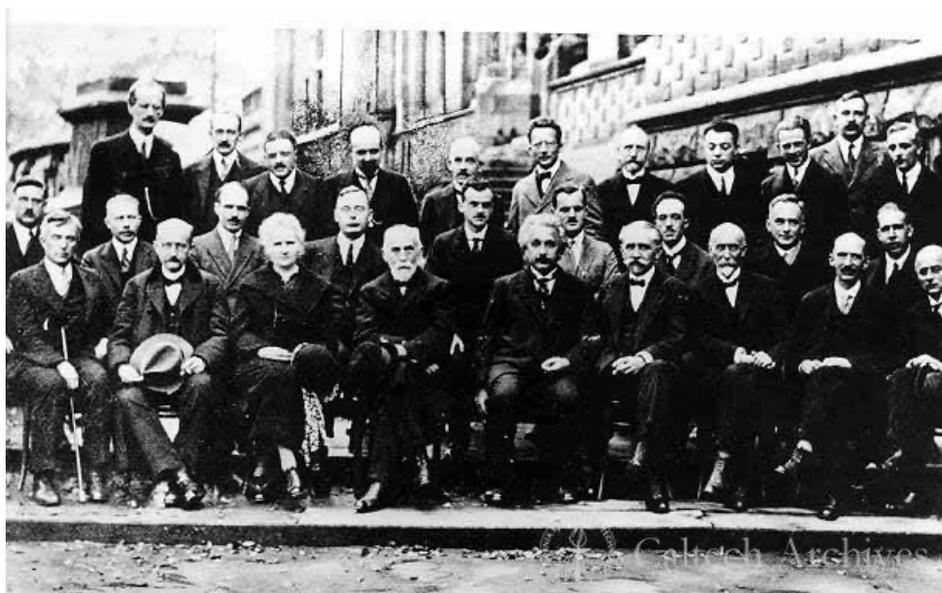


Figura 1: (Photo: Courtesy of Caltech Photo Archives)

A lo largo de su vida Dirac hizo sobresalientes aportes a la física, en particular a la siempre misteriosa mecánica cuántica y a una extensión de esta, la cual es llamada electrodinámica cuántica. Esta última teoría describe los fenómenos físicos que ocurren a pequeñas escalas entre partículas cargadas, tales como el electrón. Entre todas las increíbles contribuciones que nacieron de la mente de Dirac, la más conocida es la ecuación que lleva su nombre: la ecuación de Dirac. Dicha ecuación, aunque es de carácter científico, podemos decir que es arte, dado que nos revela de una manera extremadamente simple y hermosa el comportamiento de la naturaleza misma. Específicamente, fusiona dos pilares de la física, la mecánica cuántica y la relatividad especial. En palabras rimbombantes, esta ecuación nos describe la dinámica de las partículas con espín 1/2 cuando se mueven a velocidades comparables a la velocidad de la luz. A su vez, es uno de los ejemplos más notables de los triunfos de la física teórica, ya que logró predecir, antes de llevarse a cabo el experimento, la existencia de las antipartículas. Por primera vez, se revelaría una simetría del universo nunca antes vista ni imaginada, que nos dice que por cada partícula conocida existe su gemela con carga opuesta, es decir, su antipartícula. La teoría misma predice que cuando dichas partículas se encuentran, como si de su destino se tratase, se aniquilarán para convertirse en energía en forma de luz (fotones).



Figura 2: (Photo from Wikimedia Commons)

Otra de las obras maestras del prodigioso Dirac fue la llamada estadística Fermi-Dirac, desarrollada en aquellos nostálgicos años de 1926, donde con gran ingenio describió el comportamiento de las partículas con espín $1/2$, y que a rasgos generales nos dice cómo estas partículas pueden agruparse. Esto fue un parteaguas para abrir nuevos horizontes a la Física, abriéndose puertas hacia el estudio de los materiales y la hasta ese entonces desconocida superconductividad.

Una anécdota que es inasequible pasar por alto cuando de Dirac se habla, es aquella donde Richard Feynman, otro de los genios que ha dado la humanidad, se encontró con él en un congreso en Warsaw en el año de 1962. Para tener un poco de perspectiva, Feynman fue premio Nobel en Física en 1965, precisamente por sus contribuciones en la electrodinámica cuántica. En específico, desarrolló los diagramas de Feynman, que son gráficas que sirven como herramientas para el cálculo perturbativo en los procesos de colisión entre partículas (secciones eficaces). Algo peculiar de este personaje era su gran carisma y la extensa profundidad con la cual entendía las cosas, esto a tal grado de poder explicar complejos conceptos como la temperatura a través de lo que ocurre con los átomos en una simple taza de café.

Se cuenta que en aquella conferencia,

donde Dirac ya era un hombre de edad y una eminencia en la Física, Feynman se acercaría a él a presentarse, extendiendo su mano y diciendo “Yo soy Feynman”, a lo que Dirac correspondería con el saludo y diciendo “Yo soy Dirac”. El relativamente joven y entusiasta Feynman, como si se tratase de haber conocido a uno de sus ídolos de infancia, le comentaría: “Tiene que sentirse muy satisfecho por haber encontrado su ecuación”, a lo que Dirac secamente respondería: “pero de eso ya hace mucho tiempo!!”. Para continuar con la conversación, Dirac preguntó: ¿Y usted en qué está trabajando ahora?, seguido de la respuesta de Feynman: “en teorías sobre el mesón”. Dirac, muy ávido se apresuraría a preguntar: ¿Trata usted de encontrar una ecuación similar?, a lo cual Feynman respondería: “Eso sería muy difícil...”. Dirac finalizaría la conversación con la frase: “Pero uno debe de tratar de hacerlo...”.

Regresando a esos días en los que estudiaba en la Facultad de Ciencias, no recuerdo el día exacto, pero sí muy bien el sentimiento, cuando me encontraba tranquilamente leyendo un texto de electrodinámica en la biblioteca y, como usualmente acontecía, apareció el nombre de Dirac. Mi lectura hubiese continuado de manera cotidiana, excepto que un detalle capturó mi atención, como si me llamase a detenerme. El nombre de Dirac aparecía junto a sus iniciales P. A. M. Dirac.



Figura 3: (Marek Holzman's famous photograph of Dirac and Feynman (Photo: Courtesy of Caltech Photo Archives))

Es extraño cómo funciona el cerebro, la sinapsis que posibilita la conexión entre nuestras neuronas y que, de alguna manera, logremos conectar un hecho con otro que al parecer no tiene relación. Pero así, ese día sucedió, por un momento tuve la sensación de que el silencio en la biblioteca se hizo más profundo, como si todos los presentes en la sala, a quienes no conocía, estuvieran expectantes a una revelación. Volví a ver las iniciales A. M. una vez más, y trataba de no pensar en ello, justo como en aquellos instantes cuando nos negamos a que las coincidencias, el azar o la suerte se nos presenten. A. M., A. M., resonaba en mi cabeza. En aquellos tiempos sin internet solo había una manera de corroborar lo que parecía era evidente. Así que me incorporé para ir a los estantes de libros, y ahí estaban, tan quietos como los libros saben estar en una biblioteca silenciosa, a la espera de que alguien se acercase a tomar uno de ellos. Así emprendí la empresa de revisar libro a libro donde pudiese estar el nombre completo de Dirac. Tomé el primero, nada, un segundo libro, tampoco, y así sucesivamente, hasta que por fin apareció al tomar uno muy pequeño. Al hojearlo pude leer, conscientemente, por primera vez Paul Adrien Maurice Dirac. La revelación había sido cumplida. Fue como esos triunfos que uno vive solo, que son para uno y solo para uno. No de aquellos de los que producen euforia y ganas de gritar, sino de aquellos que dan paz y

tranquilidad. Y como si alguien me lo preguntase en ese instante, no podía dejar de contestarme a mí mismo: "vaya nombre el que le puso mi padre a mi hermano".

Recordando aquel día de mi infancia en el parque, donde el sol brillaba como cada día, donde se preguntó por los

significados de varios de los nombres de los presentes, me viene a la mente cuando fue mi turno y una de mis tías preguntó: "¿y a él, por qué le pusieron Carlos?", a lo que mi padre contestó con una expresión de felicidad: "por su tío, mi hermano menor, quien, por cierto, fue un relojero, un muy buen relojero...".

Hoy, el Dr. Adrián Mauricio Escobar Ruiz es profesor asociado en el Departamento de física de la UAM-I. Quien escribe estas líneas, su hermano, también forma parte del mismo departamento como profesor curricular.



**¿Cómo puede la ganadería
contribuir a reducir la
problemática ambiental del
planeta?**

Dr. Hernán Celaya Michel

Departamento de Agricultura y Ganadería,
Universidad de Sonora

**Dra. Susana Marlene Barrales
Heredia**

Departamento de Agricultura y Ganadería,
Universidad de Sonora

Dra. Ana Laura Bautista Olivas

Departamento de Agricultura y Ganadería,
Universidad de Sonora

Biól. Maryela Celaya Rosas

Ecology & Evolutionary Biology, University of
Arizona

Abstract

Humanity today lives in what has been called a “perfect storm”, formed by land degradation, global climate change and population growth. It is called that way because they feed off each other, magnifying the global environmental problem. Livestock farming has been identified as one of the largest sources of greenhouse gas emissions, as a contributor to land degradation and global climate change. In the first link of beef production, which is the production of offspring on cattle ranches, the unsustainable use of grazing has caused land degradation, in some cases. When this is of a very large magnitude in terms of recovery time and economic resources necessary to recover livestock ecosystems, it is called desertification. Here we present some sustainable alternatives for the beef production livestock sector, which can contribute to reducing the planet’s environmental problems, based on the theory of functional connectivity of the landscape and multi-year monitoring of areas with management to recover degraded ecosystems.

Keywords: global climate change; population growth; desertification; sustainability.

Resumen

La humanidad vive hoy en día en lo que se le ha denominado “tormenta perfecta”, formada de la degradación de terrenos, cambio climático global y el crecimiento poblacional. Es llamada de esa forma, por retroalimentarse entre sí, magnificando el problema ambiental mundial. La ganadería ha sido señalada como una de las mayores responsables en emisiones de gases de efecto invernadero, como contribuyente a la degradación de terrenos y al cambio climático global. En el primer

eslabón de la producción de carne de res, que viene siendo la producción de crías en ranchos ganaderos, el uso no sustentable del pastoreo ha ocasionado degradación de terrenos, en algunos casos. Cuando esto es de una magnitud muy grande en términos de tiempo de recuperación y de recursos económicos necesarios para recuperar los ecosistemas ganaderos, se le llama desertificación. Aquí presentamos algunas alternativas sustentables para el sector ganadero de producción de carne de res, y que pueden contribuir a reducir la problemática ambiental del planeta, basándonos en la teoría de conectividad funcional del paisaje y seguimientos de varios años de áreas con manejos para recuperar ecosistemas degradados áridos.

Palabras clave: cambio climático global; crecimiento poblacional; desertificación; sustentabilidad.

Introducción

La ganadería es una de las actividades productivas más antiguas de la humanidad, inició con la domesticación de especies, donde, a partir de su crianza se pudo realizar una explotación y obtener animales de carga y productos como carne, leche, huevo, pieles, entre otros.

En México, la ganadería data de aproximadamente 500 años, desde la llegada de los colonizadores europeos, quienes trajeron animales domésticos como vacas, cerdos, caballos, borregos y cabras. En estos años la población de animales domésticos creció exponencialmente.

El ganado bovino es una de las especies domésticas más utilizadas para producción animal, en el pasado todo su ciclo productivo se llevaba a

cabo de manera “extensiva”, en ranchos donde las vacas únicamente consumían las plantas que ahí crecían. Desde hace aproximadamente 100 años ya se reportaba en Norteamérica el deterioro de la cubierta de plantas del suelo de los ranchos ganaderos, producto de una sobre explotación del pastoreo (Chapin *et al.*, 2002).

A pesar de que se empezaron a desarrollar estrategias para tratar de mitigar el impacto del sobre pastoreo en los ranchos, esta tendencia no ha logrado revertirse por completo. Se continúan viendo indicadores de degradación (MEA, 2005), como son el incremento del suelo desnudo y el cambio de especies forrajeras que el ganado consume, por otras especies que al ganado no le gusta consumir.

Problemática ambiental mundial

Actualmente se tiene una crisis ambiental mundial, con varios aspectos que se retroalimentan, haciendo muy difícil su solución. Estos elementos son el cambio climático global, la desertificación y el crecimiento poblacional. Lo anterior ha sido llamado “la tormenta perfecta” por la retroalimentación que conlleva: más población y más recursos necesarios, ocasionan más desertificación y más emisiones de gases generando un mayor cambio climático (U.N.C.C.D. 1994).

El cambio climático global es resultado de un incremento en los gases, que tienen un efecto invernadero para la tierra. Sin este sistema “invernadero” no hubiera sido posible la vida tal cual como existe hoy, porque permite tener temperaturas estables. Sin embargo, desde la Revolución Industrial la emisión de gases, producto de la quema de combustibles fósiles, liberó entre otros, dióxido de carbono en grandes

cantidades, contribuyendo a este efecto de aumento de la temperatura del planeta Tierra (Chapin *et al.*, 2002).

No ha sido posible convencer a todas las naciones del planeta, de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Por lo cual continua una tendencia de incremento en las emisiones de gases y en las proyecciones de incremento de temperatura para los siguientes años. Siendo las principales actividades que emiten gases de efecto invernadero en México: Transporte 26%, Generación de energía 19%, Industria 17%, Petróleo y gas 12% y Ganadería 10% (INECC, 2015).

Es indispensable que los principales generadores de gases contaminantes contribuyan en la reducción de sus emisiones, para buscar disminuir el efecto sobre el calentamiento del planeta. Debido a que el incremento en la temperatura del planeta, pronostica eventos adversos cada vez más frecuentes como son: tormentas intensas, sequías, e incluso disminución en los rendimientos de los cultivos agrícolas tradicionales. Viéndose reflejado en el planeta como desertificación, la cual es la pérdida del potencial productivo biológico de los ecosistemas del planeta, como resultado de la sobre utilización de recursos naturales, en combinación con eventos de disturbio por actividades humanas (desmontes, incendios, sobrepastoreo, etc.), así como de fenómenos naturales (sequía, incendios, etc.).

Generalmente la degradación de terrenos y posterior desertificación, ocurre donde las precipitaciones son muy bajas, porque en los lugares que las precipitaciones superan las condiciones semiáridas, favorecen que se recuperen mejor los ecosistemas y no caigan en

el deterioro a largo plazo denominado desertificación.

No existe una medición unificada del grado de desertificación en el planeta Tierra, sin embargo, la Organización de las Naciones Unidas, ha coincidido en que la problemática se ha agravado cada vez más desde hace varias décadas.

Por otra parte, el **crecimiento poblacional** continúa en el planeta, esto es relevante porque a mayor población, mayores necesidades de bienes y servicios; por ejemplo, la necesidad alimentaria se satisface con la obtención de alimentos de las mismas tierras agrícolas, de los mismos terrenos ganaderos.

Actualmente se estima que la humanidad, necesitaría 1.75 planetas, para satisfacer sus demandas de recursos naturales. Esto complica el uso sustentable de los mismos y presiona a los terrenos a la degradación y posterior desertificación.

Sistema de producción de carne de res

Durante siglos, la carne de res se producía únicamente en los ranchos, y de ahí salían los animales para ser sacrificados en el rastro, para la producción de carne. A esa carne se le llamaba “carne de campo”.

La necesidad de más alimentos de origen animal llevó a la humanidad a incursionar en la siembra de forrajes en los ranchos ganaderos, mediante el desmonte y siembra de especies exóticas de zacate, para tener más alimento disponible para el ganado. Posteriormente para producir carne en menos tiempo, hace menos de cien años, se incluyeron alimentos

balanceados con un mayor contenido nutricional, en base a granos cultivados de cereales, mezclados con pastas proteicas, minerales, vitaminas, y otros ingredientes para maximizar el desempeño animal, llamándole a este sistema “corral de engorda”.

Conectividad funcional y degradación de ecosistemas áridos

Okin (*et al.*, 2009) propone un marco teórico para explicar la degradación de zonas áridas, mediante el incremento de la conectividad funcional. Se tomó el caso del noroeste ganadero de México, para tratar de relacionarlo a esta teoría. Basado en la conectividad funcional del paisaje, con los cambios que ocurren al pasar de un matorral a un pastizal, mediante el desmonte y siembra de un zacate exótico como el buffel, en el noroeste de México, cambian algunas interacciones y funcionamiento del ecosistema (Brenner, 2011; Figura 1).

La pérdida de biodiversidad por el desmonte, y la reducción en la cobertura de plantas con el paso de los años, producto de sequías y sobrepastoreo, deja al ecosistema más vulnerable. En el suelo se tiene un efecto de pérdida de nutrientes, al tener menos plantas y raíces que retengan agua y elementos minerales, resultando en un empobreciendo gradual del suelo, y degradación del terreno. Por lo contrario, el sistema original de matorral biodiverso, cuenta con retroalimentaciones positivas, tiene zonas contrastantes como islas de fertilidad, que aportan hojarasca y nutrientes estacionalmente, y zonas de zacates y herbáceas anuales, reduciendo la erosión y facilitando el establecimiento de diversas plantas futuras.

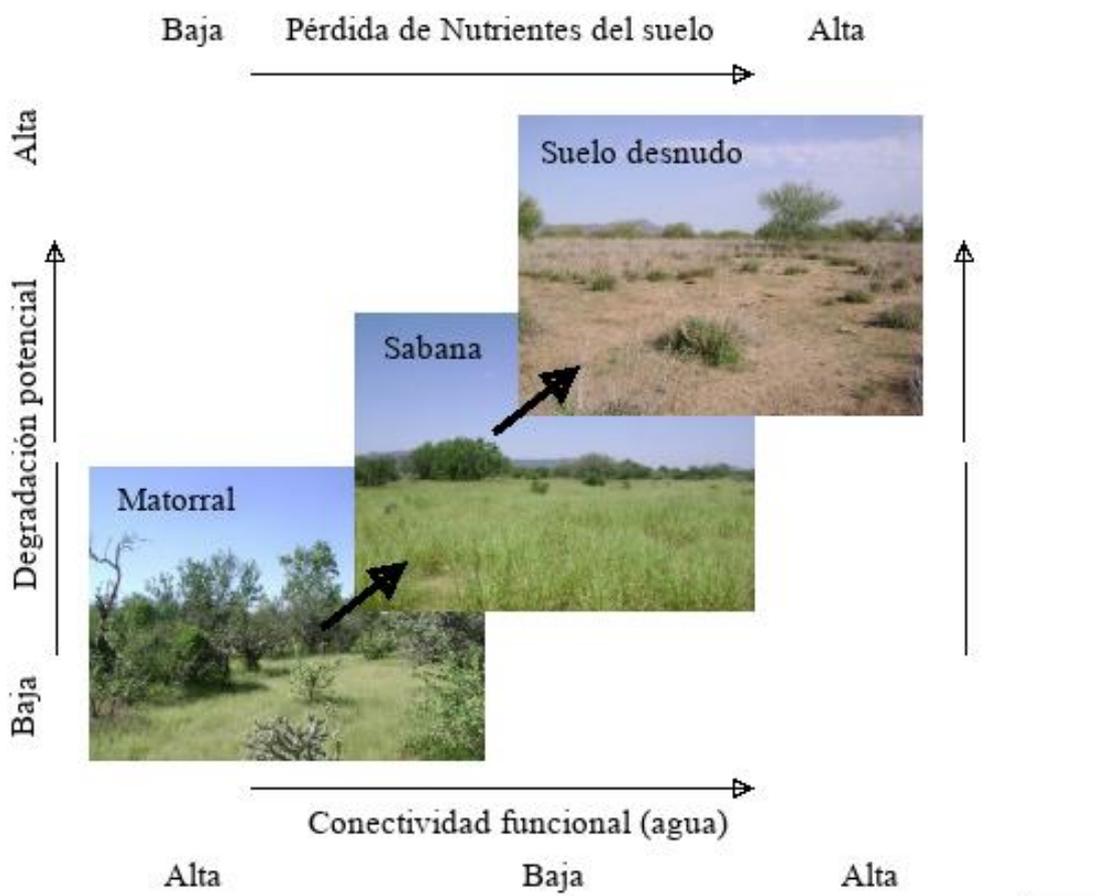


Figura 1: Diagrama de las etapas de degradación de un matorral de la región central de Sonora, convertido a sabana de zacate buffel (Celaya, 2015).

En el ecosistema modificado, el incremento de áreas con suelo desnudo aumenta la conectividad funcional que favorece la erosión, reduciendo la infiltración de agua y afectando la disponibilidad de este recurso vital en el ecosistema, resultando en degradación del terreno que cuando es muy severa recibe el nombre de desertificación.

y finalización en corrales de engorda con alimentación balanceada, ha recibido duras críticas sobre su impacto ambiental, por causar desertificación en algunos ranchos con el sobrepastoreo, y por competir con el ser humano, con la producción de tierras agrícolas de granos de maíz y pastas proteicas para alimentar animales.

Cambios en la dinámica de la humedad del suelo pueden ser clave en la conservación de ecosistemas sanos para evitar la degradación. Un terreno sano oferta servicios que proveen sus ecosistemas (Dregne y Chou, 1992).

La mayoría de la población ha escuchado recomendaciones que dicen que, si “se reduce el consumo de carne de res”, se contribuye en la reducción de las emisiones de metano de los bovinos y la desertificación. Lo anterior puede ser cierto, si se hace una ganadería no sustentable. Entonces, para responder la pregunta planteada inicialmente: ¿Cómo puede la ganadería contribuir a la

¿Cómo cambiar la degradación por la conservación de ecosistemas?
La producción de crías en el rancho,

problemática ambiental del planeta?, se tiene que cambiar el sistema productivo de carne de res y que la conectividad funcional sea “positiva” de suelo con plantas, mantillo, hojarasca en vez de “negativa” con suelos desnudos.

En primer lugar, se debe mantener los ecosistemas de los ranchos ganaderos sanos, conservando la biodiversidad, incrementando la cobertura de plantas del suelo y su productividad. Lo cual va a permitir “inyectar” más raíces al suelo, con la consiguiente captura de carbono que eso conlleva.

Como la actividad de pastoreo de ganado, es la principal que se lleva a cabo en la superficie terrestre, en cuanto a superficie de uso de suelo, un incremento en la producción de raíces y captura de carbono pudiera ser importante para tratar de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero tratando de beneficiar la magnitud del cambio climático global.

En una investigación a largo plazo que aun continua, se tomó un área de suelo degradado del Departamento de agricultura y ganadería de la

Universidad de Sonora, en Hermosillo, Sonora, México (Figura 2). En esta área se realizaron varias prácticas como: exclusión del pastoreo y acomodo de material vegetal muerto en el centro de un parche grande de suelo desnudo. Adicionalmente se trasplantaron algunos árboles y arbustos nativos de la región.

Lo que se observo fue un incremento, con el paso de los años, de la cobertura del suelo, tanto por mantillo orgánico de plantas anuales muertas, como un incremento de especies perenes de zacates, arbustos y árboles. Estos cambios iniciaron de manera modesta al primer año, y llegaron a cubrir todo el suelo a los siete años.

Lo anterior llevó a una reducción de la conectividad funcional del suelo desnudo, limitando la erosión y aumentando la infiltración de agua en el suelo.

Se pasó de un círculo “vicioso o negativo”, a un círculo “virtuoso o positivo”, y la salud del ecosistema mejoró notablemente año con año.



Figura 2: Secuencia de imágenes de área degradada y su proceso de recuperación, al inicio del seguimiento en 2015, al aplicar material vegetal en 2015, en verano de 2016, 2018 y 2022.

Entonces, a nivel rancho ganadero, se tiene que hacer un manejo que, en vez de degradar el terreno, lo regenere. Conociendo las plantas nativas de la región y haciendo prácticas para multiplicarlas en el terreno.

Otorgando un descanso suficiente al terreno y un pastoreo intenso pero breve en el tiempo, esto puede lograr una significativa mejoría ambiental del ecosistema. Recuperar terrenos de ranchos ganaderos y revertir

la desertificación, con un impacto posterior en el cambio climático, estaría aportando una mejora en dos de los tres principales problemas de la humanidad, al principio mencionados como “la tormenta perfecta”.

México es descrito como “mega diverso”, por la gran biodiversidad de seres vivos que tiene nuestro país. Es tarea de todos conservar este capital natural, porque es un elemento muy importante para tener ecosistemas funcionales, resistentes y

que pueden soportar mejor los disturbios tanto naturales como los causados por actividades humanas (Elmqvist *et al.*, 2003).

Conclusiones

Los terrenos de uso ganadero mediante pastoreos breves y periodos de descanso largos, tendrían una conectividad funcional de suelos con mantillo, para capturar más carbono. Conservar la biodiversidad y los ecosistemas saludables es una alternativa que tiene la humanidad, para revertir la problemática ambiental actual. Ecosistemas sanos con más captura de carbono pueden contribuir a reducir el cambio climático global. La solución de esta “tormenta perfecta” de crecimiento poblacional, desertificación y cambio climático global, está en un uso sustentable de los recursos naturales.

Referencias

- [1] Brenner, J. C., Pasture conversion, private ranchers, and the invasive exotic buffelgrass (*Pennisetum ciliare*) in Mexico's Sonoran Desert, *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 101[1], pp.84–106, 2011.
- [2] Celaya-Michel, H. Impactos del cambio en el uso del suelo en la disponibilidad de recursos y funcionamiento de ecosistemas en la Región Central de Sonora, y su relación con los procesos de desertificación [Tesis de doctoral]. Universidad de Sonora. 2015.
- [3] Chapin, F.S., Matson P.A. y Mooney H.A., *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, Springer. pp.202-211, 2002.
- [4] Elmqvist, T., Folke, C., Nyström, M., Peterson, G., Bengtsson, J., Walker, B. y Norberg, J., Response diversity, ecosystem change, and resilience, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1[9], pp.488-494, 2003.
- [5] Dregne, H. E. y Chou, N. T., Global desertification dimensions and costs. *Degradation and restoration of arid lands*, pp.73-92, 1992.
- [6] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). *Primer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. INECC/Semarnat, México. 2015.
- [7] Millennium Ecosystem Assessment (MEA), *Ecosystems and Human Well-Being: Desertification Synthesis*, World Resource Institute, pp. 137, 2005
- [8] Okin, G. S., Parsons, A. J., Wainwright, J., Herrick, J. E., Bestelmeyer, B. T., Peters, D. C., y Fredrickson, E. L., Do changes in connectivity explain desertification?, *BioScience*, 59[3], pp.237-244, 2009.
- [9] U.N.C.C.D., *Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa*, A. AC, pp.241, 270, 1994.

Detrás de los camarones de tu coctel



Biól. Jocelyn Saharaim Corzas Cruz
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste
(CIBNOR).

Abstract

Since ancient times, humans have engaged in various activities to meet the food demands of their populations and fisheries have prevailed in our daily lives at the present day. Among the methods of shrimp production in Mexico are fishing and aquaculture; however, fishing has various questionable impacts that remain controversial. This article reflects on the implications of shrimp consumption and shrimp fisheries in Mexico, their collateral effects (both social and environmental), and some actions that are being taken to reduce them.

Keywords: shrimp, bycatch, fishery impacts

Palabras clave: Camarón, captura incidental, impactos de la pesquería

La pesca y los recursos pesqueros

Desde tiempos prehistóricos los seres humanos han practicado tres actividades predominantes para satisfacer la demanda alimentaria de sus poblaciones: la recolección, la caza y la pesca, y ésta última prevalece en la actualidad, aunque de forma más refinada y en diferentes escalas (Acuña, 1986; Cervantes e Higuera, 2019, FAO, 2022).

La pesca aprovecha la cantidad, la calidad y la riqueza de los recursos pesqueros o ‘especies hidrobiológicas’, que son organismos que llevan a cabo su ciclo de vida en cuerpos de agua dulce o marina, y se destaca a los de alto valor económico, social y ecológico, tales como atún, sardina, anchoveta, langosta, pulpo y el camarón (Figura 1) (Acuña, 1986; FAO, 2022).



Figura 1: Camarón (Crédito de imagen: Fernando Andrade).

¿Qué es un camarón?

Un camarón es un crustáceo peneído (organismo invertebrado de diez patas) que es extraído para su aprovechamiento según la etapa de vida en la que se encuentre, ya sea en estuarios, lagunas o bahías en su forma juvenil, o en mar abierto en el estado adulto. El ciclo de vida del camarón comienza en mar abierto, donde posterior a la cópula de los organismos adultos, los huevos fecundados son expulsados y se asientan en el fondo marino;

posterior a la eclosión continúan su desarrollo en 11 estadios planctónicos (cinco 'nauplios', tres 'potozoea' y tres 'mysis') hasta convertirse en 'postlarva'. Cuando alcanza la etapa postlarvaria, el camarón migra hacia bahías, estuarios o lagunas para residir ahí durante su estado juvenil, y al concluirlo, migra de regreso a mar abierto, donde alcanza el estado adulto, se reproduce y el ciclo inicia otra vez (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012; Cervellini y Pierini, 2021).

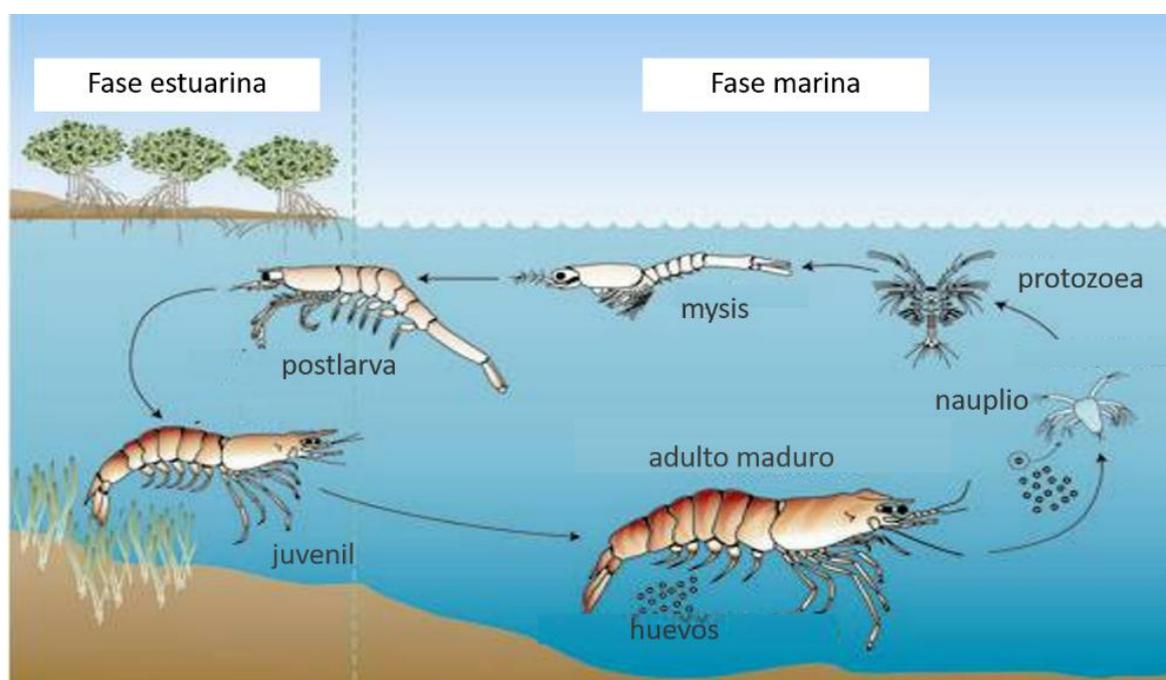


Figura 2: Ciclo de vida del camarón (CSIROPEDIA, 2011).

Existen diferentes especies de camarón tanto a nivel mundial como nacional, en cada cuerpo de agua y dentro de estos mismos, y se atribuye principalmente a la variabilidad ambiental, a los diferentes fenómenos en distintas escalas de tiempo, y a los tipos de ecosistemas (aunado a la ubicación geográfica). Se les puede encontrar a diferentes profundidades, habitando tanto la zona demersal (cerca de los fondos marinos) como en la zona béntica (fondos marinos), aunque las especies comerciales usualmente se encuentran

en ésta última. Cada especie cuenta con distintas características, sin embargo, la coloración permite diferenciar a algunas a simple vista, por ejemplo: un rosado de uno café, o uno blanco de un azul (Figura 3). Y pese a que los camarones de coloración rosada son los que normalmente se asocian a diferentes platillos, como cocteles o caldos, no es el único que se pesca para consumo humano (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA 2016; FAO, 2022).



Camarón rosado (*Penaeus duorarum*)
Fuente de la imagen: Sea Life Base



Camarón café (*Penaeus californiensis*)
Fuente de la imagen: Global Aliment Inc.



Camarón blanco (*Penaeus vannamei*)
Fuente de la imagen: Santamaría et al., 2018



Camarón azul (*Penaeus stylirostris*)
Fuente de la imagen: Santamaría et al., 2018

Figura 3: Algunas variedades de camarón.

La pesca del camarón

Para que se pueda llevar a cabo la extracción del camarón y así aprovecharlo, se toman en consideración distintos aspectos, los cuales, teóricamente, pueden diferenciarse entre los que se realizan previo a la temporada de pesca y los que se realizan durante la pesca del camarón.

Previo a la pesca: se precisa qué especie(s) de camarón se extraerá(n) y se ubican(n) geográficamente, basándose en principalmente en informes institucionales; se definen y obtienen los medios de producción (embarcaciones, artes de pesca, equipos, entre otros), y de ser necesario, se contrata y capacita a trabajadores, además de realizar los trámites y permisos correspondientes ante las instituciones, a la vez que se espera el aviso oficial de la fecha de apertura para la temporada de pesca. Una vez ubicados en los cuerpos de agua, se procede a la captura de organismos mediante diferentes artes de pesca,

separando y seleccionando únicamente a los camarones, para después disponerlos en refrigeradores o hieleras (depende del tamaño de la embarcación) para preservar la calidad del producto hasta su desembarque en puerto y posterior comercialización (Villaseñor Talavera, 2012; DOF, 2013).

Diferenciación entre la pesca ribereña e industrial

Como se mencionó anteriormente, hay una diferencia entre el tamaño de las embarcaciones y el tipo de captura. Las embarcaciones menores o 'pangas' son generalmente utilizadas por pescadores ribereños, que extraen camarones en estado juvenil; por otra parte, las embarcaciones mayores (o industriales) se enfocan en la extracción de camarones en estado adulto en grandes cantidades (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; DOF, 2013). Lo que respecta a la pesca ribereña del camarón, suele realizarse en cuerpos de agua laguneros-estuarinos, en bahías

y zonas costeras de baja profundidad, para la que se usan embarcaciones menores construidas con fibra de vidrio y equipadas con un motor fuera de la borda (Figura 4). Las ‘artes de pesca’ (o técnicas de captura) varían, entre las

que se incluyen atarrayas (red circular), chinchorros de línea (red de enmalle de forma rectangular) y redes de arrastre (red en forma de bolsa cónica) (DOF, 2013; INAPESCA, 2016; FAO, 2022).



Figura 4: Embarcaciones menores en San Carlos, Guaymas, Sonora (2022).

Por otra parte, la pesca industrial se realiza en mar abierto, aproximadamente entre los 14 y 91 metros de profundidad en embarcaciones mayores (>15 m de eslora o longitud), que usan generalmente un sistema doble de captura, es decir, a cada lado de la embarcación se coloca una red de arrastre, y mientras la embarcación avanza de forma paralela a la costa, las redes filtran agua y capturan todo lo que quede a su paso (Figura 5) (DOF, 2013; Villaseñor Talavera, 2012).

Captura de camarón en México

El origen de la pesca comercial de camarón en México se remonta a 1921 en el Alto Golfo de California (en ‘la axila de México’; Figura 5). Debido a la disponibilidad de altas cantidades de camarón en esta zona norte del Golfo

de California, el recurso comenzó a ser extraído inicialmente por embarcaciones originarias de Guaymas, Sonora. Para mediados de la década de los años 30, esta pesquería se industrializó, y desde 1992 se realiza en diferentes zonas y por embarcaciones de diferente origen, aunque bajo un esquema de permisos y reglamentos con la finalidad de no sobreexplotar el recurso. (Cudney-Bueno y Turk-Boyer, 1998; López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012).

En la actualidad, la pesca del camarón se encuentra regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-002-SAG/PESC-2013, con el propósito de que el aprovechamiento del camarón se realice de forma ordenada en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos: Océano

Pacífico y Mar Caribe (mares abiertos); (mares semicerrados) (Figura 6). (DOF, Golfo de California y Golfo de México 2013; INAPESCA 2012, 2016).

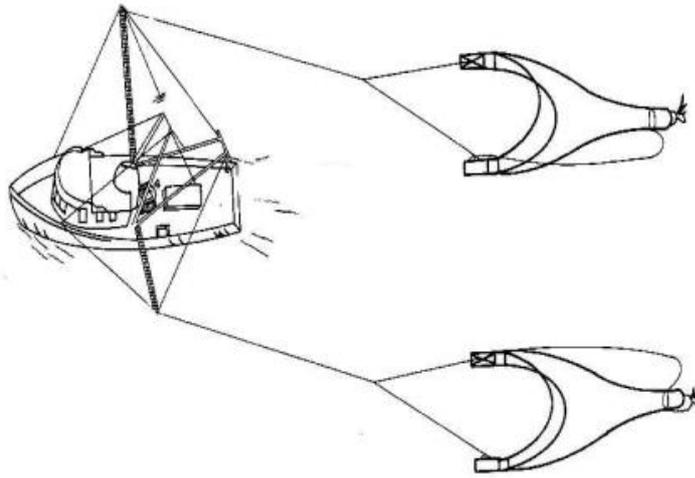


Figura 5: Esquema del sistema de operación de doble aparejo. Fuente de la imagen: Catálogo de los Sistemas de Captura de las Principales Pesquerías Comerciales (Espino-Barr, 2008, p.3).

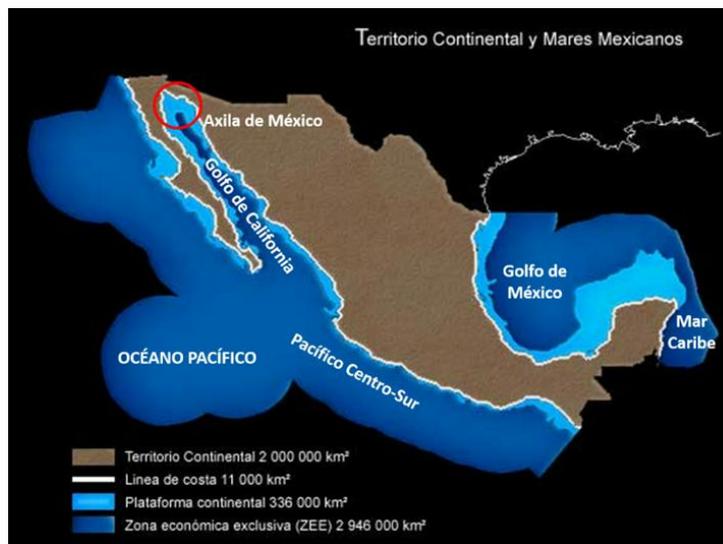


Figura 6: Territorio continental y mares mexicanos (modificada; fuente de la imagen original: Teorema Ambiental, 2018).

De estos cuerpos de agua destaca el Golfo de California, tanto por la cantidad como por la diversidad de las especies de camarón de interés comercial que pueden ser extraídas (Tabla 1), confirmándose en el Anuario

Estadístico de Acuicultura y Pesca, donde se observa que los estados que se mantuvieron como líderes nacionales en producción de camarón hasta 2021 fueron Sinaloa, Sonora y Nayarit.

Tabla 1: Especies de camarón capturadas en el Océano Pacífico y el Golfo de California (CNP, 2018; CONAPESCA, 2021)

| Nombre científico actualmente aceptado | Nombre común |
|---|-----------------------------------|
| <i>Penaeus californiensis</i> | Camarón café |
| <i>Penaeus vannamei</i> | Camarón blanco |
| <i>Penaeus occidentalis</i> | Camarón blanco del sur |
| <i>Penaeus stylirostris</i> | Camarón azul |
| <i>Penaeus brevisrostris</i> | Camarón cristal |
| <i>Pleoticus robustus</i> | Camarón rojo real |
| <i>Rimapenaeus faoe</i> | Camarón cebra |
| <i>Rimapenaeus pacificus</i> | Botalón del Pacífico |
| <i>Sicyonia disdorsalis</i> | Camarón de roca |
| <i>Sicyonia penicillata</i> | Camarón de roca |
| <i>Xiphopenaeus riveti</i> | Camarón siete barbas del Pacífico |

Entre estos tres estados y Tamaulipas abarcaron el 91.8% de la producción de camarón (peso vivo) en México en 2021, aunque cabe mencionar que, Tamaulipas realiza la actividad extractiva del camarón en aguas de jurisdicción nacional del Golfo de México, sitio en el que también existe ordenamiento sobre las especies que pueden ser extraídas, sin embargo, se distingue por albergar al característico camarón rosado (*Penaeus duorarum*).

Esto se ve respaldado por la serie

histórica de producción de camarón en peso vivo de CONAPESCA, en la que en el periodo 2012-2021, la cifra más alta de captura en mar abierto se registró en 2015, que equivalió a 52 412 toneladas (t) del total de la producción anual (212 684 t).

Cabe mencionar que, la captura de camarón en esteros, lagunas y bahías no se quedó atrás, la cifra más alta se registró en 2017 con 45 044 t del total de la producción anual (227 929 t).

Es así que la pesquería del camarón en México ocupa el primer lugar por su valor económico, y el segundo lugar como la más importante en términos de captura, satisfaciendo la demanda nacional y, a su vez, teniendo una dirección de mercado en el extranjero, cuyos principales destinos de exportación son: Estados Unidos de América, China y Japón (López-Martínez *et al.*, 2012; CNP, 2018; CONAPESCA, 2021).

Costes que derivan de la pesca de camarón

Se considera que México es un país privilegiado tanto por la diversidad y abundancia de sus recursos, como por los bienes y servicios que estos proveen, no obstante, al extraer a los organismos de los ecosistemas naturales para cualquier fin se generan diferentes costes, destacando los de tipo económicos y ambientales, que no siempre son perceptibles en el corto plazo, y a los que la pesca del camarón no está exenta (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; CONAPESCA, 2021).

Costes socioeconómicos

Además de satisfacer la demanda alimentaria, la pesca del camarón también es fuente de ingresos, empleo y comercio, sin embargo, los grandes volúmenes de captura no pueden traducirse en bienestar económico o desarrollo social (FAO, 2022). De acuerdo con la Auditoría Pesquera 2.0 de OCEANA realizada en 2021, los apoyos gubernamentales de tipo financieros, humanos y de atención en el país, suelen dirigirse a las pesquerías que reportan mayores volúmenes de captura (incluida la del camarón), destacando a las de tipo industrial por sus contribuciones anuales en México, relegando a los pescadores ribereños y artesanales que también contribuyen, aunque en

proporciones menores.

No obstante, de acuerdo a entrevistas realizadas en mayo de 2022 en Sonora por estudiantes del CIBNOR, las percepciones expresadas desde la experiencia de algunos actores del sector pesquero, tanto industriales como ribereños, concuerdan y, a su vez, distan de lo reportado en la auditoría:

Por una parte, desde la percepción industrial se reconoce que el volumen de captura es un factor determinante para aspirar a los apoyos gubernamentales, sin embargo, esto no asegura la asignación de los mismos, puntualizando que las limitantes a las que se enfrentan son de otro tipo, entre las que destacaron: la prontitud con la que lanzan las convocatorias y en contraparte, los largos tiempos que tardan en dar una resolución a las solicitudes. Esto dirige a una competencia por estímulos económicos y por áreas de extracción entre pesquerías consolidadas nacionales, que conocen la actividad y el ciclo de vida del recurso, y pesquerías internacionales, no consolidadas o informales que muchas veces desconocen (o ignoran conscientemente) los aspectos anteriores, desencadenando la sobreexplotación y, en consecuencia, que exista baja disponibilidad del recurso para las siguientes temporadas de pesca.

Respecto a la percepción ribereña, muchos desconocen las fechas en que son lanzadas las convocatorias, y cuando logran acceder en tiempo a una de ellas, perciben los requisitos como 'inalcanzables' al encontrarse con que sus cifras de captura no son lo suficientemente altas. Y en una especie de ciclo sin fin, sin permisos (y otro tipo de apoyos) no pueden realizar la actividad pesquera e incluso, se les

llega a decomisar las pangas a falta de estos, teniendo como consecuencia que ni siquiera puedan aportar las cantidades mínimas necesarias para que se les tome en consideración en la siguiente convocatoria o temporada de pesca. Aunque las perspectivas industriales y ribereñas podrían parecer incompatibles, concuerdan de forma paralela en distintos aspectos y resaltan que, muchas veces los tomadores de decisiones le dan mayor peso al cumplimiento de requisitos burocráticos, dejando de lado las necesidades y capacidades del sector pesquero y sus comunidades, tendiendo a fallar al asignar los diferentes tipos de apoyos.

Costes ambientales

Derivado de la toma de decisiones sobre la pesca del camarón (ya sea industrial o ribereña), nos encontramos con los costes ambientales, de los cuáles, los que han sido puntualizados con mayor frecuencia son: la degradación de los ecosistemas y la sobreexplotación de las especies (Villaseñor-Talavera, 2012; Buhl-Mortensen y Buhl-Morthensen, 2018).

Dentro de la degradación de los ecosistemas están: el desecho, abandono y la 'pérdida' de instrumentos de pesca en altamar (*e.g.*, motores de pangas y redes) que se convierten en basura marina, y que generan daños físicos y pesca fantasma* hacia otras especies (*e.g.*, tiburones, delfines, tortugas, lobos y vaquitas marinas) aún tiempo después de la temporada en que se hizo uso de los instrumentos. (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012; DOF, 2013; FAO, 2022).

Aunado a la generación y desecho de basura marina, se encuentra el impacto de la pesca industrial, en la que, al remolcar las redes de arrastre

se remueven los fondos blandos y sustratos rocosos que quedan a su paso, provocando la modificación de zonas que funcionan como áreas de alimentación, reproducción, refugio y crianza de diferentes especies, conduciendo de esta mane a impactos y cambios conformacionales en las poblaciones y tramas tróficas de mayor complejidad (Guzmán-Amaya y Fuentes-Castellano, 2006; López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; DOF, 2013; INAPESCA, 2012).

Adicionalmente, estas redes no sólo son responsables de retener materia inerte (sustratos) y capturar grandes cantidades de camarón, también capturan organismos que no son el objetivo de la pesca, a los que se les denomina 'Fauna de Acompañamiento' o 'Fauna de Acompañamiento del Camarón' (que también se abrevia como FAC).

La fauna de acompañamiento del camarón está compuesta en su mayoría por peces y en menor porcentaje tortugas (entre otros vertebrados) y una amplia diversidad de organismos invertebrados, tales como cangrejos, calamares, caracoles, pulpos, esponjas, estrellas de mar, etc. (Figura 7) (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012)

En la actualidad las redes de arrastre deben contar con diferentes modificaciones que permitan (además de optimizar la captura del camarón) reducir el impacto hacia las especies no objetivo (FAC), entre las que se incluyen los 'dispositivos excluidores' (*e.g.*, excluidores de peces y tortugas), los cuales funcionan como ventanas de escape para dichos organismos (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012; DOF, 2013; DOF, 2018)



Figura 7: Organismos incidentales de la pesca del camarón (Crédito de imagen: Zafer Kizilkaya).

*Pesca fantasma: captura incontrolada de organismos mediante redes u otros instrumentos de pesca abandonados o extraviados (intencionada o inintencionadamente).

Esta captura de organismos suele representarse mediante la relación camarón:FAC, y la más alta se ha registrado para el Pacífico Mexicano (en el que se incluye el Golfo de California) la proporción reconocida y redondeada es de 1:10 kg, es decir, que por cada kilogramo de camarón se capturan 10 kg de organismos no objetivo (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012). Pese a que los estudios respecto a las proporciones capturadas de camarón y fauna de acompañamiento son variables (tanto por zonas como por estaciones), se destacan los siguientes países y las siguientes cifras, donde se presentan, tanto proporciones de

captura más altas como más bajas en comparación con las reportadas para el Pacífico Mexicano. Entre las más altas se encuentran: India (1:15) e Indonesia (1:14); y en contraparte, las cifras más bajas se registraron en países como Australia (1:0.1), Madagascar (1:0.28) y Surinam (1:0.4) (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; Banks, R. y Macfadyen, G., 2011; Villaseñor-Talavera, 2012).

¿Qué sucede con la fauna de acompañamiento del camarón?

En México gran parte de la fauna de acompañamiento del camarón resulta en descartes, es decir, los organismos que no son camarón se regresan al

mar ya sea vivos (aunque en estado decadente) o muertos (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012) Las mayores tasas de descartes registradas a nivel nacional corresponden a 175 798 t en el Pacífico y 19 000 t en el Golfo de México; es notable destacar que en aguas del Golfo de México que no son de jurisdicción nacional, la pesquería del camarón de Estados Unidos descartó 480 000 t de organismos no objetivo, distinguiéndose por ser la tasa de descarte más alta a nivel mundial hasta el trabajo de López-Martínez y Morales-Bojórquez (2012).

El posible aprovechamiento de los descartes en la pesca del camarón

El descarte como efecto colateral de la pesca del camarón ha sido puesto a debate ante las altas cifras de captura, y para contrarrestarlas, se ha propuesto en diversas ocasiones el aprovechamiento de la fauna de acompañamiento del camarón, sin embargo, su adopción y desarrollo no es tan simple (López-Martínez y Morales-Bojórquez 2012; FAO 2022).

Como punto de partida se tiene una alta cantidad de biomasa aunado a la diversidad de especies y tallas; esto puede interpretarse en que, las toneladas de la fauna de acompañamiento no pueden ser aprovechadas porque se conforma de diferentes especies con diferentes tamaños (a veces demasiado pequeños), y debido a que muchas de ellas no han sido estudiadas a profundidad como para determinar su posible potencial de aprovechamiento, ya sea para consumo humano o de otro tipo (e.g., pienso animal, ornamental, farmacológico, etc.), los pescadores priorizan el espacio de sus embarcaciones, bodegas, congeladores y hieleras para el recurso objetivo (el camarón) por su certeza

de dirección comercial en el mercado. (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012, Villaseñor-Talavera, 2012, FAO, 2022, Corzas-Cruz, 2024).

Algunos de los organismos de la fauna de acompañamiento del camarón que han sido aprovechados por los pescadores y sus familias, ya sea para autoconsumo o para la venta local se encuentran: peces (e.g., diferentes variedades de mojarra, jurel pardo, cochito, pargo, etc.), crustáceos (e.g., jaiba, especies comerciales y no comerciales de otros camarones, cangrejos) y moluscos (e.g., caracoles, mejillones, calamares y pulpos) que han sido referidos como recursos nutritivos y saludables, contribuyendo de forma indirecta a la seguridad alimentaria en el país (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012; Villaseñor-Talavera, 2012, Corzas-Cruz, 2024).

Aunque pareciera que existe apertura para que se le dé continuidad al aprovechamiento expuesto anteriormente, la falta de investigación sobre la fauna de acompañamiento del camarón y sus distintos o potenciales aprovechamientos, aunado a la escasa iniciativa sobre la ejecución de estos proyectos por parte de organismos gubernamentales (entre otros factores) frenan su implementación a escalas mayores (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; Corzas-Cruz, 2024).

Limitantes sobre la adopción de prácticas de aprovechamiento de la FAC

Entre las limitantes sobre el aprovechamiento de la FAC, una ha sido referida con frecuencia tanto por estudiosos como por los propios pescadores, y se dirige hacia el falto

de atención que se presta a las actualizaciones y modificaciones a la Carta Nacional Pesquera (nueve entre 2000 y 2023), el cual, pese a ser un documento de carácter informativo, funciona como base y guía para los actores del sector pesquero, ya que incluye generalidades y particularidades sobre los principales recursos pesqueros marinos y de aguas continentales, incluido el camarón. Los aspectos que se incluyen van desde los nombres de las pesquerías, descripción de la zona de pesca y la unidad de pesca; hasta efectos ambientales y cambio climático, normatividad e instrumentos de política, entre otros (DOF, 2013; Corzas-Cruz, 2024).

Es por esto que se ha hecho énfasis en que el documento sea actualizado anualmente, ya que, la disponibilidad y abundancia de los recursos varía entre especies y en cada temporada de pesca, especialmente cuando se suscitan eventos climáticos como los de El Niño y La Niña. Por otra parte, también se ha propuesto que se plasme en esta misma carta información sobre la fauna de acompañamiento, de manera que sea accesible y entendible para todo el público, a la vez que sienta las bases para el posible aprovechamiento durante la temporada de pesca del camarón, o para que de apertura a la posibilidad de extraer alguna de las especies de la FAC en la época de veda (temporada en la que no se pesca camarón) (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; Corzas-Cruz, 2024).

Camarón japonés: caso de aprovechamiento de la FAC

Un caso particular en relación a la pesca del camarón y la FAC en México es el del camarón japonés (también conocido como camarón roca

o cacahuete; Figura 8), el cual solía ser componente de la FAC hasta hace unos años, es decir, no era una especie objetivo en la pesca. Sin embargo, entre 1994 y 1997 se capturaron grandes volúmenes de esta especie como FAC en Bahía Kino, Sonora, por lo que se iniciaron estudios en torno a aspectos biológicos y pesqueros que pudieran indicar su viabilidad como especie potencial de aprovechamiento en la región, entre los que se destacan: la investigación de los periodos reproductivos, las tallas de maduración y la abundancia. Pese a que los resultados demostraron que es una especie con potencial para desarrollar una pesquería en torno a ella, los investigadores hicieron recomendaciones adicionales para que esta propuesta pudiera consolidarse, entre ellas, la realización de estudios en periodos de tiempo más largos para conocer mejor a la población, y exploraciones en cruceros de investigación con la finalidad de registrar la biomasa, y la distribución espacial y temporal de la especie; actualmente, el camarón japonés ya es una especie objetivo en aguas del Océano Pacífico y Golfo de California según la NOM-002-SAG/PESC-2013 (López-Martínez *et al.*, 2002; DOF, 2013).

Este ejemplo del camarón japonés funciona para exponer que las propuestas por actores del sector pesquero e investigadores tienen espacio y posibilidad de ejecutarse con éxito. Cabe mencionar que, estas peticiones pueden ser abordadas desde investigaciones que ya han sido realizadas en diferentes instituciones, basta con echar un vistazo a los estudios disponibles en el repositorio institucional del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, especialmente aquellos realizados por la



Figura 8: Ejemplar de camarón japonés, formalmente conocido como *Sicyonia penicillata* (Crédito de imagen: Alex Bairstow).

academia de Ecología Pesquera, en los que se destacan estudios en torno la pesquería del camarón y la FAC, que van desde la identificación y reportes de las especies que componen la FAC, hasta otros más puntuales que reportan abundancia y recurrencia de la ictiofauna, crustáceos y malacofauna de la FAC en el Golfo de California (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; Corzas-Cruz, 2024).

Es así que, para que el aprovechamiento de la FAC sea una realidad funcional en la pesquería del camarón, las acciones de emprendimiento tienen que tomarse desde una perspectiva multidisciplinaria, y trabajarse de forma integrativa y constante a través de redes de apoyo sólidas que involucren a diferentes sectores de la población,

es decir: la inclusión de la sociedad como base estratégica a través de la escucha de sus necesidades alimenticias, laborales y económicas; la continuidad y mejora en las prácticas de los actores del sector pesqueros en la extracción del camarón en función de su ciclo de vida, y considerando los impactos de la actividad en el ambiente; la colaboración y comunicación estrecha entre técnicos y científicos, tanto con pescadores como con autoridades y tomadores de decisiones; inclusión en la red para comerciantes, transportistas, e incluso personal de plantas de procesamiento (dependiendo del uso que se le proyecte a la FAC) (López-Martínez y Morales-Bojórquez, 2012; INAPESCA, 2012; Villaseñor-Talavera, 2012, Corzas-Cruz, 2024).

Lo expresado anteriormente no pretende ser absoluto ni tomar una postura sobre las formas en que se proceda a abordar las diferentes problemáticas y su resolución, sino presentar un panorama general de la situación a través de información que proviene de la consulta literaria y la escucha activa de actores del sector pesquero.

Acciones paralelas para hacer frente a los efectos colaterales

Además de la iniciativa y desarrollo de investigaciones y proyectos en torno a la pesquería del camarón, la sociedad también puede ser partícipe con acciones paralelas que contribuyan a la mitigación de los efectos colaterales de dicha pesquería, entre ellas:

- Comprender la diferencia entre el periodo de pesca y el periodo de veda. El primero se define como la época del año en la que es legal pescar camarón, y la de veda es aquella en la que no se pesca camarón, esto con la finalidad de respetar el ciclo de vida del recurso, de manera que pueda desarrollarse y reproducirse, dando pie a que en la siguiente temporada existan altas cantidades de camarón disponibles.

- Respetar las épocas de veda, es decir, no consumir camarón durante la época en que no es legal la pesca.

- Apoyar los productos de origen nacional y que se alineen con nuestras preferencias de consumo, por ejemplo: adquirir productos de pesquerías que cumplan con la normatividad y realicen prácticas sostenibles.

- Conocer los trabajos resultantes de los cruceros de investigación. Los cruceros de investigación se llevan a cabo durante la época de veda en diferentes zonas con la finalidad de

estudiar a la población de camarón en dichas áreas. Después de una serie de observaciones, notas y cálculos, se estima la cantidad de camarón disponible y se determina si cuentan con el tamaño que establece la ley para ser extraídos. Estos datos y otros más, (como las variables ambientales) son tomados en cuenta para proponer y asignar la fecha en que se dará apertura a la temporada de pesca.

- ¿Cómo saber cuándo es temporada de pesca de camarón? En México, tanto la fecha de apertura de temporada de pesca como la de veda se da a conocer en el Diario Oficial de la Federación, después de que las instituciones nacionales (CONAPESCA e INAPESCA) llegan a un acuerdo tras los estudios y observaciones realizadas de la población del camarón. Cabe mencionar que las fechas de pesca y veda son diferentes en cada mar mexicano.

- Conocer e involucrarse en proyectos independientes y de asociaciones civiles que busquen disminuir los efectos de la pesca en mares mexicanos, y se ponen como ejemplo los siguientes: 1) Reciclaje de herramientas y motores encontrados en altamar; esta práctica es realizada por diferentes pesquerías y pescadores, entre ellos la Pesquera Montero (Mazatlán, Sinaloa, 2021) y pescadores de embarcaciones menores en Sonora (2022). 2) Proyectos de rescate y conservación de especies, e.g., la asociación 'Rescate de Lobos Marinos', que, como su nombre lo indica: "rescatan lobos marinos heridos por restos de redes o basura marina"; 3) Limpieza de playas, ya sea de forma individual o colectiva, y se cita como ejemplo a la organización Azul Centeo, que también realiza programas de educación ambiental, y divulgación de la ciencia mediante conferencias, charlas y publicaciones

activas en redes sociales.

- En caso de que la pesca no sea una práctica que se alinee con el consumo particular, existe otra forma de producción de camarón con la que tal vez te sientas más cómodo al consumir camarones: la camaronicultura. Esta es una técnica de acuicultura (o acuicultura) que tiene como objetivo cultivar y producir camarones en estanques grandes o pequeños (en función de la especie y su demanda; el relieve y el tamaño del terreno), ya sea in

situ o en criaderos en zonas artificiales (Figura 9). Cabe mencionar que, aunque esta forma de producción también tiene prácticas y consecuencias que pueden ser puestas a debate (e.g., escape de especies cultivadas, contaminación de cuerpos de agua por uso de antibióticos para el tratamiento de enfermedades de los organismos, pérdida de los hábitats donde se instauran los criaderos, etc.), esta es una forma de producción controlada que aporta la mayor cantidad de camarón en peso vivo en México (CONAPESCA, 2021).



Figura 9: Estanques acuícolas (Secretaría de Agricultura y Desarrollo, 2019).

A estas alturas del texto es prudente decir que, para la conservación de nuestros océanos, y por ende, la de sus recursos, se requiere la suma de esfuerzos que resulten en un beneficio colectivo. Acercarnos a profesionales y a conocedores de la actividad, resulta esencial para que puedan orientarnos sobre nuestro consumo y de esta manera, poder transformarlo en uno más responsable y consciente.

Bonus

¿Sabías que el 10 de mayo se celebra el ‘Día Mundial del Camarón’?

Referencias

- [1] Acuña, E. *La pesca en Chile*. Escuela de Ciencias del Mar, Valparaíso, Chile, 1986, p. 320.
- [2] Banks, R. y Macfadyen, G. *Sustainability. A Blueprint for moving toward sustainable*

- tropical shrimp trawl fisheries*. Poseidon Aquatic Resource Management Ltd, WWF, 2011. Disponible en: https://wwf.panda.org/wwf_news/?201770/A-Blueprint-for-moving-toward-sustainable-tropical-shrimp-trawl-fisheries
- [3] Buhl-Mortensen, P. y Buhl-Mortensen, L. Impacts of bottom trawling and litter on the seabed in Norwegian waters. *Frontiers in Marine Science*, 5, pp. 1–9, 2018.
- [4] CONAPESCA. *Anuario Estadístico de Acuacultura y Pesca 2021*. Comisión Nacional de Acuacultura y Pesca, Mazatlán, Sinaloa, México, 2021.
- [5] Corzas-Cruz, J. S. *Moluscos bentónicos como fauna de acompañamiento del camarón en el Golfo de California* (Tesis de Maestría). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, La Paz, Baja California Sur, México, 2024.
- [6] Cudney-Bueno, R. y Turk-Boyer, P. J. *Pescando entre mareas del Alto Golfo de California. Una guía sobre la pesca artesanal, su gente y sus propuestas de manejo*. CEDO INTERCULTURAL, Puerto Peñasco, Sonora, México, 1998. Disponible en: <https://docplayer.es/40757438-Pescando-entre-mareas-del-alto-golfo-de-california.html>
- [7] DOF, Diario Oficial de la Federación. *Carta Nacional Pesquera. México. 2018*. Disponible en: <https://www.gob.mx/inapesca/documentos/carta-nacional-pesquera-2017>.
- [8] DOF, Diario Oficial de la Federación *Norma Oficial Mexicana NOM-002-SAG/PESC-2013, para ordenar el aprovechamiento de las especies de camarón en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos. México, 2013*. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5306294&fecha=11/07/2013#gsc.tab=0
- [9] FAO. *El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2022. Hacia la transformación azul*. FAO, Roma, Italia, 2022. Disponible en: <https://www.fao.org/documents/card/es/c/cc0461es>
- [10] Guzmán-Amaya, P. y Fuentes-Castellanos, D. *Pesca, acuicultura e investigación en México*. 1a ed. Comisión de Pesca, Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria, México, 2006.
- [11] INAPESCA. *Plan de manejo de la pesquería de camarón del Pacífico Mexicano*. SAGARPA-CONAPESCA, México, 2012. Disponible en: https://pescaendirecto.com/wp-content/uploads/2019/03/PM_Camaron-draft.pdf
- [12] López-Martínez, J., Arreguín-Sánchez, F., Nevárez-Martínez, M. O., Morales-Azpeitia, R., Chávez-Ortiz, E. A., y Alcántara-Razo, E. *Aspectos biológicos y pesqueros del camarón roca *Sicyonia penicillata* (Lockington, 1879) del golfo de California*. Universidad Autónoma de México, 2002.
- [13] López-Martínez, J. y Morales-Bojórquez, E. *Efectos de la pesca de arrastre en el Golfo de California*. Centro de Investigaciones Biológicas del

- Noroeste, S.C., Fundación Produce, Sonora, México, 2012.
- [14] Santamaría, J., Carbajal Enzian, P., y Clemente, S. *Guía ilustrada para reconocimiento de langostinos y otros crustáceos con valor comercial en el Perú*. IMARPE, Lima, Perú, 2018. Disponible en: <https://biblioimarpe.imarpe.gob.pe/bitstream/20.500.12958/3311/1/GUIA%20LANGOSTINOS%20y%20otros%20crustaceos.pdf>
- [15] Villaseñor-Talavera, R. *Pesca de camarón con sistema de arrastre y cambios tecnológicos implementados para mitigar sus efectos en el ecosistema*. En: *Efectos de la pesca de arrastre en el Golfo de California*. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. y Fundación Produce, Sonora, México, 2012, pp. 281-313.

**Selección de aceros para el
rediseño mediante mecánica
computacional de un
herramiental para doblar
tubos**

Dr. Javier Flores Méndez

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Tecnológico Nacional de México/I.T. Puebla

Dr. Gustavo M. Minquiz Xolo

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla
Tecnológico Nacional de México/I.T. Puebla

Dr. M. Claudia Denicia Carral

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Ana Luisa Ballinas Hernández

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Héctor Medina Cruz

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Dr. Manuel Aparicio Razo

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Abstract

In this work a methodology by using the computational finite element method of a tooling designed for the process tube bending in the automotive industry, in order to determine the magnitude and location of the geometric stress concentration is implemented. The tooling is modeled computationally with a steel degree AISI-D2 (current design) and subsequently with steel AISI-4140. Because the null information about the mechanical properties of these materials, the methodology for their determination is presented. The modeling and simulation with the steel AISI-D2 indicates a geometric location coincident of the stress concentration with the fracture zone when the tooling fails by operating, therefore, the magnitudes of the numerical results are considered reliable. Finally, modeling with the steel AISI-4140 proposes it as a viable alternative because not compromise the functioning of the system and also has a low cost and easy to manufacture.

Keywords: Finite Element Method, Mechanical Properties, Steel, Stress, Strain.

Resumen

En este trabajo se implementa una metodología por el método del elemento finito computacional a un herramental diseñado para el proceso de doblado de tubos en la industria automotriz, con la finalidad de determinar la magnitud y ubicación geométrica de la concentración de esfuerzos. El herramental se modela computacionalmente con un acero grado herramienta AISI-D2 (diseño actual) y posteriormente con uno AISI-4140. Es importante mencionar que, debido a la escasa información respecto a las propiedades mecánicas de estos materiales, se presenta también la

metodología para su determinación. El modelado y simulación con el acero AISI-D2 indica una ubicación geométrica de la concentración de esfuerzos coincidente con la zona de fractura cuando el herramental falla por su operación, por lo tanto, las magnitudes de los resultados numéricos se consideran confiables. Finalmente, el modelado con el acero AISI-4140 lo propone como una alternativa viable ya que no compromete el funcionamiento del sistema y además tiene un bajo costo y es de fácil manufactura.

Palabras clave: Método de Elemento Finito, Propiedades mecánicas, Acero, Esfuerzo, Deformación.

Introducción

En la actualidad las empresas del ramo automotriz cuentan con un área de doblado de tubos, dicha operación es realizada con equipos automatizados CNC, los cuales utilizan un herramental para el doblo de tubos y están manufacturados con acero tipo herramental AISI-D2 con un tratamiento térmico de nitruración al alto vacío, dando como resultado un incremento de la dureza superficial. El herramental o árbol de doblado de tubos que se analizará está sometido a diversas fuerzas en el proceso de operación, una de ellas es causada por la resistencia del tubo que se desea doblar y el acoplamiento que tiene el herramental en sus diversos niveles de doblado, lo anterior da como resultado un momento flector que actúa en la base del herramental (fig. 1); ahí mismo también interactúa una fuerza de rotación originada por la propia maquina dobladora durante el proceso de doblez del tubo, estas cargas son cíclicas y dan lugar a una falla por fatiga (fig. 2).

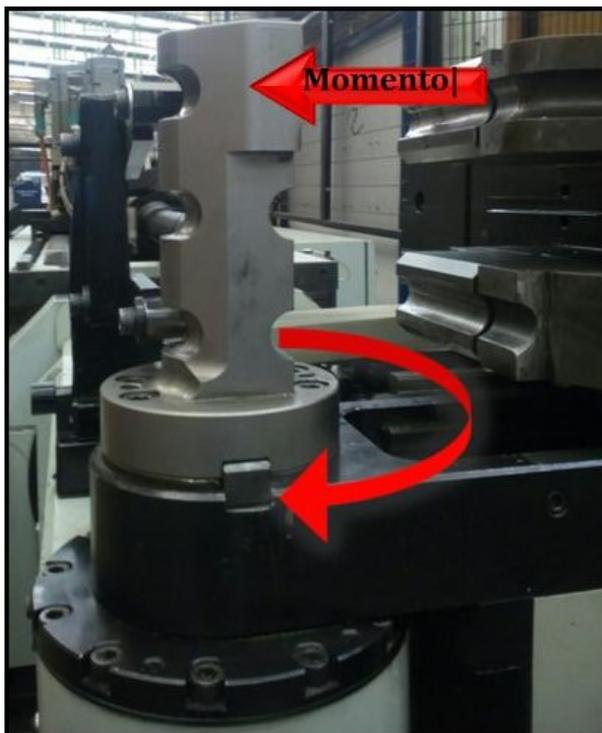


Figura 1: Herramental para el doblado de tubos en operación.



Figura 2: Herramental fracturado en la base.

Una alternativa para aumentar el ciclo de vida de operación del herramental consiste en aplicar el método de análisis por elemento finito asistido por computadora para modelar y simular un rediseño de la geometría de la herramienta y sus componentes y optimizar la concentración de esfuerzos, otra opción es realizar el estudio de mecánica computacional con un material que mejore las propiedades mecánicas y

tratamiento térmico del acero AISI-D2 y sea el adecuado para el proceso de doblado y evitar una herramienta muy tenaz que en presencia de una flexión excesiva tienda a fracturarse. Esta última metodología se aplicará en el presente trabajo de investigación con el objetivo de analizar la viabilidad de fabricar el árbol de doblado con un acero más rentable en cuanto a costo y manufactura. Por ejemplo, en

la Ref. (Mayén, 2010) se analizan las propiedades mecánicas de aceros grado herramienta AISI-D2 y AISI-O1, con la finalidad de diseñar y fabricar mordazas y pernos de sujeción para especímenes compactos de tensión. Para ello fue necesario llevar a cabo un estudio de las propiedades mecánicas de los materiales mediante pruebas en laboratorio, donde se obtuvieron las gráficas esfuerzo-deformación; con los datos obtenidos se llevó a cabo un diseño de la mordaza en el programa especializado en el estudio de elemento finito ANSYS-11.

Validando los resultados obtenidos al coincidir la zona de concentración de esfuerzo máximo señalada por el programa con la zona donde se presentó la fractura de los especímenes sometidos a pruebas de laboratorio y en la práctica. Posteriormente se llevó a cabo la selección de la óptima configuración entre material y geometría para el ciclo de vida de operación de la mordaza (optando por el material AISI-O1). Otros estudios más recientes, mejoran las propiedades mecánicas de los aceros con alto contenido de carbono grado AISI para herramientas aplicando tratamientos criogénicos profundos. Las muestras preparadas conforme las normas ASTM se introducen en refrigeradores criogénicos a diferentes ciclos de tiempo (por ejemplo 6, 12, 24 y 36 horas) en rangos de temperatura entre -154°C y -196°C , posteriormente se someten a un tratamiento de templado a altas temperaturas entre 150°C y 600°C . Al evaluar las propiedades mecánicas de las muestras como microdureza, propiedades de tracción y microestructura, se ha demostrado una mayor dureza y reducción en la resistencia a la tracción, por otra parte, mediante técnicas de rayos X se muestra que el contenido

de austenita retenida de las muestras tratadas con diversos tratamientos criogénicos se reduce a casi cero (Katoch, 2019; Kumar, 2022; ^aXu, 2022; ^bXu, 2022; Xu, 2023).

En la última década, la investigación de las propiedades mecánicas de los aceros grado herramienta se ha concentrado en el interés de su fabricación por el uso de procesos de manufactura aditiva. Uno de los procesos industrializados de fabricación de metales más común es la fusión del lecho de polvo por láser (LPBF). Esta técnica se basa en modelos de diseños asistidos por computadora (CAD), un rayo láser funde la estructura deseada por la deposición de capas sucesivas de material en polvo. En esta operación, una parte esencial son los parámetros del proceso LPBF, tales como, la potencia del láser, el diámetro del punto láser y la velocidad de escaneo que tienen un fuerte impacto en las propiedades mecánicas del material resultante. Para el caso de los aceros austeníticos AISI manufacturados a diferentes temperaturas de precalentamiento de la placa base durante el proceso (lo que permite reducir el gradiente térmico y las tensiones residuales), se ha reportado que las propiedades mecánicas bajo cargas estáticas de las muestras fabricadas con LPBF son iguales o mejores que las de las muestras fabricadas convencionalmente. Lo anterior se atribuye a su fina microestructura (Kunz, 2020; Qin, 2021; ^aQin, 2023). Para evitar la desventaja de los defectos internos como poros y malas cualidades superficiales que inciden en una baja resistencia a la fatiga, se han indicado procesos posteriores de prensado isostático en caliente (Åsberg, 2019; ^bQin, 2023). Lo anterior incluso ha permitido aplicar a los diseños obtenidos tratamientos térmicos convencionales

para obtener una alta microdureza y resistencia a la compresión (Sander, 2016; Mazeeva, 2023; Van Trinh, 2023). La presente investigación se divide como sigue: en la sección 2 se presenta el diseño y geometrías del herramental, posteriormente en la sección 3 se indican las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y AISI-4140 y se muestran los resultados del modelado y simulación mediante mecánica computacional para cada uno de los materiales propuestos para el herramental. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo.

1. DISEÑO DEL HERRAMENTAL

En este capítulo se describe la geometría del herramental (en mm) para el proceso de doblado de tubos. A través de mediciones directas en un herramental

patrón y utilizando instrumentos de medición convencionales se obtiene un diseño en CAD (utilizando el programa de diseño CATIA V5).

1.1 Árbol de doblado (Bend Die Body)

El árbol de doblado es la herramienta principal que establece el radio de la curva del tubo. La herramienta es de acero o acero aleado y es tratada a temperaturas altas con nitruro. Las figs. 3 y 4 muestran el diseño del árbol de doblado que se analizará para doblar tubos de acero AISI-409 con un radio de curvatura de doblado de 16mm y ángulo de 125°, longitud de 365.5mm y radio exterior (r_2) e interior (r_1) de 10.0mm y 9.5mm, respectivamente (OMNI-X MX, 2020).

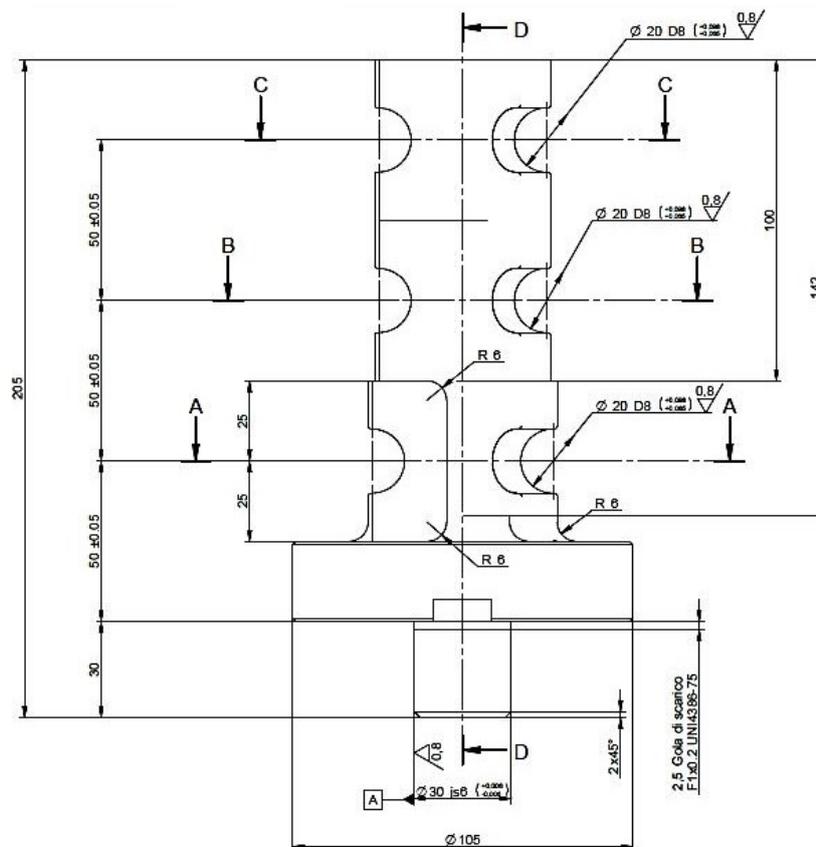


Figura 3: Geometría de la vista frontal del árbol de doblado.

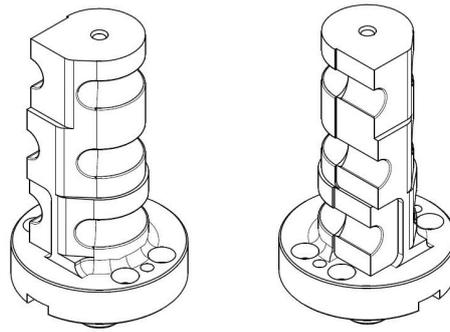


Figura 4: Vista en Isométrico del árbol de doblado.

1.2 Dado de Ajuste (Clamp)

El dado de ajuste (fig. 5) tiene el mismo acabado que el árbol de doblado. Y su

función principal es sujetar el tubo en conjunto con el árbol de doblado durante la flexión.

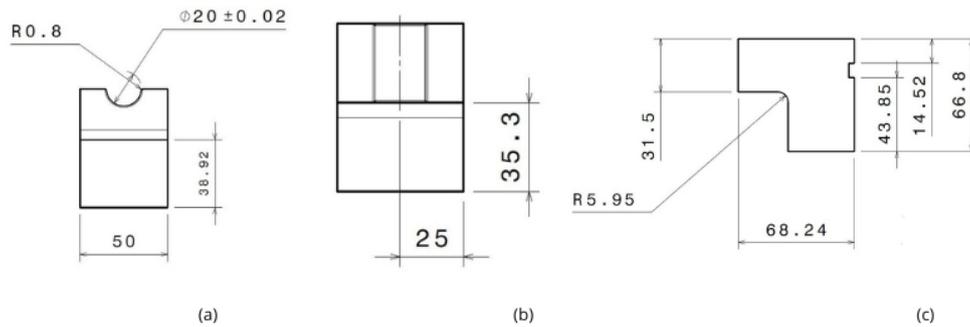


Figura 5: Geometría del dado de ajuste, (a) vista frontal, (b) vista superior y (c) vista lateral.

1.3 Dado de presión (Pressure Die)

El dado de presión es usado para mantener presión constante en el tubo cuando la flexión ocurre y por lo tanto

provee una fuerza de reacción para crear la curva. En la fig. 6, se ilustra el dado de presión

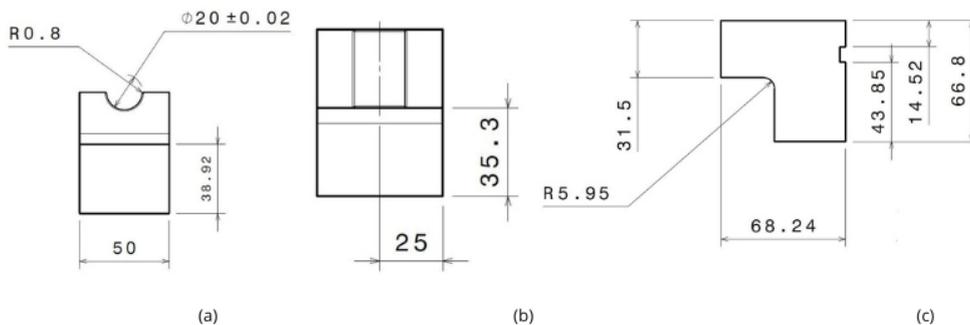


Figura 6: Geometría del dado de presión, (a) vista frontal, (b) vista superior y (c) vista lateral.

1.4 Dado deslizante (Wiper Die)

El dado deslizante se monta en la ranura del árbol de doblado con la punta colocada de forma tangente. La función

principal es eliminar la fricción para evitar arrugas en el interior del radio de curvatura. En la fig. 7, se ilustra el dado deslizante en estudio.

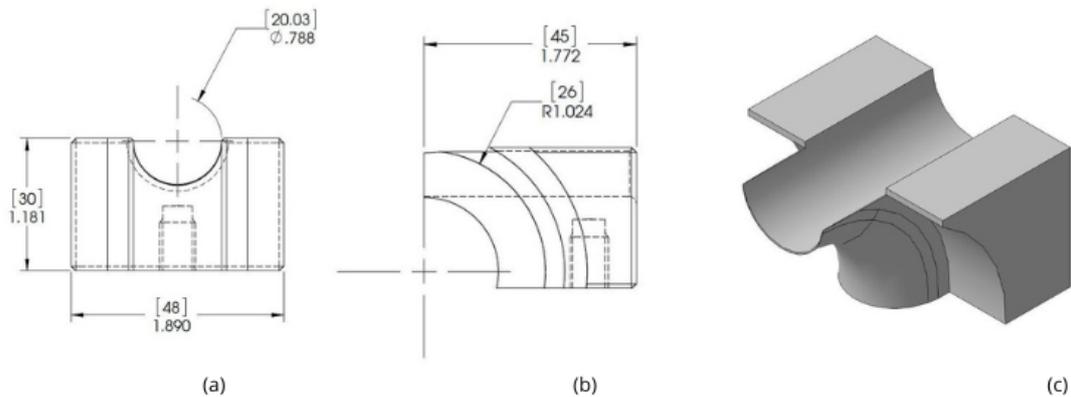


Figura 7: Geometría del dado deslizante, (a) vista frontal, (b) vista lateral y (c) vista en isométrico.

1.5. Ensamble del herramental

El ensamble del árbol de doblado con respecto al dado de ajuste, dado presión, dado deslizante y el tubo (Pipe) se realiza en la misma forma en que se lleva a cabo en la práctica el proceso de doblado del

tubo (fig. 8). Se considera el tercer nivel de doblado, ya que al ser el más distante respecto a la base y al aplicar la carga necesaria para doblar el tubo, se produce el mayor esfuerzo sobre el herramental.

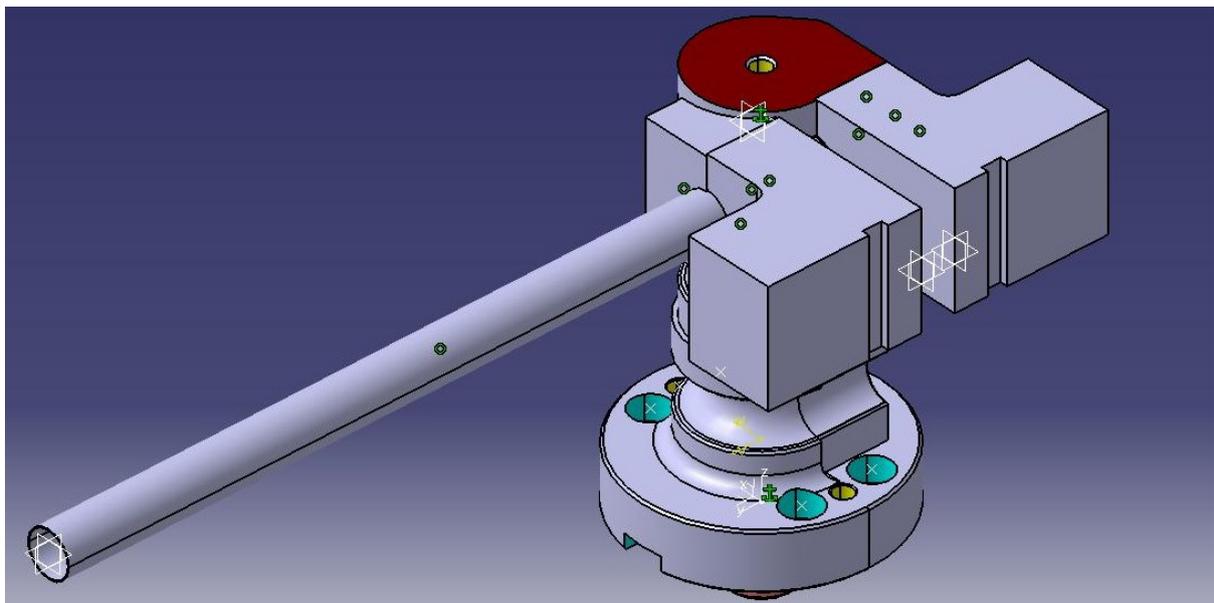


Figura 8: Ensamble: Bend Die Body-Wiper Die-Pipe-Clamp-Pressure Die.

2. MATERIALES, MODELADO Y SIMULACIÓN

2.1 Determinación de las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y AISI-4140.

El árbol de doblado y sus componentes se fabrican con un acero grado de herramienta AISI-D2, el cual es nitrurado al alto vacío para proporcionar una dureza de 65 HR-C en su superficie (Martínez-Reyes, 2020). Dentro de la categoría de los aceros dúctiles, el AISI-4140 tiene una amplia gama de aplicaciones industriales que abarca la manufactura de cigüeñales, flechas de transmisión, pernos, engranes, ejes, bielas, etc. Además de ser más económico y de fácil maquinado (Martínez-Reyes, 2020; Morral, 2021].

Para llevar a cabo el estudio por elemento finito computacional, es necesario determinar las propiedades mecánicas de los aceros a utilizar, dichas propiedades determinan el comportamiento del material durante la aplicación de cargas. Mediante un ensayo de tensión se determinan las propiedades mecánicas de los aceros AISI-D2 y 4140, para ello se utilizó una máquina universal de pruebas

a tracción servo-hidráulica, Marca: SHIMADZU, Serie: AGS-X de 100kN de capacidad que determina el módulo de elasticidad (E), esfuerzo de fluencia (S_Y), esfuerzo último (S_U) y coeficiente de Poisson (ver fig. 9 y tablas 1, 2). Para las pruebas se utilizaron probetas de 100.00mm de longitud las cuales fueron maquinadas bajo la norma ASTM E8-08 (fig. 10), manejando velocidades de cabezal de 10 mm/min a temperatura ambiente y con un factor de repetibilidad de 5.0 pruebas, para cada uno de los aceros. Cabe señalar que el tratamiento de nitruración proporciona una dureza superficial y conserva las propiedades mecánicas del material en el núcleo, este tratamiento se realiza para evitar el desgaste o rallado por fricción (Schmid, 2015). Por tal motivo en la medición de dureza se utilizan materiales sin tratamiento (ver tablas 1, 2). Para las pruebas de dureza se utilizó un equipo automático Marca: AFFRI, Serie: 32E-RSD y un penetrador de diamante para escalas HR-C (Rockwell-C) empleando una precarga de 10.00kg y una carga de 100.00kg. Por otra parte, en la tabla 3 se enlistan las propiedades mecánicas del acero AISI-409 (material de manufactura del tubo).

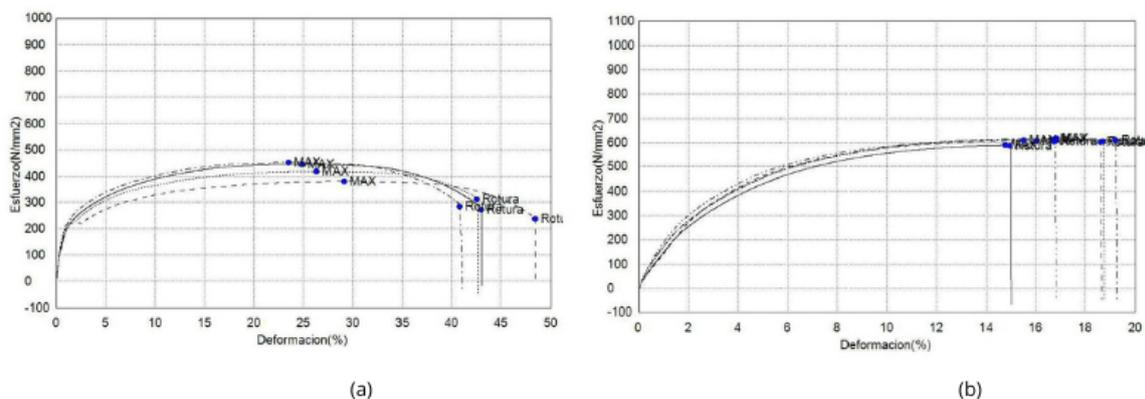


Figura 9: Gráfico esfuerzo vs deformación del acero AISI-4140 (a) y AISI-D2 (b).

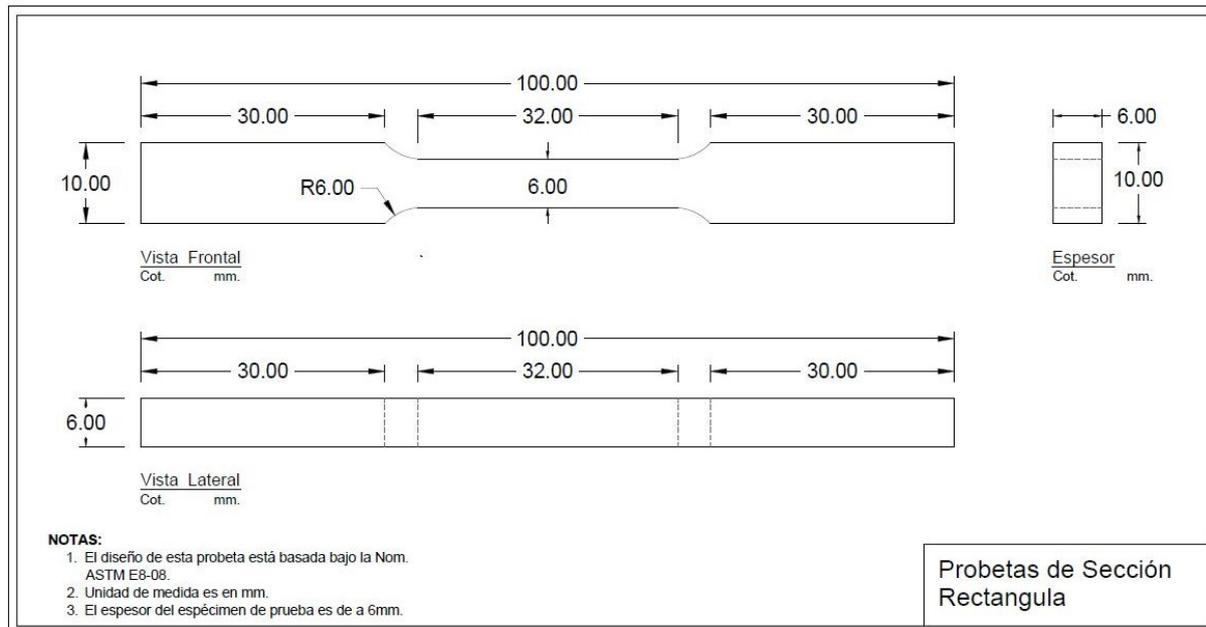


Figura 10: Probeta de sección rectangular ASTM E8-08.

Tabla 1: Resumen de las propiedades mecánicas del acero AISI-4140.

| Probeta | E (GPa) | S_Y (MPa) | S_U (MPa) | Coefficiente de Poisson | Dureza HR-C |
|-----------------------|------------|---------------|---------------|-------------------------|--------------|
| 1 | 208 | 210.89 | 380.12 | 0.3 | 31.3 |
| 2 | 206 | 211.47 | 418.25 | 0.3 | 33.7 |
| 3 | 214 | 212.53 | 444.63 | 0.3 | 36.8 |
| 4 | 216 | 214.96 | 450.52 | 0.3 | 37.6 |
| 5 | 206 | 211.33 | 417.43 | 0.3 | 32.4 |
| Valor promedio | 210 | 212.23 | 422.19 | 0.3 | 34.36 |

Tabla 2: Resumen de las propiedades mecánicas del acero AISI-D2.

| Probeta | E (GPa) | S_Y (MPa) | S_U (MPa) | Coefficiente de Poisson | Dureza HR-C |
|-----------------------|--------------|---------------|---------------|-------------------------|-------------|
| 1 | 198.4 | 251.82 | 587.39 | 0.3 | 52.3 |
| 2 | 198.3 | 283.30 | 615.42 | 0.3 | 57.6 |
| 3 | 197.7 | 275.65 | 610.09 | 0.3 | 55.2 |
| 4 | 197.7 | 267.18 | 606.64 | 0.3 | 54.7 |
| 5 | 198.8 | 282.57 | 613.51 | 0.3 | 56.2 |
| Valor promedio | 198.2 | 272.10 | 606.61 | 0.3 | 55.2 |

Tabla 3: Propiedades mecánicas del acero AISI 409.

| Densidad (kg/cm ³) | E (GPa) | S _Y (MPa) | Coefficiente de Poisson | Dureza HR-B |
|--------------------------------|---------|----------------------|-------------------------|-------------|
| 7.739 | 220 | 240 | 0.3 | 75.0 |

Es importante destacar que a partir de las curvas *Esfuerzo-Deformación*, se observa que el acero AISI-D2 se comporta como un material frágil (mayor tenacidad), mientras que el acero AISI-4140 como un material dúctil.

2.2 Aplicación de cargas y condiciones de frontera en el modelado y simulación

Para poder determinar las cargas que actúan sobre el herramental se analiza el funcionamiento del árbol de doblado al interactuar con el dado de ajuste, dado de presión, dado deslizante y el mismo tubo, al momento de comenzar

el proceso de doblado. Se deducen las fuerzas aplicadas por el dado de ajuste y el dado de presión, los cuales actúan directamente sobre el árbol de doblado y el dado deslizante cuando sujetan y doblan el tubo, dichas fuerzas están relacionadas con el momento plástico del tubo (Schmid, 2015) y las reacciones que este provoca al resistirse a la deformación plástica total.

En la tabla 4, se muestran los resultados durante el proceso de doblado del tubo en función de sus características geométricas (fig. 11) y las propiedades mecánicas del material considerando que es un material elastoplástico perfecto (Budynas, 2019).

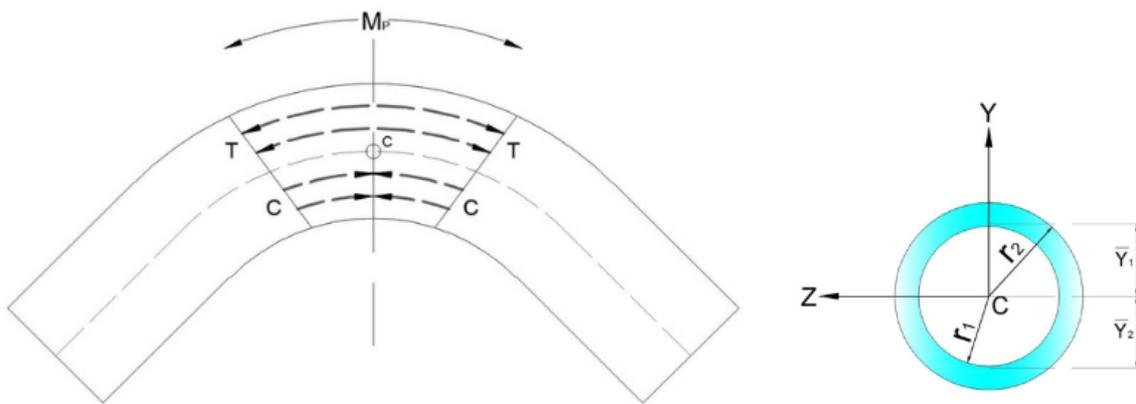


Figura 11: Comportamiento mecánico durante el proceso de doblado del tubo.

Tabla 4: Resultados del análisis del proceso de doblado de tubo

| Parámetro | Ecuación | Resultados |
|---|--|--|
| Momento de Fluencia | $M_Y = \frac{\pi (r_2^4 - r_1^4)}{4r_2} \cdot S_y$ | $M_Y = 34964.748 \text{ Nmm}$ |
| Distancia del eje neutro al centroide de una sección semicircular | $\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = \frac{4 (r_2^3 - r_1^3)}{3\pi (r_2^2 - r_1^2)}$ | $\bar{y}_1 = \bar{y}_2 = 6.208 \text{ mm}$ |
| Momento Plástico | $M_P = \frac{4}{3} (r_2^3 - r_1^3) \cdot S_y$ | $M_P = 45640.00 \text{ Nmm}$ |
| Fuerza de tensión y compresión | $T = C = \frac{\pi (r_2^2 - r_1^2)}{2} \cdot S_y$ | $T = C = 3675.663 \text{ N}$ |
| Factor de forma | $f = \frac{16r_2 (r_2^3 - r_1^3)}{3\pi (r_2^4 - r_1^4)}$ | $f = 1.305$ |

Al iniciar el proceso de doblado del tubo las fuerzas resultantes en el sistema, la distribución de fuerzas se simplifica en función de una carga última w_u que actúa sobre el tubo y permite doblarlo totalmente. En la tabla 5 se presentan los valores para cada una de las etapas por las cuales atraviesa el sistema al aumentar gradualmente la carga w , pasando por la carga de fluencia w_Y , la carga de plastificación w_i , hasta llegar a la carga última w_u .

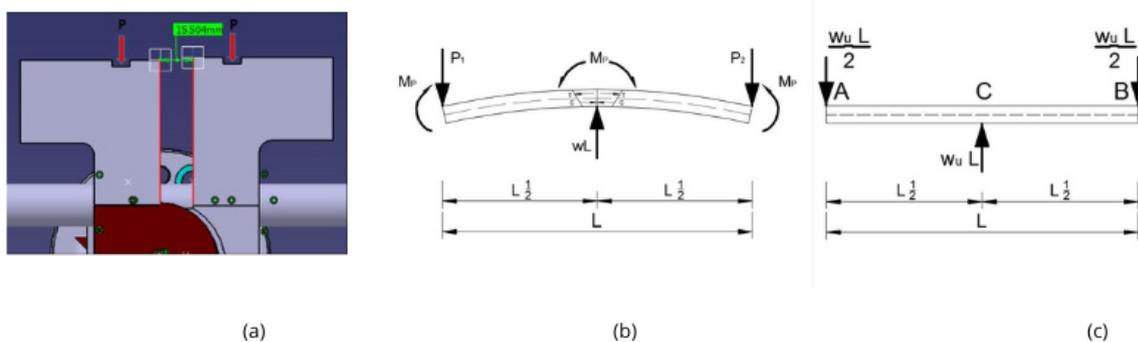


Figura 12: Diagrama de cuerpo libre del sistema al iniciar el doblado

Tabla 5: Resultados del análisis de carga.

| Parámetro | Ecuación | Resultados |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Carga de fluencia | $w_Y = \frac{12M_Y}{L^2}$ | $w_Y = 2328.55 \text{ N/mm}$ |
| Carga de plastificación | $w_i = \frac{12M_P}{L^2}$ | $w_i = 2279.62 \text{ N/mm}$ |
| Carga última | $w_u = \frac{16M_P}{L^2}$ | $w_u = 3039.50 \text{ N/mm}$ |

Finalmente, considerando los puntos cargas que actúan en cada elemento del indicados en la fig. 12c, en la tabla herramental.

6 se muestran los valores de las

Tabla 6: Resultado de las fuerzas aplicadas en los elementos del sistema.

| Ecuación | Resultados | Elemento del sistema |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| $R_A = \frac{w_u L}{2}$ | $R_A = 23556.125 \text{ N}$ | Dado de ajuste (Clamp) |
| $R_B = \frac{w_u L}{2}$ | $R_B = 23556.125 \text{ N}$ | Dado de presión (Pressure Die) |
| $R_C = w_u L$ | $R_C = 47112.25 \text{ N}$ | Árbol de doblado (Bend Die Body) |

2.3 Presentación y discusión de resultados

Utilizando el módulo “*Analysis & Simulation*” del software de diseño CATIA V5, se realiza un análisis estático mediante elemento finito computacional del herramental, para determinar la distribución de esfuerzos por teoría

de Von-Mises durante el proceso de doblado del tubo. Se modela y discretiza el herramental aplicando las cargas correspondientes en cada uno de los dados, relaciones de contacto de deslizamiento, así como, restricciones de movilidad y fijas (fig. 13).

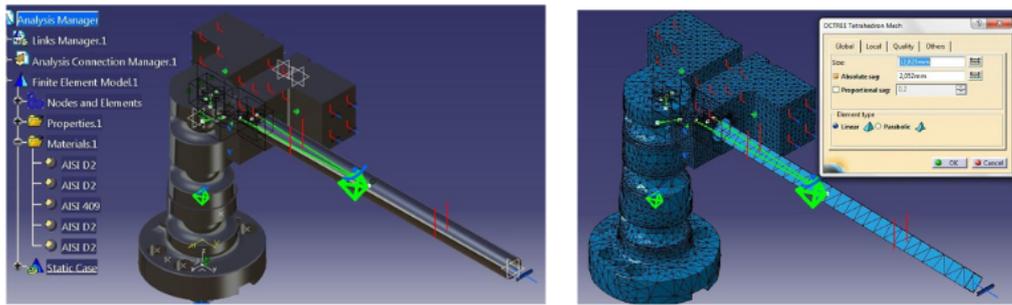


Figura 13: Condiciones de frontera y discretización del herramental

Se realizan dos simulaciones para concentración de esfuerzos en el árbol de doblado, empleando los aceros AISI-D2 y AISI-4140, respectivamente. En ambos estudios los demás componentes del herramental se modelan con acero AISI-D2 y el tubo con un AISI-409. La fig. 14 muestra magnitudes de los resultados numéricos para cada tipo de acero la zona de concentración de esfuerzos en el árbol de doblado y de acuerdo con la fig. 2 se coincide con la zona de fractura cuando el herramental falla por su operación, en la fig. 15 se muestran las simulaciones del desplazamiento. Por lo tanto, las magnitudes de los resultados numéricos se consideran confiables (ver tabla 7).

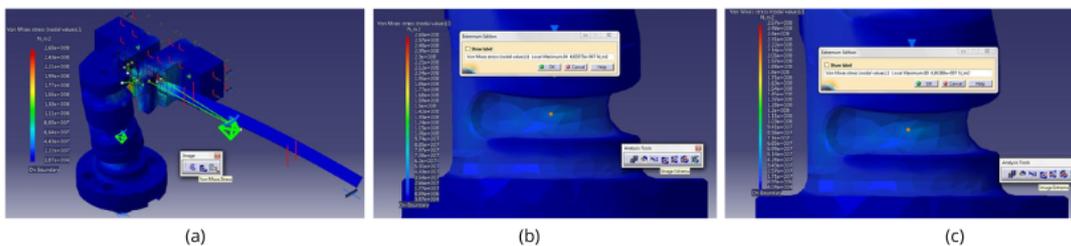


Figura 14: Localización del nodo de mayor esfuerzo en el árbol de doblado para el caso de análisis con acero AISI-D2 (b) y AISI-4140 (c).

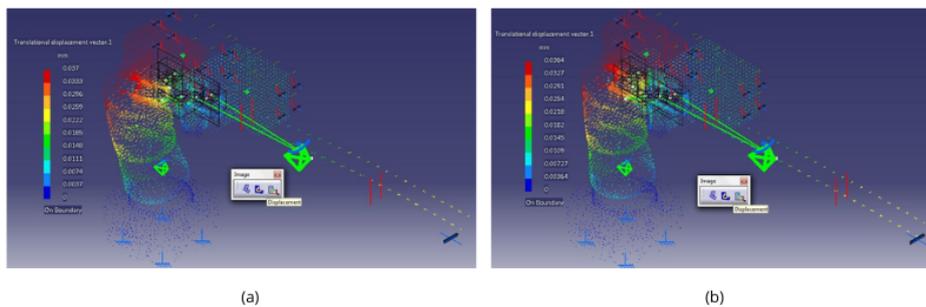


Figura 15: Visualización del análisis de desplazamiento del árbol de doblado para el caso de análisis con acero AISI-D2 (a) y AISI-4140 (b).

Tabla 7: Resultados por elemento finito computacional para cada caso de estudio en el árbol de doblado

| ACERO AISI-D2 | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------------------|
| Resultado. | Valor. | Ubicación con respecto a la base. |
| Esfuerzo max. | 46.3375 MPa | 25.00 mm |
| Deformación max. | 36.7439 μm | 150.00 mm |
| ACERO AISI-4140 | | |
| Resultado. | Valor. | Ubicación con respecto a la base. |
| Esfuerzo max. | 48.0389 MPa | 25.00 mm |
| Deformación max. | 36.1108 μm | 150.00 mm |

Una vez desarrollado el análisis por elemento finito asistido por computadora, se calcula el factor de seguridad para cada uno de los casos de estudio, mediante:

$$F.S = \frac{S_Y}{S_{\text{Von-Mises}}}$$

Empleando la ecuación anterior, los factores de seguridad para los aceros AISI-D2 y AISI-4140 son 5.87 y 4.43, respectivamente. La diferencia entre los factores de seguridad es de 1.44. Esto quiere decir que al seleccionar un acero AISI-D2, este puede soportar una carga adicional de 144.0% con respecto al acero AISI- 4140.

Conclusiones

En este trabajo se realizó la caracterización, modelado y simulación computacional de dos aceros grado herramienta AISI-D2 y AISI-4140, con la finalidad de analizar el comportamiento de estos materiales en la fabricación de un herramental para el doblado de

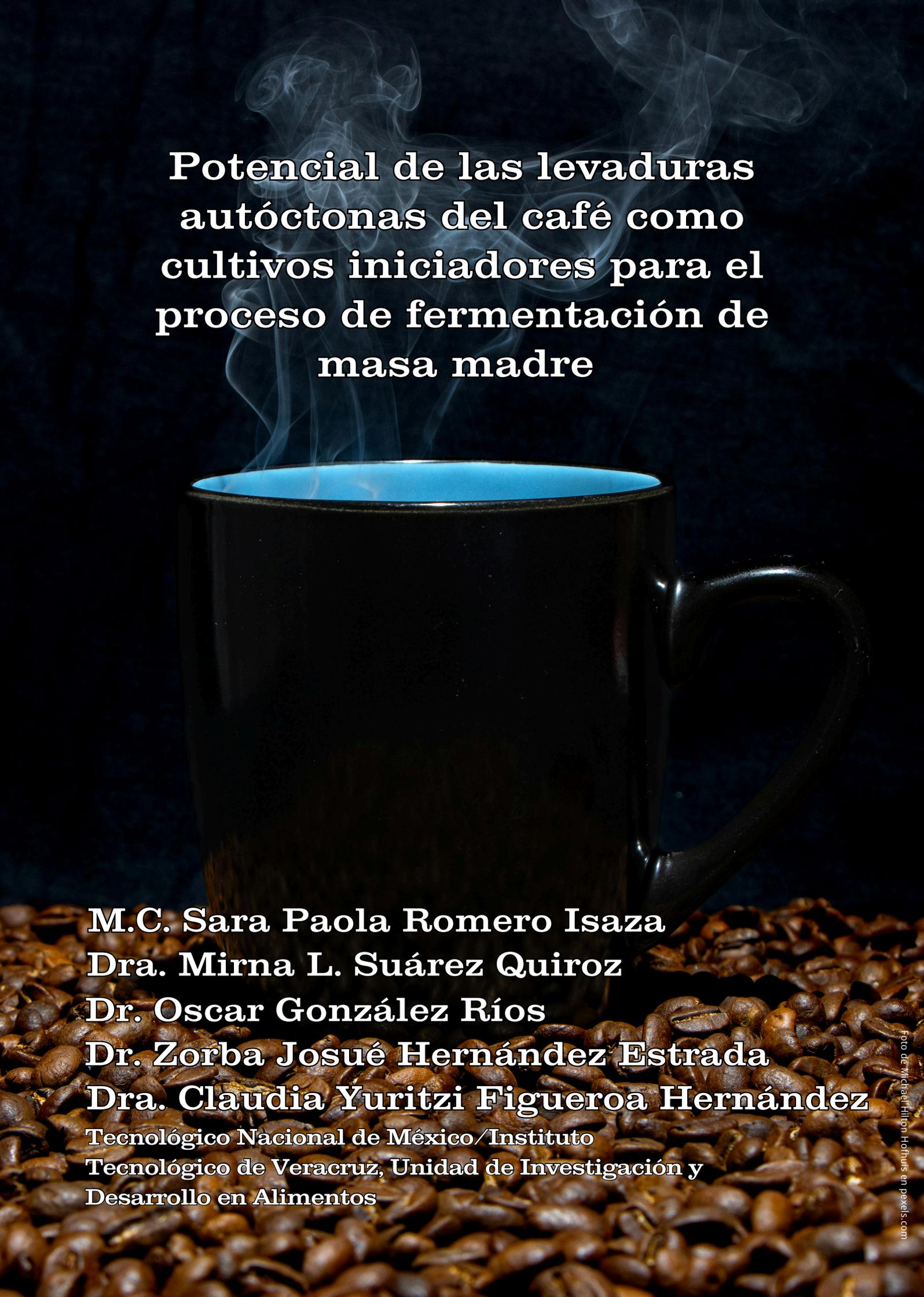
tubos. El acero AISI-D2 muestra el comportamiento de un material frágil, mientras que el acero AISI-4140 de un material dúctil. Lo anterior indica que el acero AISI-D2 presenta una mayor rigidez. Las simulaciones por elemento finito computacional se validan en función del comportamiento que presenta el herramental durante su operación, lo cual permite analizar el comportamiento mecánico con los dos aceros antes mencionados. Las magnitudes de los campos de esfuerzo y desplazamiento, así como, el factor de seguridad entre estos materiales muestra valores muy cercanos. Por tal motivo se puede seleccionar el acero AISI-4140 como una alternativa para la construcción del árbol de doblado, sin comprometer su funcionamiento. Este material refleja un bajo costo a comparación del AISI-D2, debido a que este último es muy utilizado en procesos que requieren alta tenacidad y para su manufactura se requieren cortadores especiales.

Referencias

- [1] Åsberg, M.; Fredriksson, G.; Hatami, S.; Fredriksson, W.; Krakhmalev, P. "Influence of post

- treatment on microstructure, porosity and mechanical properties of additive manufactured H13 tool steel”, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 742, pp. 584-589, 2019.
- [2] Budynas, R. G.; Nisbett, R. G. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 10 ed. México, Mc Graw-Hill. 2019.
- [3] Katoch, S.; Singh, V.; Sehgal, R. “Mechanical Properties and Microstructure Evaluation of Differently Cryogenically Treated AISI-H11 Steel”, *Int. J. Steel Struct.*, vol.19, pp. 1381–1392, 2019.
- [4] Kumar, Satish; Nagaraj, Mohan; Bongale, Arunkumar; Khedkar, Nitin K. “Effect of deep cryogenic treatment on the mechanical properties of AISI D3 tool steel”, *International Journal of Materials Engineering Innovation*, vol. 10, no. 2, pp. 98-113, 2019.
- [5] Kunz, J.; Saewe, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Schleifenbaum, J.H.; Broeckmann, C. “Mechanical Properties of High-Speed Steel AISI M50 Produced by Laser Powder Bed Fusion”, *Steel research int.*, vol. 91, no. 5, pp. 1900562, 2020.
- [6] Martínez-Reyes, H. F.; Seth-Escobar, B.; Villegas-Mesa, J. A.; Murillo Yarce, L. C.; Marín-Chicaiza, J. S.; Ocampo, D. A. “Experiencias en el tratamiento térmico de aceros para aseguramiento de la validez de los resultados en dureza Rockwell C”. *Revista MODUM*, vol. 2, no. 1, pp. 110-129, 2020.
- [7] Mayén Chaires, J.; Segura, J. A.; Serna Barquera, S. A.; Molina Ocampo, A. “Evaluación de propiedades mecánicas de dos aceros grado herramienta AISI-O1, AISI-D2 y obtención de la concentración de esfuerzos en la geometría de mordazas de sujeción de especímenes compactos de tensión”, *Superficies y Vacío*, vol. 23, no. S, pp. 10-14, 2010.
- [8] Mazeeva, A. K.; Kim, A.; Shamshurin, A. I.; Razumov, N. G.; Nazarov, D. V.; Borisov, A. N.; Popovich, A. A. “Effect of heat treatment on structure and magnetic properties of Ni36Co37Al27 alloy produced by laser powder bed fusion”, *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 938, pp. 168461, 2023.
- [9] Morral, F. R.; Jimeno, E.; Molera, P. *Metalurgia general. Tomos I y II*. 1 ed. México, Reverté, 2021.
- [10] OMNI-X MX. *Worldwide Leader in Bending Technology-Manual*, México, 2020. <https://www.omni-x.com/mx/es/>
- [11] Qin, S.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C. “Effects of Pressure on Microstructure and Residual Stresses during Hot Isostatic Pressing Post Treatment of AISI M50 Produced by Laser Powder-Bed Fusion”. *Metals*, vol. 11, 2021.
- [12] Qin, S.; Saewe, J.; Kunz, J.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Schleifenbaum, J.H.; Broeckmann, C. “Influence of Preheating Temperature on Microstructure Evolution and Hardness of High-Speed Steel AISI M50 Processed by Laser Powder Bed Fusion”, *Steel research int.*, vol. 94, no. 6, pp. 2200784, 2023.

- [13] ^bQin, S.; Herzog, S.; Kaletsch, A.; Broeckmann, C. "Improving the Fatigue Strength of Laser Powder Bed-Fused AISI M3:2 by Hot Isostatic Pressing", *Steel research int.*, vol. 94, no. 4, pp. 2200435, 2023.
- [14] Sander, J.; Hufenbach, J.; Giebeler, L.; Wendrock, H.; Kühn, U.; Eckert, J. "Microstructure and properties of FeCrMoVC tool steel produced by selective laser melting", *Materials & Design*, vol. 89, pp. 335-341, 2016.
- [15] Schmid, S. R.; Kalpakjian, S. *Manufactura Ingeniería y Tecnología: Ingeniería y Tecnología de Materiales*. 7 ed. México, Pearson, 2015.
- [16] Van Trinh, Trung; Nguyen, Son Anh; Gia Pham, Khanh; Seidel, Christian; Hoang Pham, Anh; Nhu Phung, Cuong. "Change in microstructure and hardness of additively manufactured AISI H13 steel by heat treatment and nitriding processes", *Acta Metallurgica Slovaca*, vol. 29, no. 2, pp. 82-87, 2023.
- [17] ^aXu, Guili; Huang, Peng; Feng, Zhanhao; Wei, Zhenxiong; Zu, Guoyin. "Effect of Deep Cryogenic Time on Martensite Multi-Level Microstructures and Mechanical Properties in AISI M35 High-Speed Steel", *Materials*, vol. 15, no. 19, pp. 6618, 2022.
- [18] ^bXu, Guili; Huang, Peng; Wei, Zhenxiong; Feng, Zhanhao; Zu, Guoyin. "Microstructural variations and mechanical properties of deep cryogenic treated AISI M35 high-speed steel tempered at various temperatures", *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 17, pp. 3371, 2022.
- [19] Xu, Guili; Huang, Peng; Wei, Zhenxiong; Feng, Zhanhao; Zu, Guoyin. "Multiphase Microstructure Optimization to Enhance the Mechanical Properties of AISI M35 High-Speed Steel", *Steel research international*, vol. 94, no. 9, 2023.



**Potencial de las levaduras
autóctonas del café como
cultivos iniciadores para el
proceso de fermentación de
masa madre**

M.C. Sara Paola Romero Isaza

Dra. Mirna L. Suárez Quiroz

Dr. Oscar González Ríos

Dr. Zorba Josué Hernández Estrada

Dra. Claudia Yuritzi Figueroa Hernández

Tecnológico Nacional de México/Instituto

Tecnológico de Veracruz, Unidad de Investigación y

Desarrollo en Alimentos

Abstract

Coffee fermentation involves various microorganisms, mainly lactic acid bacteria (LAB) and yeasts, whose activity influences the sensory, aromatic, and nutritional properties of the beverage obtained as a final product. The metabolic characteristics of these autochthonous microorganisms can be exploited for their use as starter cultures for other fermentation processes, such as sourdough fermentation. In recent years, the use of sourdough for the elaboration of bakery products has gained relevance due to the multiple health benefits it can provide, in addition to improving the nutritional quality of one of the most widely consumed foods in the world. In this fermentative process, yeasts and LAB also participate. These microorganisms are often deliberately added as starter cultures to conduct sourdough fermentation at the industrial level. Therefore, this review aims to provide an overview of the potential of autochthonous yeasts for coffee fermentation as starter cultures for sourdough, as well as the important criteria to be considered when selecting them.

Keywords: Coffee, Yeast, Starter culture, Sourdough

Resumen

En la fermentación del café intervienen diversos microorganismos principalmente bacterias ácido lácticas (BAL) y levaduras, cuya actividad tiene un efecto en las propiedades sensoriales, aromáticas y nutricionales de la bebida obtenida como producto final. Las características metabólicas de estos microorganismos autóctonos pueden ser valorizadas de su uso como cultivos iniciadores para otros procesos fermentativos como la fermentación de masa madre. En los últimos años el uso

de la masa madre para la elaboración de productos de panadería ha tomado relevancia debido a los múltiples beneficios que puede aportar en la salud, además de que mejora la calidad nutricional de uno de los alimentos más ampliamente consumidos en el mundo. En este proceso fermentativo, también participan levaduras y BAL. A nivel industrial, estos microorganismos suelen ser añadidos deliberadamente como cultivos iniciadores para dirigir la fermentación de la masa madre. Por lo anterior, el objetivo de esta revisión es brindar un panorama sobre la potencialidad que tienen las levaduras nativas de la fermentación del café como cultivos iniciadores de la masa madre, así como de los criterios importantes que se deben considerar para seleccionarlas.

Palabras clave: Café, Levaduras, Cultivo iniciador, Masa madre

Introducción

En las fermentaciones de alimentos se encuentran involucradas una gran diversidad de microorganismos, y por lo tanto son fuentes potenciales para aislar microorganismos de interés comercial, que pueden ser utilizados como cultivos iniciadores en diversos procesos fermentativos entre los que destacan la cerveza, vino, cacao, leches fermentadas y masa madre. En el caso particular de la fermentación del café están involucrados una gran diversidad de levaduras y bacterias ácido lácticas (Siridevi *et al.*, 2019). Estos microorganismos contribuyen a la producción de precursores de sabor y aroma característicos de la bebida del café. Los géneros de levaduras mayormente reportados en la fermentación (vía húmeda) pertenecen a los géneros *Saccharomyces*, *Candida*, *Pichia*, *Hanseniaspora* y *Kluyveromyces* (Evangelista *et al.*, 2015).

Las levaduras han sido utilizadas desde las antiguas civilizaciones como iniciadores para la producción de alimentos y bebidas fermentadas. La fermentación de masa madre ha sido parte de la historia de la humanidad y aún hoy en día representa un recurso alimentario importante en todo el mundo. Incluso el uso de este tipo de masa para la elaboración de diversos productos de panificación ha tomado gran relevancia en los últimos años ya que tiene un efecto positivo sobre los sensoriales, nutricionales y funcionales de los panes producidos.

Durante el proceso de fermentación en la masa madre intervienen diversas bacterias ácido lácticas y levaduras, las cuales tienen un impacto significativo en los indicadores de calidad del pan producido con esta masa. Este proceso fermentativo puede ser dirigido por la adición de cultivos iniciadores que tengan un buen efecto sobre los parámetros reológicos, sensoriales, aromáticos y funcionales del pan elaborado con esta. De forma tradicional se utiliza la levadura comercial de panadería (*Saccharomyces cerevisiae*) Sin embargo, se ha evidenciado que el uso de levaduras autóctonas como iniciadores en este proceso fermentativo puede ser útil para controlar este proceso y, además aporta buenas características de leudado (fermentación de la masa) y mejora las características sensoriales y nutricionales de la masa y del pan elaborado con la misma (Vrancken *et al.*, 2010). Por esa razón, resulta interesante estudiar la potencialidad de las levaduras nativas del proceso de café como cultivos iniciadores para la fermentación de masa madre.

Generalidades de la masa madre

El proceso de fermentación de masa madre se ha utilizado de forma

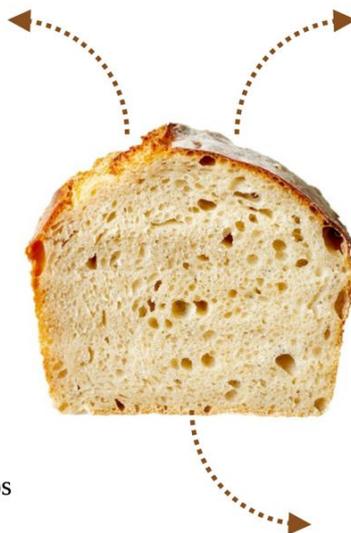
tradicional para la elaboración de pan desde la antigüedad, por lo que es un recurso alimentario importante para la humanidad (Calvert *et al.*, 2021, Hernández-Parada *et al.*, 2023). La masa madre puede ser definida como la masa fermentada por un consorcio complejo conformado por bacterias ácido lácticas y levaduras que se utiliza como agente leudante para la panificación, produciendo panes con un perfil aromático más complejo, mejores características de sabor y textura, además de una vida de anaquel más larga. Actualmente el uso de este tipo de masa ha ganado relevancia debido a los efectos sobre las propiedades nutricionales, sensoriales y funcionales en los productos de panificación producidos con este tipo de masa (Siepmann *et al.*, 2019).

La diversidad microbiana presente en la masa madre es dependiente de la microbiota autóctona presente en el momento de la fermentación (ambiente, utensilios y la microbiota del panadero). Sin embargo, también intervienen otros factores como el tipo de harina empleada, la alimentación del iniciador, el nivel de hidratación de la masa, el tiempo de fermentación, la temperatura de mantenimiento de la masa y el tiempo para elaboración del pan (Garofalo *et al.*, 2008; Lhomme *et al.*, 2016). Durante la fermentación de la masa madre, la microbiota presente se encarga de producir diversos metabolitos secundarios que son responsables de los efectos benéficos atribuidos al uso de la masa madre en la panificación, ver Figura 1. Por ejemplo, el uso de masa madre como agente leudante favorece la degradación del gluten, aumenta la absorción de nutrientes, principalmente minerales, lo cual aumenta la calidad nutricional de los alimentos elaborados con esta masa.

Efectos benéficos de la fermentación de masa madre sobre los productos de panadería

Propiedades nutricionales y funcionales

- Disminuye la respuesta glucémica.
- Disminuye las propiedades alergénicas de los cereales.
- Mayor concentración de EPS** con potencial prebiótico.
- Mayor biodisponibilidad de minerales.
- Incrementa el potencial antioxidante.
- Aumenta la concentración de péptidos bioactivos, aminoácidos y compuestos fenólicos libres.



Propiedades sensoriales y estructurales

- Incrementa el volumen específico.
- Diversifica el perfil sensorial.
- Mejora el sabor y textura en los productos integrales y libres de gluten.

Propiedades tecnológicas

- Aumenta la vida de anaquel.
- Provee capacidad antifúngica.
- Disminuye la oxidación lipídica.

** Exopolisacáridos

(Gobbetti et al., 2014)

Figura 1: Efectos benéficos atribuidos al uso de la masa madre en los productos de panadería

La masa madre puede clasificarse de acuerdo a su método de producción como: i) tipo I, que es la masa tradicional, la cual se fermenta durante varios días por acción de la microbiota presente en el agua, la harina y en el ambiente, y que además, requiere ser refrescada constantemente con harina y agua en intervalos regulares de tiempo; ii) tipo II esta masa es inoculada tipo II con cultivos iniciadores adaptados industrialmente, conformados por BAL y/o levaduras a intervalos de 15-24 horas; iii) tipo III masa producida por la deshidratación de la masa tipo II, esto facilita su almacenamiento y utilización y iv) tipo IV es una combinación de masa tipo I y II, debido a que a este tipo de masa se le adicionan cultivos iniciadores y se fermenta durante varios días (Siepmann *et al.*, 2019). Como se mencionó anteriormente, este proceso fermentativo puede ser

dirigido mediante la adición de cultivos iniciadores que favorezcan el desarrollo de un producto con mejores atributos nutricionales, sensoriales, reológicos y de calidad sanitaria, así como una mayor vida de anaquel (Hernández-Parada *et al.*, 2023; Kulathunga *et al.*, 2023).

Proceso de fermentación de la masa madre

La fermentación de la masa madre es un proceso que se lleva a cabo en condiciones aeróbicas limitadas, en donde participan de forma sucesiva, bacterias ácido lácticas y levaduras. Los cereales que tienen un valor de pH entre 5.0-6.2 y altas concentraciones de carbohidratos fermentables son sustratos adecuados para sustentar el crecimiento de las BAL, provocando el descenso de la masa hasta un valor de pH de 4.0. Posteriormente, las levaduras que muestran tolerancia al ambiente ácido son los microorganismos

predominantes en este proceso (Calvert *et al.*, 2021; Hernández-Parada *et al.*, 2023).

Las BAL fermentan la maltosa, el cual es el carbohidrato principal presente en la harina de trigo; estas bacterias pueden presentar un metabolismo homofermentativo, produciendo más del 85% de ácido láctico o bien pueden presentar un metabolismo heterofermentativo produciendo hasta un 50% de ácido láctico y otros metabolitos como ácido acético, etanol y CO_2 . El tipo de metabolismo de estas bacterias influye así en las propiedades de los productos panificados producidos. Se ha demostrado que el ácido acético endurece el gluten presente en la masa, mientras que el ácido láctico lo vuelve más elástico. Con respecto a las levaduras, a pesar de estar presentes en menor proporción su presencia en la masa madre es indispensable para una correcta fermentación debido a que las levaduras son responsables de la mayor producción de CO_2 en la masa (Romero-Isaza, 2023).

Las levaduras y las BAL presentes en la masa madre pueden presentar interacciones sinérgicas o antagónicas basadas en el metabolismo de los carbohidratos y aminoácidos, así como la producción de CO_2 . Estas relaciones dependen de diversos factores ambientales como el pH, la temperatura, la cantidad de sustrato disponible y la competencia por sustrato que se da entre estos microorganismos (Gobbetti *et al.*, 2014). Cada especie de microorganismo presenta condiciones óptimas de crecimiento diferentes, por lo cual la proporción entre microorganismos varía de un tipo de masa a otra con respecto al tipo de ingredientes, número de pasos de propagación de la masa madre, el tiempo, la temperatura de fermentación

y el grado de hidratación de la masa. Además, el tipo de interacción entre la población microbiana afecta también la síntesis de compuestos volátiles que contribuyen al sabor y aroma de los productos elaborados a partir de la masa madre, por lo cual es de gran importancia una adecuada formulación de cultivos que presenten una fuerte compatibilidad y asociación microbiana (Romero-Isaza, 2023). La primera levadura aislada del proceso de fermentación de masa madre fue *Saccharomyces exiguus*, la cual establece un ejemplo de relación trófica adecuada con la especie de *Fructobacillus sanfranciscensis* (anteriormente *Lactobacillus sanfrancisco*). Estos microorganismos fueron aislados de un proceso de producción de pan en San Francisco. Estos microorganismos no compiten por sustrato, *S. exiguus* es negativo a maltosa mientras que *L. sanfrancisco* es positivo. Además de que *L. sanfrancisco* hidroliza la maltosa en dos moléculas de glucosa, metabolizando sólo una de estas y permitiendo que *S. exiguus* se alimente de la molécula de glucosa restante. Además, se ha comprobado que *S. exiguus* libera compuestos nitrogenados que benefician el crecimiento de *L. sanfrancisco* (De Vuyst *et al.*, 2014). A continuación, se describirán las funciones principales realizadas por las BAL y las levaduras durante la fermentación de masa madre.

Función de las BAL en la fermentación de masa madre

Las BAL son los microorganismos predominantes en este proceso, alcanzando una concentración celular de 10^8 - 10^9 UFC/g. Estas bacterias son responsables de la acidificación de la masa madre. Las especies de BAL heterofermentativas también pueden contribuir de forma parcial en el proceso de leudado por lo que su

participación en este proceso es más importante que el realizado por las BAL homofermentativas. Los ácidos orgánicos producidos por las BAL disminuyen el pH de la masa a valores inferiores a 4.5. La relación entre la concentración de ácido láctico y el ácido acético producidos durante la fermentación de la masa madre es un parámetro importante conocido como cociente de fermentación (FQ). El FQ debe estar entre 2.0 y 2.7 para conseguir un buen pan a partir de la masa madre, ya que su valor influye en las propiedades sensoriales de los panes de masa madre (Hernández-Parada *et al.*, 2023).

Por otro lado, las BAL tienen la capacidad de hidrolizar parcialmente el almidón, realizan proteólisis y acidifican la masa por lo que el pan que se obtiene de esta masa tiene una miga blanda y de sabor agradable. Además, aumentan la biodisponibilidad de los minerales mediante la degradación de los fitatos e impiden el crecimiento de microorganismos de descomposición. La actividad proteolítica que poseen algunas cepas de BAL libera aminoácidos y péptidos que estimulan su crecimiento, así como la síntesis de vitaminas del complejo B y ácidos grasos volátiles, lo cual, a su vez, brinda mejores condiciones de crecimiento para la levaduras (Suo *et al.*, 2021), ver Figura 2. Las especies de BAL que más se han reportado en la masa madre pertenecen a los géneros de *Lactobacillus*, *Lactiplantibacillus*,

Fructobacillus, *Levilactobacillus* y *Limosibacillus*. Otros géneros menormente encontrados en esta fermentación son *Leuconostoc*, *Weissella*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, *Enterococcus* y *Streptococcus* (Hernández-Parada *et al.*, 2023).

Función de las levaduras en la fermentación de masa madre

Las levaduras están presentes en la fermentación de la masa madre en concentraciones celulares de entre 10^6 y 10^7 UFC/g, y son responsables de la acción leudante de la masa madre. La relación entre BAL y levaduras que se encuentra en la masa madre es generalmente de 100:1. Las levaduras producen además compuestos aromáticos que armonizan el sabor del pan producido con la masa madre. Por otro lado, las levaduras presentes en la masa madre deben mostrar tolerancia a ambientes con bajos valores de pH, altas concentraciones de carbohidratos y alta concentración de BAL. Las levaduras mejoran el sabor del pan mediante la producción de metabolitos que confieren sabores, como ésteres, aldehídos y acetoína. Otros compuestos producidos por las levaduras, como el glutatión, el glicerol y el ácido pirúvico, contribuyen a la textura del pan mejorando la red de gluten. Las especies de levaduras más reportadas en la masa madre pertenecen a los géneros *Saccharomyces*, *Candida*, *Pichia*, *Torulaspura* y *Rhodotorula* (Hernández-Parada *et al.*, 2023).

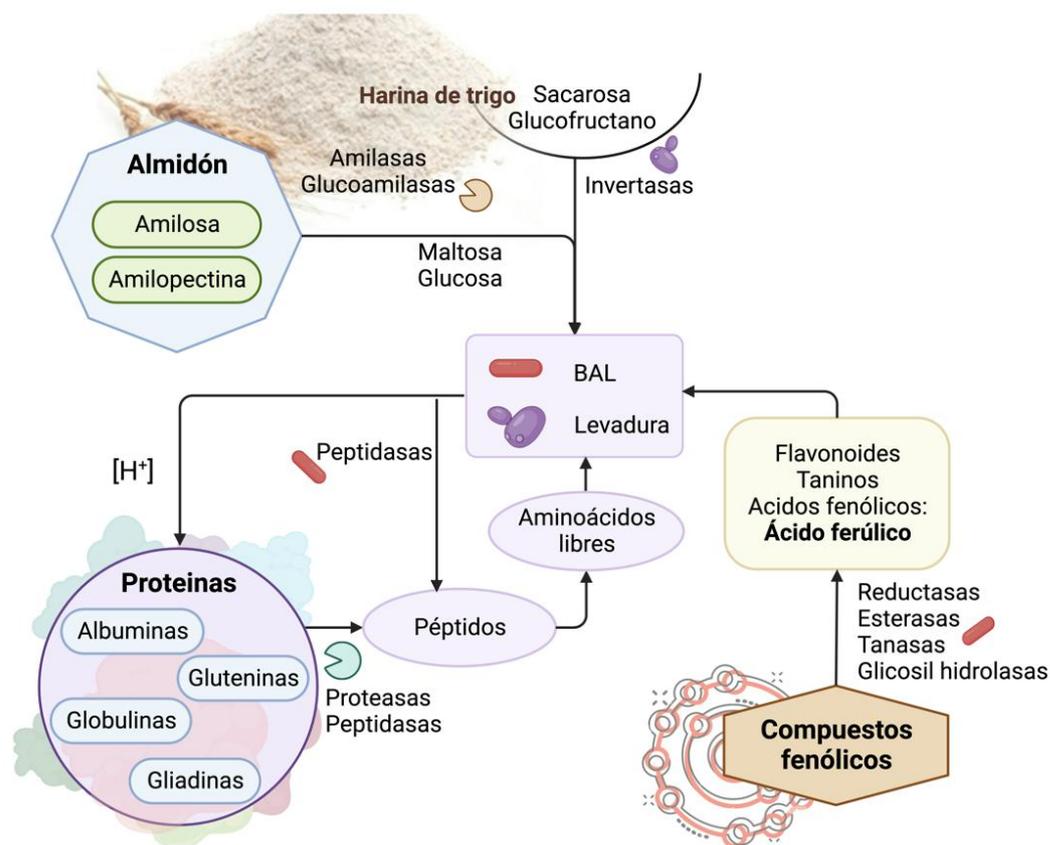


Figura 2: Principales transformaciones realizadas por los microorganismos durante la fermentación de masa madre. Figura creada con Biorender.com

Cultivos iniciadores para el proceso de fermentación de masa madre

Como ya se mencionó la fermentación de la masa madre se lleva a cabo de forma natural por los microorganismos presentes en el ambiente y en la materia prima empleada. Sin embargo, esta fermentación también puede ser dirigida por medio de la adición de cultivos iniciadores conformados principalmente por una o más especies conocidas de bacterias ácido lácticas y levaduras. Un cultivo iniciador puede ser definido como una preparación de microorganismos vivos con alta concentración celular que se utiliza de forma deliberada para acelerar la fermentación, provocando cambios específicos en el sustrato alimentario y sus propiedades sensoriales, obteniéndose un producto más homogéneo. La utilización de cultivos iniciadores en la fermentación

de masa madre es actualmente una práctica común debido a que aumenta el rendimiento y las características de los productos finales obtenidos. La mayor parte de los estudios publicados se han centrado en estudiar cepas de microorganismos aislados de otros ecosistemas alimentarios. Los criterios utilizados para realizar la selección de las cepas microbianas que formaran parte del cultivo iniciador son diversos, y se factores tecnológicos, bioquímicos y nutricionales, por lo cual es necesario tener pleno conocimiento del comportamiento y características del microorganismo que se va a utilizar. Es relevante considerar la velocidad de crecimiento y la tasa de acidificación (en el caso específico de las BAL) con el fin de facilitar la fermentación. Otros criterios importantes son la síntesis de compuestos volátiles, actividad

enzimáticas como la fitásica, celulolítica, proteolítica y amilolítica, producción de compuestos antifúngicos, degradación de acrilamida y tolerancia a condiciones ácidas. La selección adecuada de los microorganismos que se van a utilizar como cultivos iniciadores es de suma importancia para su aplicación en el proceso de fermentación de masa madre, ya que influye significativamente en las características de la masa final, el pH y la temperatura de fermentación, y esto a su vez en el pan elaborado con esta masa (Hernández-Parada *et al.*, 2023). Finalmente, es importante destacar que la información disponible sobre la selección de levaduras con el fin de ser aplicadas a la elaboración de masa madre es todavía limitada, ya que se ha estudiado más la aplicación de BAL en este proceso (Arora *et al.*, 2021).

Criterios de selección relevantes para la selección de levaduras para el proceso de masa madre

Las levaduras son microorganismos con múltiples aplicaciones en la industria alimentaria debido a su capacidad fermentativa. En la masa madre, las levaduras tienen diversas contribuciones como el leudado, es decir, el incremento de su volumen debido a los gases (principalmente CO_2). También, producen diversos metabolitos secundarios que aportan al sabor de los productos elaborados; contribuyen a la calidad nutricional al contribuir con la producción de vitaminas, presentar potencial probiótico y mejorar la biodisponibilidad de los minerales debido a su actividad fitásica. También pueden mejorar la biodisponibilidad de los compuestos fenólicos (ver Figura 2). Por todo lo anterior, diversas cepas de levaduras ofrecen beneficios más allá de la tradicional levadura de panadería, por lo que pueden considerarse candidatos potenciales para su uso en cultivos iniciadores para la fermentación de

masa madre (Romero-Isaza, 2023).

El perfil de carbohidratos de la harina se compone típicamente por sacarosa, glucosa, fructosa y maltosa, siendo este último disacárido el más abundante. Las levaduras metabolizan estos carbohidratos convirtiéndolos finalmente en CO_2 y etanol, productos que determinan las propiedades de la masa. Por otro lado, las actividades enzimáticas desarrolladas por las levaduras son relevantes para realizar el cribado de las levaduras que serán utilizadas como cultivos iniciadores de la masa madre. La actividad amilolítica (degradación de almidón) y celulolítica (degradación de la celulosa) permiten la liberación de carbohidratos de fácil acceso a partir de polisacáridos. Además, en la masa madre, la disminución del pH debido a la acción de las BAL aumenta la actividad de enzimas hidrolíticas extracelulares producidas por las levaduras, tales como las amilasas, en especial la α -amilasa, y las celulasas como la β -glucosidasas. Algunas levaduras que poseen actividad amilolítica son: *Saccharomycopsis capsularis*, *Saccharomycopsis fibuligera*, *Pichia burtonii* y *Wickerhamomyces anomalus*. En cambio, las especies de *Candida tropicalis*, *Debaryomyces hansenii*, *Pichia kudriavzevii* y *W. anomalus* presentan actividad celulolítica (Romero-Isaza, 2023).

Otra actividad enzimática importante es la proteolítica. Esta actividad disminuye la inmunogenicidad del gluten presente en las harinas, y además puede generar compuestos bioactivos y precursores de aroma y sabor (Gobbetti *et al.*, 2014). La acción de las proteasas también ha demostrado disminuir la tasa de endurecimiento de los panes, aumentando así su vida de anaquel. Algunas levaduras que

presentan esta actividad enzimática son: *Debaryomyces hansenii*, *Yarrowia bubula* y *Y. alimentaria* (Romero-Isaza, 2023).

La actividad fitásica, es otro criterio importante para la selección de levaduras. La fitasa hidroliza el fitato a inositol y ácido fosfórico libre y su actividad es muy importante desde el punto de vista nutricional debido a que el fitato forma complejos queloides con minerales como el calcio, hierro, magnesio y zinc, al actuar la fitasa se aumenta la biodisponibilidad de estos minerales. Algunas especies que presentan este tipo de actividad son: *S. pastorianus*, *Candida glabrata*, *W. anomalus*, *Kluyveromyces lactis* y *S. cerevisiae* (Romero-Isaza, 2023).

Además, es necesario que las levaduras que serán aplicadas como cultivos iniciadores sean inocuas. Una forma de evaluar la patogenicidad de las levaduras es la detección de su capacidad de producir hemolisinas (actividad hemolítica), en forma de exoenzimas o toxinas, las cuales pueden lisis los glóbulos rojos y de esta forma acceder al hierro que forma parte de la hemoglobina, y es un importante factor de crecimiento de los microorganismos durante una infección. En el caso de algunas levaduras, como por ejemplo de género *Candida*, han demostrado la capacidad de excretar proteínas hemolíticas como estrategia de supervivencia durante infecciones oportunistas, lo cual permite acceder al hierro y facilitar la diseminación de las hifas en el organismo. Algunos ejemplos de levaduras hemolíticas son: *Candida albicans*, *C. glabrata*, *C. parapsilosis*, *C. tropicalis*, *Pichia krusei*

y *C. guilliermondi* (Romero-Isaza, 2023)

Fermentación del café como fuente de levaduras con potencial de uso para la fermentación de masa madre

La fermentación del café se refiere a la etapa de su procesamiento (húmedo o seco) en la cual la pulpa y el mucílago que recubren el grano son metabolizados por la acción de diversos microorganismos, cuya diversidad depende del ecosistema. Estos microorganismos producen metabolitos secundarios que favorecen las características finales del café y son característicos de la cereza de café recolectada, aunque también pueden provenir de diversas fuentes tales como el suelo, la lluvia, los lugares de fermentación, la superficie de los frutos, el agua de riego, el aire, entre otros. Se ha observado que el proceso de fermentación del café durante el procesamiento seco presenta una mayor complejidad y variabilidad en el perfil microbiano que en la fermentación húmeda relacionada con el procesamiento húmedo del café. Dentro de la microbiota encontrada en el proceso de fermentación del café se destacan bacterias (enterobacterias, BAL y ácido-acéticas), levaduras (*Pichia*, *Debaryomyces*, *Sacharomyces*, y *Candida*) y hongos filamentosos (*Aspergillus*, *Penicillium*, y *Fusarium*) (DeBruyn *et al.*, 2017; Romero-Isaza, 2023). Algunas de las especies de levaduras se encuentran comúnmente durante la fermentación del café en diversas regiones del mundo, otras por el contrario son específicas de áreas geográficas determinadas. En la Tabla 1 se muestran algunas especies predominantes de levaduras autóctonas encontradas en diversos países durante el procesamiento húmedo y seco del café.

| Levadura (especie) | País | Procesamiento | Referencia |
|---|-----------------|---------------|--|
| <i>Debaryomyces hansenii</i> <i>Pichia ohmeriensis</i> <i>Pichia anomala</i> (<i>Wickerhamomyces anomalus</i>) <i>Pichia fermentans</i> | Brasil | Húmedo | (De Melo Pereira et al., 2014) (Silva et al., 2000) (Silva et al., 2008) |
| <i>Saccharomyces marxianus</i> <i>Schizosaccharomyces</i> | India | Seco | (Agate y Bhat, 1966) (Velmourougane, 2013) |
| <i>Cryptococcus albidus</i> <i>Kloeckera apis apiculata</i> <i>Cryptococcus laurentii</i> | México | Húmedo | (Avallone et al., 2001) |
| <i>Hanseniaspora uvarum</i> <i>Candida pseudointermedia</i> | África Oriental | Húmedo | (Masoud et al., 2004) |
| <i>Pichia kudriavzevii</i> | Australia | Húmedo | (Elhalis et al., 2020) |

Tabla 1: Tabla de especies de levaduras y sus características.

Cabe destacar que algunas de las especies que se han reportado como nativas en el proceso de fermentación del café, también se han encontrado durante la fermentación de masa madre, posiblemente serán cepas diferentes, ya que están adaptadas a su ecosistema, sin embargo, estas especies que se encuentran en ambas fermentaciones, pueden ser buenas candidatas para

ser aplicadas como iniciadores de la fermentación de masa madre. Una de las especies de levaduras que presenta una gran potencialidad es *Wickerhamomyces anomalus* (*Pichia anomala*). Esta especie, además de que se encuentra en la fermentación del café y masa madre, presenta actividades enzimáticas importantes para ser aplicado como cultivo iniciador, como la proteolítica,

fitásica, celulolítica y amilolítica (Brexó *et al.*, 2020; Daniel *et al.*, 2011; Elhalis *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021). También está especie de *W. anomalus* ha mostrado tener potencial probiótico (Helmy *et al.*, 2019). Sin embargo, tendría que realizarse, la evaluación de su desempeño como cultivo iniciador, porque estas características dependen de la cepa utilizada.

Conclusión

Las levaduras son microorganismos que se encuentran en una gran cantidad de fermentaciones, algunas de éstas pueden tener diversas aplicaciones como cultivos iniciadores. En particular, algunas de las levaduras autóctonas de la microbiota de fermentación del café podrían ser seleccionadas para la formulación de cultivos iniciadores para el proceso de fermentación de masa madre. Para seleccionar adecuadamente la cepa de levadura a utilizar es necesario realizar un estudio en donde se realice una caracterización fisiológica, metabólica y funcional de éstas, considerando criterios como la capacidad leudante, la tolerancia a pH ácidos, la producción de compuestos volátiles, su actividad enzimática y criterios de seguridad (como la actividad hemolítica). De gran importancia es la determinación de las actividades enzimáticas como fitásica, proteolítica, amilolítica y celulolítica, para el desempeño de la levadura evaluada como cultivo iniciador. Cabe mencionar que se ha reportado que la especie *W. anomalus* forma parte de la microbiota del café y masa madre, presenta todas las actividades enzimáticas antes mencionadas, tiene buena tolerancia a los ambientes ácidos e incluso tiene propiedades potencialmente probióticas. Por estas razones, las cepas de la especie *W. anomalus* aisladas del café podrían ser buenas candidatas para utilizarse en

cultivos iniciadores para la fermentación de masa madre; sin embargo, no se podría descartar la potencialidad de otras cepas de otras especies.

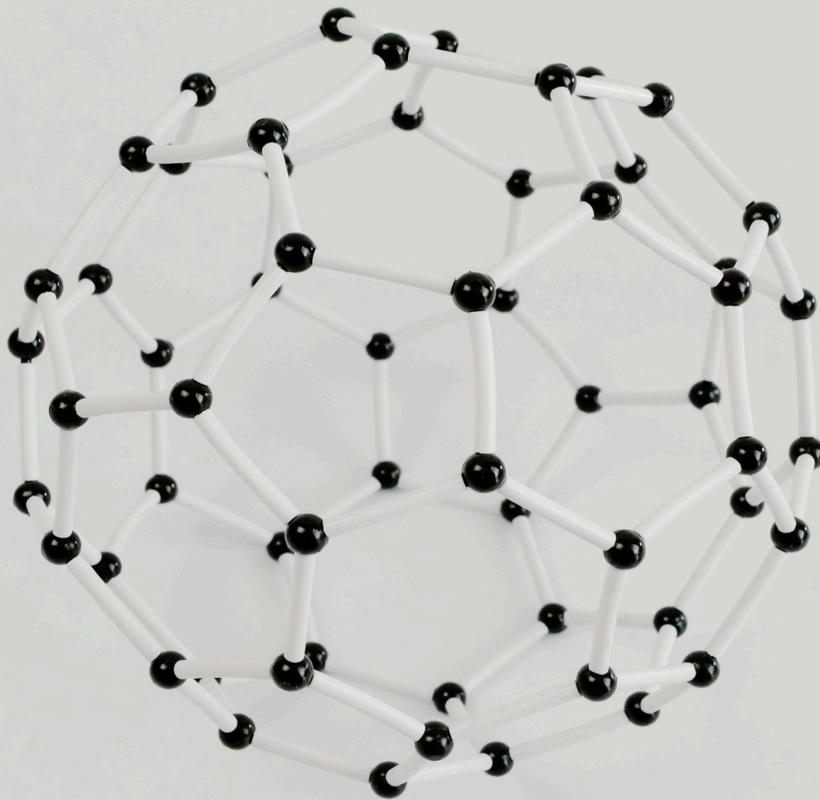
Referencias

- [1] Agate, A. D., y Bhat, J. V. Role of pectinolytic yeasts in the degradation of mucilage layer of *Coffea robusta* cherries. *Appl Microbiol*, 14[2], pp. 256-260. 1966.
- [2] Arora, K., Ameer, H., Polo, A., Di Cagno, R., Rizzello, C. G., y Gobbetti, M., Thirty years of knowledge on sourdough fermentation: A systematic review. *Trends Food Sci Technol*, 108, pp. 71–83. 2021.
- [3] Avallone, S., Guyot, B., Brillouet, J.-M., Olguin, E., y Guiraud, J.-P. (2001). Microbiological and biochemical study of coffee fermentation. *Curr Microbiol*, 42[4], pp. 252-256. 2001.
- [4] Brexó R. P., Brandão, L. R., Chaves, R. D., Castro, R. J. S., Câmara, A. A., Rosa, C. A., y Sant'Ana, A. S. Yeasts from indigenous culture for cachaça production and brewer's spent grain: Biodiversity and phenotypic characterization for biotechnological purposes. *Food Bioprod Process*, 124, pp. 107–120. 2020.
- [5] Calvert, M. D., Madden, A. A., Nichols, L. M., Haddad, N. M., Lahne, J., Dunn, R. R., y McKenney, E. A. A review of sourdough starters: Ecology, practices, and sensory quality with applications for baking and recommendations for future research. *Peer J*, 9, pp. e11389.2021.
- [6] Daniel, H. M., Moons, M. C., Huret, S., Vrancken, G., y De Vuyst,

- L. *Wickerhamomyces anomalus* in the sourdough microbial ecosystem. *Antonie van Leeuwenhoek*, 99, pp. 63-73. 2011.
- [7] De Bruyn, F., Zhang, S. J., Pothakos, V., Torres, J., Lambot, C., Moroni, A. V., Callanan, M., Sybesma, W., Weckx, S., y De Vuyst, L. Exploring the impacts of postharvest processing on the microbiota and metabolite profiles during green coffee bean production. *Appl Environ Microbiol*, 83[1], pp. e02398-16.2017.
- [8] De Melo Pereira, G. V., Soccol, V. T., Pandey, A., Medeiros, A. B. P., Andrade Lara, J. M. R., Gollo, A. L., y Soccol, C. R.. Isolation, selection and evaluation of yeasts for use in fermentation of coffee beans by the wet process. *Int J Food Microbiol*, 188, pp. 60-66. 2014.
- [9] De Vuyst, L., Van Kerrebroeck, S., Harth, H., Huys, G., Daniel, H.-M., y Weckx, S. Microbial ecology of sourdough fermentations: Diverse or uniform? *Food Microbiol*, 37, pp.11–29. 2014.
- [10] Elhali, H., Cox, J., y Zhao, J. Ecological diversity, evolution and metabolism of microbial communities in the wet fermentation of Australian coffee beans. *Int J Food Microbiol*, 321, pp.108544. 2020.
- [11] Evangelista, S. R., Miguel, M. G. da C. P., Silva, C. F., Pinheiro, A. C. M., y Schwan, R. F. (2015). Microbiological diversity associated with the spontaneous wet method of coffee fermentation. *Int J Food Microbiol*, 210, pp. 102–112. 2015.
- [12] Garofalo, C., Silvestri, G., Aquilanti, L., y Clementi, F. (2008). PCR-DGGE analysis of lactic acid bacteria and yeast dynamics during the production processes of three varieties of Panettone. *J Appl Microbiol*, 105[1], pp. 243–254. 2008.
- [13] Gobbetti, M., Rizzello, C. G., Di Cagno, R., y De Angelis, M. (2014). How the sourdough may affect the functional features of leavened baked goods. *Food Microbiol*, 37, pp. 30-40. 2014.
- [14] Helmy, Soliman, S. A., Abdel-Ghany, T. M., y Ganash, M. Evaluation of potentially probiotic attributes of certain dairy yeast isolated from buffalo sweetened Karish cheese. *Heliyon*, 5[5], pp. e01649. 2019.
- [15] Hernández-Parada, N., González-Ríos, O., Suárez-Quiroz, M. L., Hernández-Estrada, Z. J., Figueroa-Hernández, C. Y., Figueroa-Cárdenas, J. de D., Rayas-Duarte, P., y Figueroa-Espinoza, M. C. (2023). Exploiting the Native Microorganisms from Different Food Matrices to Formulate Starter Cultures for Sourdough Bread Production. *Microorganisms*, 11[1], pp.109. 2023.
- [16] Kulathunga, J., Whitney, K., y Simsek, S. Impact of starter culture on biochemical properties of sourdough bread related to composition and macronutrient digestibility. *Food Biosci*, 53, pp. 102640. 2023.
- [17] Lhomme, E., Urien, C., Legrand, J., Dousset, X., Onno, B., y Sicard, D. Sourdough microbial community dynamics: An analysis during French organic bread-making processes. *Food Microbiol*, 53, pp. 41–50. 2016.

- [18] Li, Zhou, M., Cui, M., Wang, Y., y Li, H. Improvement of whole wheat dough fermentation for steamed bread making using selected phytate-degrading *Wickerhamomyces anomalus* P4. *J Cereal Sci*, 100, pp. 103-261. 2021.
- [19] Masoud, W., Cesar, L. B., Jespersen, L., y Jakobsen, M. Yeast involved in fermentation of *Coffea arabica* in East Africa determined by genotyping and by direct denaturing gradient gel electrophoresis. *Yeast*, 21[7], pp. 549-556. 2004.
- [20] Siepmann, F. B., Sousa de Almeida, B., Waszczynskyj, N., y Spier, M. R. Influence of temperature and of starter culture on biochemical characteristics and the aromatic compounds evolution on type II sourdough and wheat bread. *LWT-Food Sci Technol*, 108, pp. 199-206. 2019.
- [21] Silva, C. F., Batista, L. R., Abreu, L. M., Dias, E. S., y Schwan, R. F. Succession of bacterial and fungal communities during natural coffee (*Coffea arabica*) fermentation. *Food Microbiol*, 25[8], pp. 951-957. 2008.
- [22] Silva, C. F., Schwan, R. F., Sousa Dias, E., y Wheals, A. E. Microbial diversity during maturation and natural processing of coffee cherries of *Coffea arabica* in Brazil. *Int J Food Microbiol*, 60[2], pp. 251-260. 2000.
- [23] Siridevi, G. B., Havare, D., Basavaraj, K., y Murthy, P. S. Coffee starter microbiome and in-silico approach to improve Arabica coffee. *LWT - Food Sci Technol*, 114, pp. 108382. 2019.
- [24] Suo, B., Chen, X., y Wang, Y. Recent research advances of lactic acid bacteria in sourdough: Origin, diversity, and function. *Curr Opin Food Sci*, 37, pp. 66-75. 2021
- [25] Romero-Isaza, S.P. Aislamiento y caracterización de levaduras autóctonas del café para la formulación de cultivos iniciadores de masa madre: Tecnológico Nacional de México-Instituto Tecnológico de Veracruz [Tesis Maestría], México, pp. 7-27. 2023
- [26] Velmourougane, K. Impact of natural fermentation on physicochemical, microbiological and cup quality characteristics of Arabica and Robusta coffee. *Proc Natl Acad Sci India Sect B Biol Sci*. 83[2], pp. 233-239. 2013.
- [27] Vrancken, G., De Vuyst, L., Van Der Meulen, R., Huys, G., Vandamme, P., y Daniel, H. M. Yeast species composition differs between artisan bakery and spontaneous laboratory sourdoughs. *FEMS Yeast Res*, 10[4], pp. 471-481. 2010.

¿La intuición a veces puede traicionarte?



Dr. Francisco J. Valdés Parada

Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica.
Universidad Autónoma Metropolitana- Iztapalapa.

M.C. Jessica Sánchez Vargas

Departamento de Biología Molecular y Biotecnología,
Instituto de Investigaciones Biomédicas,
Universidad Nacional Autónoma de México

Abstract

Modeling transport phenomena in systems that involve multiple scales can be performed without ambiguities at the continuum scale level. However, when it is necessary to account for models at higher scale levels and that involve more phases, the same level of clarity and acceptance of the transport equations is not achieved. On the one hand, a rapid solution to this situation consists of using intuitive models founded on (natural or artificial) learning. On the other hand is the rigorous derivation of models at higher scale levels. In this work, both approaches are discussed and the relation that they have. The goal is to show the reader that one approach does not exclude the other and that it is worth dedicating time to discuss both points of view to carry out (rapid or rigorous) solutions to practical problems in science and engineering.

Keywords: Multiphase and multiscale models, upscaling, intuition, neuronal networks

Resumen

El modelado de fenómenos de transporte en sistemas que involucran escalas múltiples puede llevarse a cabo sin ambigüedades al nivel del continuo. Sin embargo, cuando se desea contar con modelos a niveles de escala superiores y que involucran más fases, no se cuenta con el mismo nivel de claridad y aceptación de las ecuaciones de transporte. Por un lado, una solución rápida a esta situación consiste en usar modelos intuitivos fundamentados en el aprendizaje (natural o artificial). Por otro lado, está la deducción rigurosa de los modelos en niveles de escala superiores. En este trabajo se discuten ambos enfoques y la relación que guardan entre sí. El propósito es mostrar al lector que un enfoque no es excluyente

del otro y que vale la pena dedicar tiempo a aprender de ambos puntos de vista para llevar a cabo soluciones (rápidas o rigurosas) de problemas prácticos en ciencias e ingeniería.

Palabras clave: Modelos multifásicos y multiescala, escalamiento, intuición, redes neuronales.

1. Introducción

Imagina que tienes una dolencia intensa en tu cuerpo; acudes pronto al médico y te da un remedio para el dolor. Además, te recomienda que resuelvas el problema de raíz, te hagas estudios y acudas con un especialista. Sin embargo, como ya no sientes dolor, decides no atender la recomendación y sigues con tu vida. Podrías tener suerte y que se tratase de algún mal pasajero. Si este no es el caso, esta decisión podría traducirse en más problemas en el futuro. Una situación análoga tiene lugar en ocasiones en ingeniería o en la ciencia en general. En este sentido, pueden identificarse dos niveles de profundidad en la búsqueda de una explicación (Liu *et al.*, 2024). Por un lado están las explicaciones más burdas/fáciles/correlacionales, las cuales podrían ser análogas al uso de un tratamiento paliativo. Por otro lado, están las más finas/rigurosas/causales, las cuales pueden asociarse con los tratamientos médicos dados para resolver la razón de tus dolencias. En ingeniería, en muchos casos, se utilizan modelos matemáticos para reproducir resultados experimentales. Sin embargo, no siempre existe un modelo previamente deducido para cada aplicación. Una solución rápida sería usar un modelo que haya probado ser exitoso en un sistema similar o bien proponer intuitivamente un nuevo modelo. Si dicho modelo reproduce, tras ajustes paramétricos, los resultados experimentales, adquiere credibilidad

y popularidad. La desventaja de esta solución es que los modelos suelen estar basados en suposiciones, implícitas o explícitas, que limitan su aplicación a ciertas condiciones y tipos de sistema. Más aún, en el caso de las suposiciones implícitas, se corre el riesgo de promover aplicaciones no fundamentadas que lleven a problemas a futuro. De hecho, no necesariamente porque un modelo matemático reproduzca datos experimentales se debe concluir, de inmediato, que el modelo es físicamente correcto. Más aún, como se mostrará más adelante, cuando este tipo de modelos heurísticos no aportan resultados satisfactorios se suelen proponer correcciones de la misma forma en la que fueron propuestos los modelos originales. La alternativa, al igual que en la analogía inicial, es deducir rigurosamente el modelo matemático correspondiente. Lo cual permite también desarrollar versiones más sofisticadas al relajar algunas de las suposiciones involucradas en la deducción del modelo.

Lo descrito anteriormente ocurre más frecuentemente en sistemas *multifásicos*¹ y *multiescala*². En ingeniería se concibe al nivel de escala del continuo como aquel en el que pueden definirse fases, las cuales están separadas entre sí por interfases. De esta forma, aunque la jerarquía de niveles de escala puede ser muy amplia, en este texto se considera el nivel de escala del continuo (*microescala*) y solo un nivel de escala superior donde hay dos o más fases involucradas (*macroescala*). En este caso, suelen adoptarse modelos con semejanza estructural a sus contrapartes en la microescala o recurrir a ecuaciones empíricas basadas en observaciones experimentales. O incluso, desde años más recientes, se emplean herramientas

derivadas de redes neuronales, para calcular, por ejemplo, los coeficientes del modelo en la macroescala.

¹Sistemas que, a cierto nivel de escala, comprenden más de una fase.

²Sistemas donde existen dos o más niveles de escala interrelacionados.

El objetivo de este trabajo es discutir acerca de los enfoques intuitivo y riguroso para el modelado de fenómenos de transporte en sistemas multiescala. Para ello, el resto de este trabajo está organizado como sigue: en la sección 2 se explica la diferencia entre formular modelos en la microescala (donde hay un alto grado de certidumbre) y en la macroescala (donde los modelos pueden proponerse de forma intuitiva o mediante técnicas rigurosas). Esto se ilustra con dos ejemplos sencillos: flujo de un fluido en un medio poroso y difusión y reacción en partículas catalíticas. Si bien las deducciones intuitivas pueden darse de forma natural con base en el conocimiento aprendido, también pueden darse de manera artificial usando redes neuronales. Esto último se discute a detalle en la sección 3. Por último, se presentan algunas reflexiones finales en la sección 4.

2. Modelado en escalas múltiples

En términos de fenómenos de *transporte*³, las ecuaciones que gobiernan lo que ocurre en la microescala son bien conocidas y aceptadas por la comunidad científica, pues tienen un sustento sólido en la termodinámica de los procesos irreversibles (De-Groot y Mazur 2011). Sin embargo, actualmente la solución de las ecuaciones gobernantes en la microescala solo puede llevarse a cabo en sistemas de tamaños que no sean prohibitivos computacionalmente mediante simulaciones numéricas

*directas*⁴. A niveles de escala superiores en donde se encuentra presente más de una fase, las ecuaciones gobernantes del transporte ya no cuentan con la misma claridad, aceptación universal y entendimiento como sus contrapartes en la microescala. Actualmente existen varias técnicas teóricas para deducir modelos de transporte en la macroescala (ver, por ejemplo, Battiato *et al.*, 2019) y aún no existe una técnica universalmente aceptada para deducir modelos a cualquier nivel de escala para cualquier tipo de transporte. Además, existe un uso extenso de modelos empíricos, y sus modificaciones, para el modelado de sistemas multifásicos y multiescala. A continuación se revisan dos ejemplos para ilustrar los puntos expuestos en esta sección que son: el transporte de cantidad de movimiento en medios porosos y el transporte de masa y reacción en partículas catalíticas.

2.1. Transporte de cantidad de movimiento en medios porosos

Imagina un medio poroso constituido por una fase fluida pasando por

los intersticios que se encuentran entre la fase sólida que compone la matriz del medio poroso. Este tipo de configuración puede encontrar aplicación en áreas como la medicina, hidrología subterránea, sistemas celulares, biotecnología, contaminación ambiental, entre muchas otras. Ahora considera que el flujo *incompresible*⁵, isotérmico, *reptante*⁶ y en estado *estacionario*⁷, mientras que el medio poroso es *rígido*⁸ y *homogéneo*⁹ como el mostrado en la figura 1.

³es decir, el estudio de la mecánica de fluidos, así como el transporte de calor y de especies químicas.

⁴de simulación computacional en la que se resuelven las ecuaciones al nivel de la microescala de forma numérica y sin suposiciones de escalamiento.

⁵es decir, que su densidad es constante.

⁶es decir, que las fuerzas de fricción superan a la inercia del fluido.

⁷es decir, que ninguna de las variables del sistema cambia con el tiempo.

⁸es decir, que la fase sólida no se mueve ni se deforma.

⁹es decir, que sus propiedades en la macroescala (como la porosidad) son constantes.

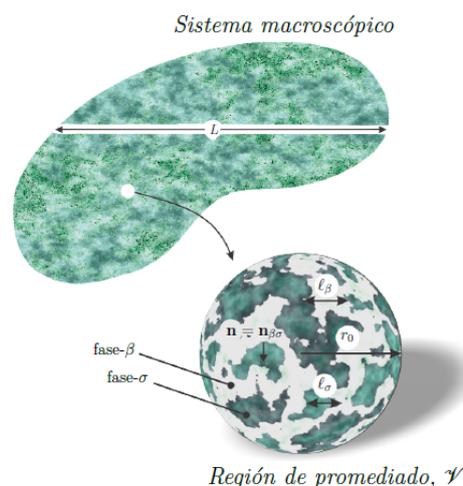


Figura 1: Esquema de un medio poroso compuesto por una fase fluida (fase- β) y una fase sólida (fase- σ). En este esquema se incluye además una región de promediado \mathcal{V} , cuya longitud característica, r_0 , es mucho mayor que las longitudes características en la microescala (ℓ_β , ℓ_σ) y, al mismo tiempo, mucho menor que la longitud característica de la macroescala, L .

Bajo estas condiciones tan particulares, las ecuaciones que gobiernan el transporte de masa total y la cantidad de movimiento en la fase fluida que satura los poros del sistema son las siguientes:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (1a)$$

$$\mathbf{0} = -\nabla \mathcal{P} + \mu \nabla^2 \mathbf{v}. \quad (1b)$$

En las ecuaciones anteriores, v , \mathcal{P} y μ representan la velocidad, presión (modificada por los esfuerzos volumétricos) y viscosidad del fluido en el medio poroso, respectivamente. Por simplicidad, se supone que la velocidad del fluido en la interfase con la fase sólida en el medio poroso es cero. El modelo macroscópico de cantidad de movimiento correspondiente a esta situación física fue propuesto de manera empírica por Darcy en el siglo XIX al notar que existe una relación lineal entre el gradiente de presión macroscópica aplicado y la velocidad promedio resultante del fluido. Lo anterior puede expresarse de la siguiente forma:

$$\langle v_x \rangle = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial \langle \mathcal{P} \rangle^\beta}{\partial x}. \quad (2)$$

En la ecuación anterior, $\langle v_x \rangle$ y $\langle \mathcal{P} \rangle^\beta$ representan respectivamente el promedio superficial de la componente x de la velocidad del fluido y el promedio intrínseco de la presión modificada.

Los operadores de promedio superficial e intrínseco de una variable

en la microescala ψ , se definen como sigue (Whitaker 1999):

$$\langle \psi \rangle = \frac{1}{V} \int_{\mathcal{V}} \psi dV, \quad (3a)$$

$$\langle \psi \rangle^\beta = \frac{1}{V_\beta} \int_{\mathcal{V}_\beta} \psi dV. \quad (3b)$$

Aquí, \mathcal{V} representa una región de promediado (cuyo volumen es V) que contiene porciones de las fases sólida y fluida del medio poroso (ver figura 1). De hecho, el espacio ocupado por la fase fluida en \mathcal{V} se denota como \mathcal{V}_β y su volumen es V_β . Por último, el coeficiente K en la ecuación (2) representa la permeabilidad del medio poroso, la cual sólo depende de la microestructura y no de las propiedades del fluido. Se verificó de manera experimental que el uso de este modelo está limitado por las suposiciones mencionadas al inicio de esta sección. Por lo anterior. En 1901 Forchheimer propuso la siguiente modificación a la ley de Darcy para estudiar el flujo en un medio poroso en condiciones de flujo laminar

$$-\frac{\partial \langle \mathcal{P} \rangle^\beta}{\partial x} = \frac{\mu}{K} \langle v_x \rangle + \rho \beta \langle v_x \rangle^2. \quad (4)$$

En esta ecuación ρ es la densidad del fluido y β es el coeficiente de resistencia inercial y debe determinarse experimentalmente. Como es de esperarse, la corrección de Forchheimer es sólo una de muchas modificaciones empíricas que se han hecho a la ley de Darcy. Fue hasta la segunda

mitad del siglo pasado que se hizo una deducción rigurosa de este modelo y se encontró que, a partir de las ecuaciones gobernantes en la microescala, se obtienen los siguientes modelos matemáticos en la macroescala (ver por ejemplo, el capítulo 3 de Whitaker 1999):

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{v} \rangle = 0, \quad (5a)$$

$$\langle \mathbf{v} \rangle = -\frac{\mathbf{K}}{\mu} \cdot \nabla \langle \mathcal{P} \rangle^\beta. \quad (5b)$$

En las ecuaciones anteriores puede notarse que la ecuación de conservación de masa (ecuación (5a)) guarda una forma exactamente igual que su contraparte en la microescala (ecuación (1a)) y que la ecuación de balance de cantidad de movimiento (ecuación (5b)) es una generalización en 3D de la ley de Darcy en la forma dada en la ecuación (2) y que no guarda un símil con su contraparte en la microescala (ecuación (1b)). Vale la pena destacar que los métodos de escalamiento (como la homogeneización o el *promediovolumétrico*¹⁰) permiten no sólo deducir el modelo en la macroescala, sino también predecir los coeficientes involucrados en el modelo, en este caso el tensor de permeabilidad K a partir de la solución de un problema de *cerradura*¹¹ asociado en un dominio representativo de la microescala. Esto constituye un esquema predictivo que no requiere de intuición o datos *experimentales*¹² para ser formulado o para predecir sus coeficientes. Más aún,

al relajar algunas de las suposiciones de partida en la formulación del modelo en la microescala, o bien durante el proceso de escalamiento, es posible deducir diversas modificaciones a la ley de Darcy y esto ha sido estudiado ampliamente en la literatura.

¹⁰Esta técnica consiste brevemente en los siguientes pasos: 1) aplicación de un operador de promediado (intrínseco o superficial) a las ecuaciones gobernantes en la microescala, 2) Intercambiar las operaciones de integración y diferenciación mediante los teoremas general del transporte y del promediado espacial, 3) Deducción, simplificación y solución formal de problemas de cerradura que permitan estimar las desviaciones locales respecto a las variables promedio y 4) Sustitución de la solución formal de los problemas de cerradura en el modelo obtenido en el paso 2) y, de ser pertinente, llevar a cabo simplificaciones adicionales al modelo macroscópico.

¹¹Este es un problema que se deduce para estimar las desviaciones de las propiedades bajo estudio respecto a sus valores promedio

¹²El que los modelos deducidos por métodos rigurosos puedan ser resultados sin la necesidad de datos experimentales no quiere decir que no haga uso de estos para fines de validación.

¹³Se le denomina como pseudo reacción a este coeficiente porque contiene los efectos de los coeficientes de adsorción, desorción y reacción.

2.2 Transferencia de masa y reacción en catalizadores porosos

Considera ahora un medio poroso con las mismas propiedades del ejemplo de la sección anterior (rígido, homogéneo, saturado por una sola fase fluida, etc.) solo que ahora la fase fluida lleva consigo a una especie química en solución diluida. Suponga que esta especie se transporta por difusión en la fase fluida y que tiene lugar una reacción química heterogénea de primer orden en los sitios activos localizados en la superficie de los sólidos que componen el medio poroso. La ecuación diferencial y la condición de

frontera interfacial que describen este caso de estudio en la microescala son las siguientes:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathcal{D} \nabla c), \quad \text{en la fase fluida,} \quad (6a)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathcal{D} \nabla c = kc, \quad \text{en la interfase sólido-fluido.} \quad (6b)$$

En las ecuaciones anteriores c representa la concentración molar de la especie química, \mathbf{n} es el vector unitario normal dirigido de la fase fluida a la sólida (ver figura 1), mientras que los coeficientes \mathcal{D} y k representan la difusión molecular y la pseudo reacción¹³ heterogénea. Usando la intuición y con algo de entrenamiento en el área de transferencia de masa en catalizadores porosos, resulta lógico proponer que el modelo en la macroescala sea el siguiente:

$$\phi \frac{\partial \langle c \rangle^\beta}{\partial t} = \phi \nabla \cdot (D_{ef} \nabla \langle c \rangle^\beta) - a_v k \langle c \rangle^\beta. \quad (7)$$

En la ecuación anterior, ϕ es la porosidad de la partícula catalítica, D_{ef} es el coeficiente de difusión efectiva, mientras que a_v es el área interfacial por unidad de volumen. El coeficiente de difusión efectiva debe depender de la microestructura del medio poroso y, además, ha habido un debate en la literatura sobre si este coeficiente depende o no de la reacción química. Esta pregunta es difícil de resolver con un modelo generado meramente de forma intuitiva, pues queda a consideración del autor y de los datos experimentales contra los que se valide el modelo. La anterior divergencia en opiniones no tendrá cabida en un modelo deducido de forma rigurosa, donde se identifican claramente las razones y suposiciones que llevan al modelo macroscópico. Retomando la ecuación (7), la incorporación de un término de reacción va de la mano con la idea de concebir al medio poroso como un

pseudo-continuo en donde se combina lo que ocurre en la fase fluida (y por ello se multiplican los términos de acumulación y difusión por la porosidad) y la reacción en la interfase sólido-fluido (la cual se multiplica por a_v).

A pesar de lo lógico y fácilmente aceptable que aparente ser el modelo dado en la ecuación (7), hay varios puntos débiles que pueden llevar a serios errores en su aplicación. Si el medio poroso no es *isótropo*¹⁴ la difusividad efectiva no puede ser un escalar, sino que debe ser un tensor de segundo orden. Lo anterior surge de forma similar al caso arriba expuesto para la permeabilidad del modelo de Darcy, que era originalmente un escalar, y se dedujo más tarde que debía ser, en general, un tensor de segundo orden. Más aún, la dependencia del coeficiente de difusión efectiva con la tasa de reacción debe ser clara. Esto último merece una explicación más detallada: ya que el modelo dado en la ecuación (7) tiene dos coeficientes de medio efectivo (la difusividad efectiva y la reacción efectiva, dada por $a_v k$). Si el coeficiente de difusión no dependiera de la reacción, entonces podría llevarse a cabo un experimento sin reacción para determinarlo y posteriormente un experimento con reacción para calcular el valor de $a_v k$. Sin embargo, si D_{ef} dependiera de la reacción química, la estrategia descrita arriba resulta inadecuada.

Lo anterior, claramente es una motivación para llevar a cabo deducciones rigurosas del modelo de transporte y reacción en la macroescala. Usando más de un tipo de técnica de escalamiento, se ha reportado en la literatura que, cuando el número de *Damköhler*¹⁵ es menor a la unidad, la ecuación (7) (reemplazando D_{ef} por

el tensor de segundo orden D_{ef}) es el resultado del escalamiento de sus contrapartes en la microescala (ver, por ejemplo, el capítulo 1 de Whitaker 1999). Sin embargo, cuando la tasa de reacción es superior a la difusión molecular, el coeficiente de difusión efectiva depende del número de Damköhler, en general. Por supuesto, el modelo discutido en esta sección es un caso particular y su uso está acotado por las suposiciones involucradas en su formulación. Por ejemplo, si el transporte de masa involucrara convección, si hubiera acumulación en la interfase sólido-fluido o bien si hubieran más especies químicas presentes, el modelo de medio efectivo de la ecuación (7) se modificaría sustancialmente y resultaría cada vez más difícil e incierto el modelo que podría surgir de postulaciones basadas en la intuición. Es por ello que la deducción rigurosa de modelos en la macroescala sigue siendo un campo de investigación activa en la actualidad.

¹⁴ es decir, si el transporte en la microescala no se da igual en todas las direcciones.

¹⁵ Este número adimensional relaciona la tasa de transporte por difusión respecto a la tasa de consumo por reacción.

Si bien ya se discutió sobre las ventajas de enfoques intuitivos y rigurosos para la deducción de modelos en la macroescala. Estos dos acercamientos pueden converger en el día a día. Más aún, hay ciertas aplicaciones, como la de redes neuronales, donde puede resultar difusa la línea que divide un modelo intuitivo de uno riguroso. Esto último se abordará en la siguiente sección.

3. Intuición artificial

Las redes neuronales artificiales, inspiradas en las redes neuronales biológicas, consisten en una red grande de varias capas de neuronas artificiales interconectadas. Se caracterizan por la propagación de señales desde una

capa de entrada, pasando a través de múltiples capas intermedias (ocultas), hasta llegar a una capa de salida. Toda red debe ser entrenada para efectuar de forma satisfactoria la operación para la que fue creada. Una red entrenada posee un conjunto de parámetros específicos que son ajustados de forma iterativa al tratar de minimizar una función de pérdida (localizada fuera de la red neuronal) durante el entrenamiento. A pesar de la variedad de redes neuronales existentes, aquí nos enfocaremos en las *PINNs*¹⁶, o Redes Neuronales Informadas por la Física. Éstas se caracterizan por contener dos partes importantes en su función de pérdida: Por un lado, se incorpora un término que calcula el error entre datos experimentales usados para entrenar la red y los datos de salida de la red neuronal con un determinado conjunto de parámetros. Por otro lado, se utilizan leyes físicas que pueden incluir ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera. La combinación de ambas partes de la función de pérdida guía el proceso de aprendizaje hacia soluciones que no sólo sean acordes con los datos experimentales disponibles, sino que también conserven sentido físico. De esta forma, el papel que juegan las ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera es fijar límites físicos que la red neuronal no debe violar en su búsqueda por encontrar una relación entre las variables de entrada y salida.

Es importante reconocer que las redes neuronales usadas actualmente se consideran, en general, modelos de caja negra. Lo anterior se debe a que, principalmente en redes complejas (como aquellas de aprendizaje *profundo*¹⁷), no hay completa claridad de los patrones específicos que reconoce cada una de las múltiples capas de transformaciones, ni de qué forma

contribuyen a la decisión final. A pesar de lo anterior, los modelos actuales de redes neuronales son funcionales en aplicaciones concretas en las ingenierías. Sin embargo, no suelen ser asociadas con la generación de conocimiento nuevo de un sistema (Liu *et al.*, 2024). Por lo anterior, podría decirse que las redes neuronales actuales, por lo general, asemejan a ese remedio paliativo que da el médico, como es también el caso de los modelos empíricos o correlaciones basadas en datos experimentales.

Para entrenar una red neuronal se requiere una gran cantidad de datos (del orden de miles a decenas de miles), cuyo número depende de la complejidad de la tarea (o número de parámetros que involucra), el tipo de red y la calidad de los datos (Bailly *et al.*, 2022). En muchos casos, la cantidad de datos disponibles en aplicaciones biológicas o ingenieriles no es suficiente para el uso de una red neuronal *convencional*¹⁸.

¹⁶del inglés Physics-Informed Neural Networks

¹⁷Es decir, aquellas que capturan patrones complejos mediante la interrelación y operación entre (al menos tres) capas neuronales ocultas.

¹⁸Al no tener suficientes datos, se promueve el sobreajuste durante el entrenamiento y esto evita que la red reconozca los patrones generales requeridos para llevar a cabo predicciones satisfactorias.

Como se mencionó arriba, el incorporar leyes físicas en las PINNs, permite reducir el número de datos necesarios para el entrenamiento al restringir el espacio de soluciones admitibles de la red. De esta forma, el algoritmo de aprendizaje alcanza más fácilmente la solución correcta y encuentra relaciones generales aún con pocos datos de entrenamiento (Kim y Lee 2024). Más aún, las PINNs subsanan también escenarios donde no se conocen (o se conocen parcialmente) las ecuaciones gobernantes mediante el uso de datos

experimentales. Esto último hace posible la aplicación de PINNs a problemas multiescala donde no se conoce el modelo en la macroescala pero probablemente sí se conozca el modelo en la microescala; es decir, donde no se cuenta con un modelo escalado.

A continuación se describirán dos ejemplos prácticos donde se desconoce el modelo escalado o la cerradura, y donde se pueden usar PINNs para subsanarlo. Para la primera, se plantea el uso de la red neuronal con el fin de evitar la necesidad de un problema de cerradura, el cual genera la relación entre la microescala y las variables en la macroescala. Para esto, se debe recordar que el escalamiento de las ecuaciones gobernantes en la microescala, usando, por ejemplo, el método del promedio volumétrico, implica un primer paso de promediado, seguido del uso de ciertos teoremas integrales. De esta forma, el modelo se expresa en términos de variables promedio e integrales de variables puntuales. Una desventaja que tienen las técnicas de escalamiento actuales es que para establecer una relación formal entre las variables en la microescala y en la macroescala, es necesario contar con un modelo lineal. Una alternativa a esto, es recurrir a una red neuronal para predecir directamente el resultado de la integral de las variables en la microescala. Esto se logra al entrenar la red para predecir el campo de la variable puntual y, posteriormente, llevar a cabo la integración. Con lo anterior se puede proceder a cerrar el modelo macroscópico. Para ilustrar la aplicación descrita en el párrafo anterior, conviene retomar la ecuación (1a). Tras la aplicación del operador de promediado superficial, definido en la ecuación (3a), se obtiene el siguiente resultado

$$\frac{1}{V} \int_V \nabla \cdot \mathbf{v} dV = 0. \quad (8)$$

Si ahora se aplica el teorema del promediado espacial (*Whitaker*1999)¹⁹

$$\langle \nabla \cdot \mathbf{a} \rangle = \nabla \cdot \langle \mathbf{a} \rangle + \frac{1}{V} \int_{\mathcal{A}_{\beta\sigma}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{a} dA, \quad (9)$$

al resultado anterior, se obtiene que

$$\nabla \cdot \langle \mathbf{v} \rangle + \frac{1}{V} \int_{\mathcal{A}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} dA = 0. \quad (10)$$

A diferencia del problema clásico de Darcy, donde no hay transporte de masa hacia la interfase fluido-sólido, aquí se permitió este escenario.

¹⁹En la ecuación (9), \mathbf{a} es una variable definida en la fase fluida en la microescala y es suave por tramos.

Lo anterior implica que el segundo término del lado izquierdo de la ecuación (10) no es cero, y se requiere calcular la integral de $\mathbf{n} \cdot \mathbf{v}$ entre el fluido y el sólido en la microescala. La estimación de este último término sería el objetivo de la generación de una red neuronal que, partiendo de los datos experimentales disponibles (como por ejemplo mediciones globales del transporte de masa total, elementos de la microestructura, entre otros) y rigiéndose por los modelos en la microescala y promedio (ecuación (10)), prediga el valor de esa integral. Así, el resultado podría sustituirse en la expresión (10) y, de esta forma, cerrar el modelo promedio. Un segundo caso consiste en utilizar una PINN para sustituir por completo el proceso de escalamiento. En esta aplicación, la diferencia reside en que el objetivo es que la red aprenda a predecir una variable promedio a partir de cierta información en la microescala la cual puede obtenerse mediante simulaciones numéricas directas. Es decir, no intenta escalar el modelo explícitamente, sino que aprende a obtener el resultado correcto sin que en algún momento se

deduzca un modelo en la macroescala. Por supuesto, es posible mejorar las predicciones al incorporar información adicional (por ejemplo, datos en la macroescala, ecuaciones diferenciales, condiciones de frontera, etc.) a la función de pérdida. Debe mencionarse que existen también aplicaciones de las redes neuronales a sistemas jerárquicos donde se requiere mayor grado de dominio de los métodos de escalamiento (Kim y Lee 2024). Un ejemplo son la generación de redes neuronales informadas por dichos métodos para la predicción de los esquemas de cerradura o de la forma promedio de las ecuaciones de transporte. Así también, existen aplicaciones de las redes para la solución de los problemas de cerradura, previamente deducidos.

4. Reflexiones finales

Como se detalló en las secciones anteriores, puede buscarse nuevo conocimiento, en general, por dos vías: La primera está impulsada por la aplicación, dentro de la cual se pueden incluir todo tipo de técnicas que surjan de la intuición humana o artificial. La intuición es útil como una solución pronta, pero no como un sustituto a una solución a largo plazo. La intuición (natural o artificial) sigue siendo intuición y debe tomarse con precaución, pues no pueden obtenerse respuestas ampliamente generalizables. La segunda vía de generación de conocimiento es aquella impulsada por la comprensión, generalmente basada en metodologías concretas, principios fundamentales y haciendo uso de herramientas matemáticas. La deducción rigurosa permite crear formas de pensar que no se han descrito antes y son difíciles de obtener de manera intuitiva (humana o artificial) actualmente. Aunque ambos enfoques son de gran relevancia,

plantean preguntas diferentes y generan respuestas que no pueden ser reemplazadas por el otro enfoque. Por lo anterior, es completamente válido hacer uso de soluciones temporales o del uso de la tecnología para resolver nuestros problemas, siempre y cuando se reconozca aún la necesidad de aprender los fundamentos y hacer deducciones rigurosas, a modo de no depender irremediabilmente de estas “soluciones prácticas” que son específicas para algunos casos concretos. En síntesis, la respuesta que proponemos a la pregunta sobre si la intuición puede traicionarte, es: no se puede generalizar, pero en muchos casos se puede confiar en la intuición a corto plazo para obtener soluciones rápidas. Sin embargo, lo anterior no sustituye la necesidad de continuar haciendo deducciones rigurosas para avanzar en la ciencia. De hecho, la relación entre soluciones rigurosas e intuitivas es simbiótica. Esto se debe a que la deducción de muchos modelos rigurosos ha sido motivada por modelos intuitivos previos. Además, la deducción y cerradura de algunos modelos intuitivos se benefician de conocimientos físicos previos. Incluso, las herramientas actuales que emplean redes neuronales pueden ser mejoradas si se cuenta con principios matemáticos bien establecidos. Es por ello que vale la pena aprender sobre ambos enfoques para atender (rápida o rigurosamente) una amplia variedad de problemas en ciencias e ingeniería.

Referencias

- [1] Bailly, A., Blanc, C., Francis, E., Guillotin, T., Jamal, F., Wakim, B., & Roy, P. (2022). Effects of dataset size and interactions on the prediction performance of logistic regression and deep learning models. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 213, 106504.
- [2] Battiato, I., V, P. T. F., Malley, D. O., Miller, C. T., Takhar, P. S., Valdes-Parada, F. J., & Wood, B. D. (2019). Theory and Applications of Macroscale Models in Porous Media. *Transport in Porous Media*, 130 (1), 5-76.
- [3] De-Groot, S. R., & Mazur, P. (2011). *Non-Equilibrium Thermodynamics*. Dover Publications.
- [4] Kim, D., & Lee, J. (2024). A Review of Physics Informed Neural Networks for Multiscale Analysis and Inverse Problems. *Multiscale Science and Engineering*, 6 (1), 1-11.
- [5] Liu, Z., Ma, P., Wang, Y., Matusik, W., & Tegmark, M. (2024). KAN2.0: Kolmogorov-Arnold Networks Meet Science.
- [6] Whitaker, S. (1999). *The Method of Volume Averaging*. Springer Netherlands.

**Residuos sólidos municipales
en exvertederos clandestinos
de la Sierra de Guadalupe:
en búsqueda de
microorganismos
degradadores de plástico**

Biól. Ana Paula Romero Calderón

Maestría en Ecología Aplicada, UAM-Xochimilco

Biól. Fernando Basilio González

Maestría en Ecología Aplicada, UAM-Xochimilco

Dra. Aída V. Rodríguez Tovar

Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN

M. E. A. Alejandra García Mares

Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM

Dr. José Roberto Ángeles Vázquez

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

Dra. Patricia Castilla Hernández

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

M. E. A. Luis Gerardo Hernández Fernández

Centro de Educación Ambiental Integral Sierra de Guadalupe,
Tlalnepantla de Baz

Dr. Facundo Rivera Becerril

Departamento El Hombre y su Ambiente, UAM-Xochimilco

Abstract

Currently, plastic is the most abundant material among solid waste deposited in landfills. The metropolitan area of Mexico City does not escape this reality. As an example, in the Sierra de Guadalupe, different solid waste landfills operated for decades but they were closed a few years ago. Our work team develops research focused on the microorganisms linked to the degradation of plastic in three old landfills, with the aim of determining the diversity, as well as the fungal and bacterial behavior towards plastic. The purpose is to constitute a collection of microbial isolates with the potential to be used in biotechnological processes for plastic management.

Keywords: Biodegradation, Biotechnology, Polyethylene

Resumen

En la actualidad, el plástico es el material más abundante entre los residuos sólidos depositados en los vertederos (“*basureros*”). El área metropolitana de la Ciudad de México no escapa a esta realidad; como ejemplo, en la Sierra de Guadalupe funcionaron durante décadas diferentes vertederos de residuos sólidos municipales que fueron clausurados hace algunos años. Nuestro equipo de trabajo desarrolla una investigación enfocada en los microorganismos vinculados con la degradación de plástico en tres antiguos vertederos, con el objetivo de determinar la diversidad, así como el comportamiento fúngico y bacteriano frente al plástico. La finalidad es de constituir una colección de aislados microbianos con el potencial de ser utilizados en procesos biotecnológicos de gestión de plásticos.

Palabras clave: Biodegradación, Biotecnología, Polietileno

Sierra de Guadalupe

La Sierra de Guadalupe (SG) es una cadena montañosa que se extiende principalmente en el Estado de México y en una pequeña fracción en el norte de la Ciudad de México; es un oasis de vida, una isla verde que sobresale de la mancha urbana de la megalópolis (Figs. 1 y 2). Alrededor de la SG viven aproximadamente cuatro millones de personas en los municipios mexiquenses de Tlalnepantla, Tultitlán, Coacalco y Ecatepec, así como en la alcaldía Gustavo A. Madero (Paniagua Fuentes, 2016). Esta Sierra es una de las áreas naturales protegidas (ANP) menos conocidas del centro de México.

Los primeros vestigios humanos descubiertos en la SG se remontan al año 1,500 a.C. en Zacatenco y Ticomán, que fueron sitios habitados por Tepanecas, y centros ceremoniales y estratégicos de importancia cosmogónica (Paniagua Fuentes, 2016). La agricultura practicada por los pueblos originarios mexicanos era respetuosa con el entorno; el paisaje estaba dominado por bosques de encino, zonas agrícolas y pequeñas zonas habitacionales en forma de terrazas. Con la llegada de los conquistadores europeos, la SG comenzó a experimentar una sobreexplotación del suelo y de otros recursos; se introdujo el ganado vacuno y ovino, y se crearon aserraderos que estuvieron activos hasta finales del siglo XIX. Desde la década de 1960 ocurrió una explosión poblacional en la periferia de la Sierra que condujo a un uso de suelo preferentemente habitacional, tendencia que sigue vigente (Secretaría de Ecología, 1999).

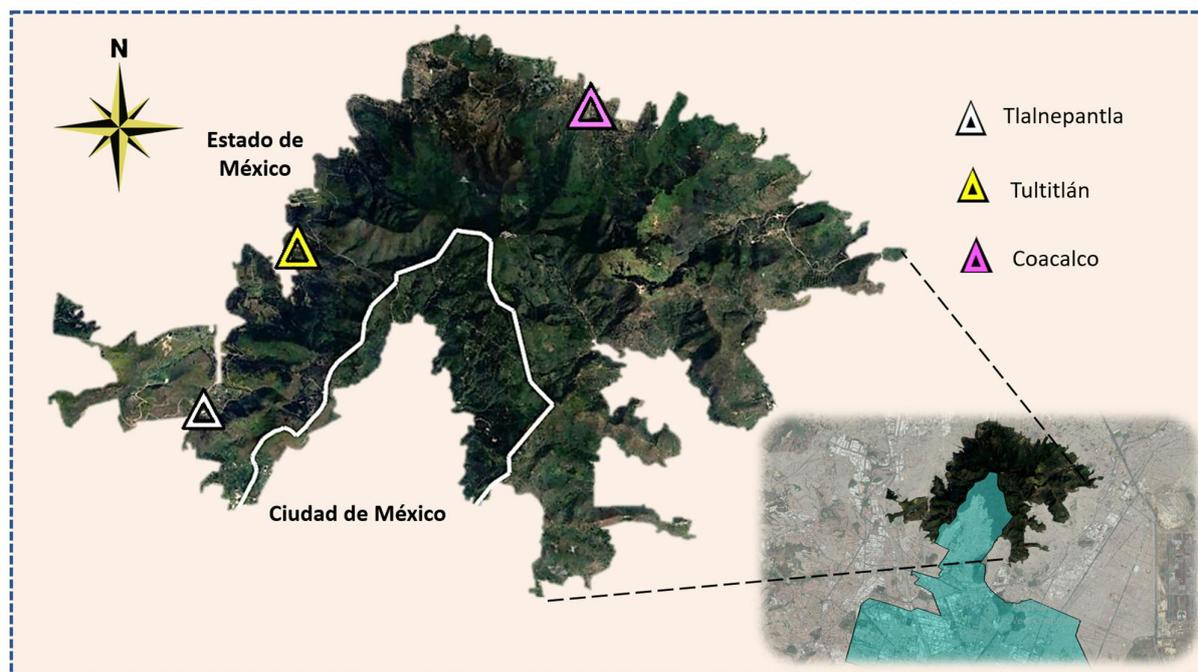


Figura 1: Ubicación de la Sierra de Guadalupe; al sur colinda con la Ciudad de México, al este con Ecatepec, al norte con Coacalco y al oeste con Tultitlán y Tlalnepantla. Las ubicaciones de tres exvertederos clandestinos de residuos sólidos en Tlalnepantla, Tultitlán y Coacalco aparecen señaladas.



Figura 2: Vista parcial de la Sierra de Guadalupe, con sitios de vegetación herbácea y bosques de eucalipto y encino.

La SG fue declarada Zona de Protección Forestal en 1923. Debido a la constante presión que enfrentaba, en 1976 se le designó como Parque Estatal con una extensión de 5,306.75 ha en el Estado de México (Secretaría de Ecología, 1999). La extensión de la SG en la Ciudad de México abarca en la actualidad 633 ha (Ortega de la Sancha, 2024). Esta es una de las pocas ANP situadas en el norte de la Ciudad de México; tiene una gran importancia ecológica y social que se centra en los siguientes aspectos (Secretaría de Ecología, 1999; Paniagua Fuentes, 2016; Ortega de la Sancha, 2024):

a) *Refugio de biodiversidad*: es hábitat para plantas, animales, hongos macroscópicos y microorganismos, algunos de ellos endémicos o en peligro de extinción. Al ser una de las últimas áreas de bosque y matorral del Valle de México, se convierte en un sitio crucial para la conservación de la biodiversidad.

b) *Regulación del clima*: gracias a su vegetación, la SG actúa como un pulmón verde para el Valle de México, regula la temperatura y reduce los efectos de la contaminación atmosférica. Las áreas verdes capturan carbono y contribuyen con la mitigación del cambio climático.

c) *Recarga de acuíferos*: al estar conformada por un conjunto de cerros, la SG permite que el agua de lluvia escurra por las barrancas y forme cuerpos de agua superficiales estacionales. Una porción de esa agua se infiltra gracias a la porosidad de la roca volcánica, y recarga los mantos acuíferos que surten las colonias aledañas.

d) *Control de la erosión*: las formaciones montañosas y la vegetación ayudan a prevenir la erosión del suelo, en especial en una región urbanizada

donde la pérdida de suelo fértil es un problema crítico.

e) *Espacio para la recreación y la educación ambiental*: dentro de la SG se realizan actividades como senderismo, ciclismo de montaña, y observación de aves y hongos, por lo que es un espacio para la recreación. En Tlalnepantla, en Coacalco y en la alcaldía Gustavo A. Madero se encuentran instalados tres centros de educación ambiental donde se realizan actividades para informar y para sensibilizar a la población sobre la importancia de la conservación de este ecosistema. Asimismo, en Ecatepec existe un Jardín Botánico con las mismas finalidades.

f) *Cultural y social*: para las comunidades cercanas, la SG tiene un valor cultural significativo. Es un espacio de integración social donde se llevan a cabo actividades comunitarias que fortalecen el tejido social.

La problemática que implica el plástico en la Sierra de Guadalupe

En los años 1970-2000 la SG fue el sitio para el depósito final de residuos sólidos domiciliarios, comerciales, industriales e incluso hospitalarios de la zona metropolitana y de entidades cercanas (Ortega de la Sancha, 2024). Aún en el presente se liberan residuos sólidos en forma discreta, a pequeña escala, particularmente en la barda perimetral (Secretaría del Medio Ambiente, 2022; Ortega de la Sancha, 2024). En los exvertederos situados en los municipios de Tlalnepantla, Tultitlán y Coacalco, en su momento se depositaron toneladas de materiales; en la actualidad estos sitios se encuentran clausurados y están parcial o totalmente cubiertos por vegetación herbácea (Figura 3). Entre los materiales más abundantes, los plásticos en sus

diferentes presentaciones constituyen más del 50% de los volúmenes totales, según una exploración llevada a cabo. De los plásticos, el polietileno destaca por su elevada proporción en bolsas y envoltorios varios. Los plásticos contienen, además de su estructura básica, una diversidad de aditivos que incluyen metales, colorantes y bisfenoles con la finalidad de fortalecer su estructura, elasticidad, resistencia y apariencia.

La exposición de los residuos a las condiciones ambientales favorece la degradación biológica o abiótica

de los plásticos (Figura 4). Como consecuencia se liberan fragmentos minúsculos, llamados microplásticos cuando su tamaño es menor a 5 mm, o nanoplásticos si su dimensión es menor a un milímetro. Estas partículas pequeñas de plásticos, así como sus aditivos, son susceptibles de ser ingeridos o absorbidos por ciertos animales, plantas y microorganismos, y acumulados en tejidos y en células.

Los microplásticos y nanoplásticos se encuentran también presentes en los suelos interaccionando con las diferentes partículas que los conforman.



Figura 3: Exvertedero de la Sierra de Guadalupe a cielo abierto en el municipio de Tultitlán. En primer plano se aprecia un enorme montículo de residuos sólidos municipales, totalmente cubierto por vegetación herbácea. Este gran montículo está rodeado por un canal que concentra y por donde fluyen los lixiviados.



Figura 4: Exvertedero de la Sierra de Guadalupe a cielo abierto en el municipio de Tlalnepantla. Los residuos sólidos están presentes desde debajo de la cobertura vegetal hasta profundidades mayores.

Hongos y bacterias con potencial de degradación de plástico

Los exvertederos constituyen una oportunidad para aislar microorganismos del suelo adaptados a la elevada presencia de residuos plásticos, y con capacidades enzimáticas para degradarlos. Esta acción transforma los plásticos en compuestos menos tóxicos algunas veces, y más fáciles de metabolizar por los seres vivos, proceso particularmente prometedor para ofrecer una vía para la biodegradación y el reciclaje biológico.

Los hongos pertenecientes a los grupos Basidiomycota y Ascomycota han sido identificados como los más eficaces en este proceso, debido a que sintetizan enzimas de actividad extracelular (lacasas y lignocelulasas, por ejemplo) que hidrolizan los enlaces poliméricos presentes en diferentes tipos de plásticos, como el polietileno tereftalato (PET), el polietileno (PE) y el poliuretano (PU).

Los hongos degradadores de plásticos están presentes en ecosistemas diversos

(Fig. 5), desde suelos contaminados hasta ambientes extremos, lo que demuestra su adaptabilidad y la variedad de sus mecanismos enzimáticos.

Este amplio intervalo ecológico sugiere que podrían existir especies fúngicas con potencial degradador, especialmente en hábitats poco explorados o sometidos a presión ambiental.

La identificación y caracterización de la diversidad fúngica es esencial para descubrir nuevas enzimas y sus rutas metabólicas involucradas en la descomposición plástica de manera eficiente y sostenible.

Como indica el Cuadro 1, los hongos con capacidad de degradación de plástico pertenecen a diversos géneros. Por nuestra parte, *Marasmius*, *Xylaria* y *Penicillium* se identificaron en forma preliminar en el suelo contaminado por residuos plásticos en la Sierra de Guadalupe.

Cuadro 1: Hongos con potencial de degradación de plásticos y sus enzimas involucradas.

| Hongo | Polímero | Referencia |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| <i>Aspergillus tubingensis</i> | Poliuretano | Khan <i>et al.</i> (2017) |
| <i>Phanerochaete chrysosporium</i> | Polietileno tereftalato, poliéster | Kim y Rhee (2016) |
| <i>Penicillium chrysogenum</i> | Polietileno | Saranraj y Naidu (2020) |

Diferentes géneros bacterianos (Fig. 6, *Streptomyces*, *Saccharomonospora*, Cuadro 2), entre ellos *Pseudomonas*, *Thermoactinomyces* y *Pseudonocardia*, y están siendo evaluados por su capacidad su potencial para degradar polipropileno de degradación de polímeros plásticos. (PP), uno de los polímeros más estables Boenel *et al.* (2021) estudiaron y de uso común. las actinobacterias *Actinomadura*,



Figura 5: Hongos con diferentes morfologías macroscópicas, cultivados en medio papa-dextrosa-agar. Los organismos fueron aislados a partir de fragmentos de plástico con signos de degradación en los exvertederos de residuos sólidos de la Sierra de Guadalupe.

Cuadro 2: Bacterias con potencial de degradación de diferentes plásticos.

| Bacteria | Polímero | Referencia |
|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| <i>Bacillus megaterium</i> | Polihidroxicanoato | Segura <i>et al.</i> (2007) |
| <i>Arthrobacter sp.</i> | Polietileno alta densidad | Balasubramanian <i>et al.</i> (2010) |
| <i>Pseudomonas sp.</i> | Polietileno alta densidad | Balasubramanian <i>et al.</i> (2010) |
| <i>Ideonella sakaiensis</i> | Tereftalato de polietileno | Yoshida <i>et al.</i> (2016) |
| <i>Actinomadura sp.</i> | Polipropileno | Boenel <i>et al.</i> (2021) |
| <i>Streptomyces sp.</i> | Polipropileno | Boenel <i>et al.</i> (2021) |
| <i>Rhodococcus sp.</i> | Polietileno baja densidad | Cao <i>et al.</i> (2022) |

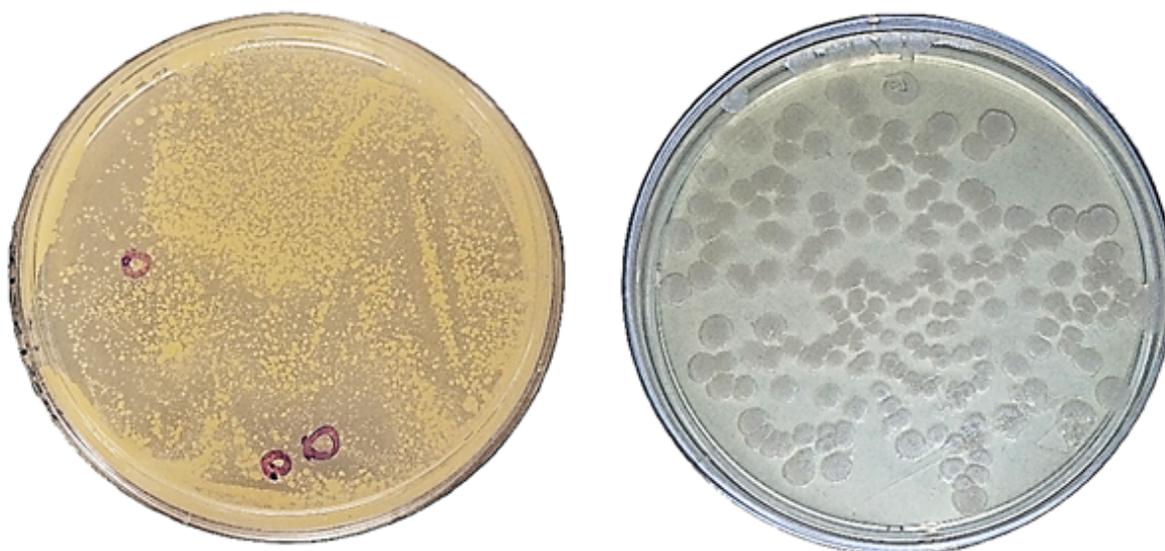


Figura 6: Aislamiento de bacterias en agar nutritivo a partir de segmentos de plástico con signos de degradación procedentes de los exvertederos de residuos sólidos de la Sierra de Guadalupe.

A futuro, la diversidad de hongos y bacterias degradadores de plástico podrá abrir el camino hacia innovaciones en el manejo de residuos sólidos y en el desarrollo de sistemas biotecnológicos para el reciclaje. La adaptación y evolución de los especímenes microbianos, impulsadas por la disponibilidad de plásticos en el ambiente, presenta una oportunidad valiosa para desarrollar estrategias específicas de biodegradación mediante la creación de consorcios microbianos.

Perspectivas y comentarios finales

Dentro de la gran zona conurbada del Valle de México, la Sierra de Guadalupe enfrenta una enorme presión humana por los asentamientos irregulares y el abandono de residuos sólidos, entre las problemáticas (Paniagua Fuentes, 2016; Secretaría del Medio Ambiente, 2022; Ortega de la Sancha, 2024). Esta

área natural protegida es un espacio verde, esencial principalmente para el Estado de México y en segundo término para la Ciudad de México; preserva la biodiversidad, además de que mitiga los efectos de la contaminación y la escasez de agua. Gracias a su belleza escénica la Sierra de Guadalupe es un sitio de esparcimiento para la población y una oportunidad para practicar deporte.

Los diferentes centros de educación ambiental promueven la conciencia ecológica al informar a la población de la riqueza natural y de la problemática que enfrenta este gran espacio verde, lo que se traduce en un beneficio para el bienestar humano. En pláticas informales, los visitantes, académicos y autoridades locales han mostrado gran interés en el proyecto de preservación de esta área natural protegida.

Los enormes volúmenes de residuos sólidos municipales que durante decenios fueron vertidos en la Sierra de Guadalupe representan un reto ambiental a enfrentar. Los exvertederos, a pesar de su cobertura vegetal, liberan biogás compuesto por metano y bióxido de carbono, perceptibles en el ambiente; a su vez, los lixiviados que se producen e infiltran en el suelo y subsuelo podrían alcanzar cuerpos subterráneos de agua (Cruz Rieva *et al.*, 2002). El plástico representa más de un 50% del volumen de los residuos y muestra frecuentemente signos de degradación donde seguramente están involucrados los grupos microbianos del suelo. Algunas bacterias y hongos han adaptado sus sistemas enzimáticos para degradar plásticos y utilizarlos como nutrimentos y energía para su estructura, funcionamiento celular y persistencia en el ambiente. Los estudios desarrollados por este grupo de investigación permitirán generar conocimiento de la diversidad y fisiología bacteriana y fúngica en presencia de plásticos. Las potencialidades microbianas de aislados individuales o consorcios podrán aprovecharse para degradar estos polímeros sintéticos. Los aislados microbianos también constituyen una oportunidad para explorar su producción de metabolitos secundarios diversos (antibióticos y factores de crecimiento vegetal, entre otros), con posibilidad de ser utilizados en ámbitos farmacéuticos y agronómicos.

Referencias

- [1] Balasubramanian, V., Natarajan, K., Hemambika, B., Ramesh, N., Sumathi, C. S., Kottaimuthu, R. y Rajesh Kannan, V., High-density polyethylene (HDPE)-degrading potential bacteria from marine ecosystem of Gulf of Mannar, India, *Lett. Appl. Microbiol.*, 51, pp. 205-211, 2010.
- [2] Boenel, M., Vobis, G. y Solans, M., Actinobacterias degradadoras de polipropileno, *Rev. Int. Contam. Ambie.*, 37, pp. 577-588, 2021.
- [3] Cao, Z., Yan, W., Ding, M. y Yuan, Y., Construction of microbial consortia for microbial degradation of complex compounds. *Front. Bioeng. Biotechnol.*, 10, pp. 1051233, 2022.
- [4] Cruz Rieva, R., Orta Ledesma, M.T., Sánchez Gómez, J. y Rojas Valencia, M.N., *Cuantificación de efectos ambientales de un tiradero a cielo abierto, caso de estudio*, XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002.
- [5] Khan, S., Nadir, S., Shah, Z.U., Shah, A.A., Karunarathna, S.C., Xu, J., Khan, A., Munir, S. y Hasan, F., Bioegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*, *Environ. Pollut.*, 225, pp. 469-480, 2017.
- [6] Kim, S. y Rhee, Y., Biodegradation of polyethylene terephthalate (PET)

- by *Phanerochaete chrysosporium*: insights into the enzymatic breakdown of plastics. *J. Environ. Sci.*, 34, pp. 129-135, 2016.
- [7] Ortega de la Sancha, J., Sierra de Guadalupe: el abandono de un Área Natural Protegida, Gatopardo, 21 enero 2024.
- [8] Paniagua Fuentes C.P., *Revisión bibliográfica del estado de conservación del área natural protegida "Parque Estatal Sierra de Guadalupe"*, Ensayo bibliográfico, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional, 2016.
- [9] Saranraj, P. y Naidu, R., Fungal degradation of polyethylene plastic by *Penicillium chrysogenum*: a step towards sustainable bioremediation, *Environ. Res.*, 183, pp. 109168, 2020.
- [10] Secretaría de Ecología, *Programa de manejo del Parque Estatal "Sierra de Guadalupe"*, Gaceta del Gobierno del Estado de México, Tomo CLXVII, No. 26, pp. 1-36, 1999.
- [11] Secretaría del Medio Ambiente, *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México*, Gobierno de la Ciudad de México, pp. 1-616, 2022.
- [12] Segura, D., Noguez, R. y Espín, G., Contaminación ambiental y bacterias productoras de plásticos biodegradables, *Biotecnología*, 14, pp. 361-371, 2007.
- [13] Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y. and Oda, K., A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). *Science*, 351, pp. 1196-1199, 2016.



