



Ntthe

Ntthe, palabra ñañhò (otomí) que significa "vínculo" o "enlace" (se pronuncia "enté")

ISSN 2007-9079

Revista electrónica de difusión científica, tecnológica y de innovación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro

ISSN 2007 - 9079 Periodicidad: Cuatrimestral, enero - abril - 2023, num. 41

DIFUSIÓN CIENTÍFICA

Ciencias Médicas, Ingeniería,
Tecnología e Innovación

Directorio

PRESIDENTE

LIC. MAURICIO KURI GONZÁLEZ

VICEPRESIDENTE

DRA. MARTHA ELENA SOTO OBREGÓN

DIRECTOR GENERAL

DR. ENRIQUE RABELL GARCÍA

SECRETARIO

LIC. RENÉ MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS. Año 14, num. 41, enero - abril de 2023. *Nthe* es una publicación cuatrimestral editada por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro (CONCYTEQ): calle Luis Pasteur Sur núm. 36, col. Centro; CP 76000; tel. (442) 214 3685; www.concyteq.edu.mx; nthe@concyteq.edu.mx. Editor responsable: Felipe de Jesús Esperón Valenzuela. Reserva de derechos al uso exclusivo núm. 04-2018-111410321700-203; ISSN 2007-9079, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Felipe de Jesús Esperón Valenzuela: calle Luis Pasteur Sur núm. 36, col. Centro; CP 76000. Fecha de última modificación: abril de 2023

Nthe ha sido aprobada para su inclusión en el Índice del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX)

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

Se autoriza la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación siempre y cuando se cite la fuente.

EDICIÓN Y DISEÑO DE LA PUBLICACIÓN
LIC. FELIPE DE JESÚS ESPERÓN VALENZUELA

CORRECCIÓN DE ESTILO
DRA. MARÍA LUISA ÁLVAREZ MEDINA
LIC. MONSERRAT ACUÑA DELGADO

Nthe, Publicación del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro:
<http://nthe.mx/>

Luis Pasteur Sur núm. 36
Col. Centro, CP 76000
Tel. 52 (442) 214 3685 / 212 7266, ext. 105
Querétaro, Qro., México

Consejo editorial

Investigadores nacionales

Dr. Alejandro Manzano Ramírez

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, unidad Querétaro

Dr. Flora Mercader Trejo

Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui

Dr. Sergio Barrera Sánchez

Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey, campus Querétaro

Dr. Martha Cruz Soto

Universidad del Valle de México, campus Querétaro

Dr. Gabriela Calderón Guerrero

Facultad de Psicología, Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Víctor Castaño Meneses

Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la UNAM, campus Juriquilla

Dr. Rolando Salinas García

Unidad Multidisciplinaria de Estudios Sobre el Trabajo, Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Miguel Martínez Madrid

Instituto Mexicano del Transporte, SCT

Dr. Daniel Hiernaux Nicolás

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Gabriel Corral Velázquez

Facultad de Ciencias Políticas y Sociales, Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Salvador Echeverría Villagómez

Centro Nacional de Metrología

Dr. Alberto Traslosheros Michel

Universidad Aeronáutica en Querétaro

Dra. Alejandra Urbiola Solís

Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Jóns Sánchez Aguilar

Instituto Tecnológico de Querétaro, Tecnológico Nacional de México

Dr. Octavio López Millán

Instituto Tecnológico de Hermosillo

Dra. Marcela Hernández Romo

Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Iztapalapa

Mtra. Martha Díaz Muro

Instituto Tecnológico de Hermosillo, Tecnológico Nacional de México

Dr. Sergio Sandoval Godoy

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Sonora

Dr. Martín Alfonso Gutiérrez López

Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Jorge Raúl Palacios Delgado

Universidad del Valle de México, campus Querétaro

Dra. María Guadalupe Ordaz Cervantes

Universidad Autónoma de Querétaro

Mtra. Eva Leticia Ortiz Ávalos

Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Adriana del Carmen Gallegos Melgar

CONACYT - COMIMSA

Dra. Ana Isabel Moreno Calles

Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Morelia.

Dra. Olivia Solís Hernández

Universidad Autónoma de Querétaro

Externo

Dr. Víctor Hugo Muciño Quintero

Universidad de West Virginia, EUA



La revista electrónica *Nthe* es financiada en su totalidad por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro en el marco del presupuesto autorizado el día 22 de diciembre de 2022. (Publicado en el periódico oficial del estado de Querétaro, La Sombra de Arteaga).

Comité de Evaluadores

Dra. Esperanza Elizabeth Martínez Flores

Instituto de Metalurgia
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dra. Martha E. Compeán Jasso

Facultad de Ciencias
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Alberto Vázquez Cervantes

Centro de Ingeniería y Desarrollo
Industrial (CIDESI)
Querétaro

Dr. Alfonso Ramírez Pedraza

Centro de Investigaciones en Óptica, A.C

Dra. Macrina Beatriz Silva Cázares

Ciencias Biomédicas
Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Dr. Jorge Noel Gracida Rodríguez

Facultad de Química
Universidad Autónoma de Querétaro

Dra. Maricela González Leal

Facultad de Química
Universidad Autónoma de Querétaro

Dr. Raúl Arturo Alvarado López

Dirección de Innovación
Universidad Autónoma de Querétaro

Dra. Martha Patricia Hernández Vergara

Instituto Tecnológico de Boca del Río,
Veracruz

Dra. María de la Luz Merino Contreras

Instituto Tecnológico de Boca del Río,
Veracruz

Dr. Fernando Víctor Iriarte Rodríguez

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Comentario *Nthe*

Estimados lectores presentamos a ustedes la edición 41 de la revista *Nthe*, les comento que con este número estrenamos imagen institucional, el cual refleja el ecosistema de Ciencia, Tecnología e Innovación en nuestro Estado. Para esta edición contamos con los siguientes 6 artículos:

Como primer artículo presentamos “Estudio de factibilidad de un policultivo acuapónico bajo invernadero” el cual tiene como objetivo determinar la factibilidad de un policultivo acuapónico, integrado por tilapia-bagre y lechuga-espínaca, utilizando tres tratamientos: tilapia con lechuga-espínaca (T1), bagre con lechuga-espínaca (T2) y tilapia-bagre con lechuga-espínaca (T3). Se establecieron como variables de respuesta: tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), eficiencia proteica (EP) y tasa de sobrevivencia (TS) para el caso de los peces. Asimismo, se establecieron como variables en plantas: la tasa de crecimiento en planta (TCP), altura de planta (AP) y tasa de sobrevivencia de planta (TSP). Los resultados sugieren que los cultivos con una sola especie acuática contribuyen de mayor manera al crecimiento de la misma; sin embargo, la asociación de dos organismos acuáticos favorece el crecimiento de las plantas.

“Antecedentes para el desarrollo de ciudades inteligentes en México” es otro de los artículos publicados donde se presenta un análisis de los elementos base de algunos conceptos y antecedentes para el desarrollo de la investigación de ciudades inteligentes en México en el cual se realiza un análisis exploratorio de la revisión de la literatura de estos temas para poder ampliar el conocimiento sobre ellos. Una ciudad provee bienes y servicios para el bienestar de los habitantes. Con el incremento demográfico, se necesita mejorar su planeación y desarrollo para contrarrestar los problemas urbanos. Resulta necesario, para una sociedad actual, crear, transformar o desarrollar la inteligencia en las ciudades; además de una planeación integral de distintas dimensiones, características y elementos —por distintos actores— a través de políticas públicas.

El artículo “Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura” En México la acuicultura, al igual que en otros países, está creciendo y obligando a los productores a consumir o extraer grandes cantidades de agua. Este consumo es comparable al que ocupa el ganado, razón por la cual los acuicultores mexicanos necesitan actualizarse en el uso racional del recurso hídrico. Lo anterior es posible lograrlo a través de tecnologías que se ocupan en otros países con el fin de hacer eficiente el consumo de agua para no drenarla como lo hacen la mayoría de las industrias acuícolas. Este texto presenta las tecnologías actuales que pueden utilizarse en el cultivo de peces para usar menos recurso hídrico.

“Reconocimiento de la Lengua de Señas Mexicana mediante redes neuronales” con este trabajo de investigación se desarrolló un sistema para el reconocimiento automático del abecedario dactilológico de la Lengua de Señas Mexicana (LSM), esto mediante el uso de redes neuronales recurrentes y el uso de una cámara de profundidad. Para la clasificación automática del conjunto de señas se utilizó una red neuronal recurrente (RNN, por sus siglas en inglés). Para evaluar el rendimiento del clasificador se calculó la precisión, la recuperación y la exactitud.

Comentario *Nthe*

Con el título “Biosíntesis y extracción de Polihidroxicanoatos por *Pseudomonas putida* usando residuos orgánicos como sustrato” se presenta la investigación donde se evaluó la producción de PHAs a partir de una cepa de *P. putida* usando residuos de glicerol y lactosuero como fuentes de carbono, también se realizó un comparativo entre dos métodos de extracción de PHAs con solventes orgánicos, se evaluaron los métodos que utilizan dispersiones hipoclorito de sodio-cloroformo y 1,2-propilencarbonato. Del comparativo entre fuentes de carbono, los resultados mostraron que el glicerol al 1% (v/v) es una mejor fuente de carbono con un rendimiento de 1.337 g/L en comparación a los lactosueros que mostraron un rendimiento de 0.830 g/L, así mismo, en el comparativo entre métodos de extracción, el método con dispersiones hipoclorito de sodio-cloroformo resultó con rendimientos más altos en cuanto a producción de PHAs cuantificados de forma gravimétrica.

Cerramos con el artículo “Uso de tomografía computarizada para la inspección de uniones adhesivas unidas usando adhesivo metilmetacrilato” En este trabajo se presenta la investigación con el fin de determinar la calidad y confiabilidad de materiales compuestos y uniones adhesivas, la industria aeronáutica ha impulsado las técnicas de inspección no destructivas para detectar defectos. Por lo general, las técnicas no destructivas volumétricas son utilizadas en la industria para lograr este propósito. En ese sentido, el objetivo de trabajo es mostrar la efectividad para detectar imperfecciones en uniones adhesivas por medio de tomografía computarizada de una unión adhesiva aluminio-acero para detectar imperfecciones en este tipo de uniones y permitir al analista o ingeniero determinar causas que generaron la falla en componentes unidos con adhesivo.

Esperamos que éstas aportaciones fomenten el interés por la generación y difusión del conocimiento y promueva la participación a la presentación de resultados sobre sus proyectos de investigación en las diversas temáticas del conocimiento

Dr. Enrique Rabell García
Director General del Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro

ÍNDICE

Estudio de factibilidad de un policultivo acuapónico bajo invernadero

Samuel López-Tejeida
J. Josafat De León-Ramírez
Leticia Félix-Cuencas
Sergio Alonso Martínez-Ramos
Laboratorio de Bioingeniería
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro
Laboratorio de Diseño de Innovación Social
Facultad de Ingeniería
Universidad Autónoma de Querétaro

1

Antecedentes para el desarrollo de ciudades inteligentes en México

Alma Alejandra Velázquez Alejos
Josefina Morgan Beltrán
Universidad Autónoma de Querétaro

08

Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura

María de la Luz Sánchez Estrada
Valeria Caltzontzin Rabell
Priscila Sarai Flores Aguilar
Genaro Martín Soto Zarazúa

19

Reconocimiento de la Lengua de Señas Mexicana mediante redes neuronales

Kenneth Mejía Pérez
Diana Margarita Córdova Esparza
Facultad de Informática
Universidad Autónoma de Querétaro

27

Biosíntesis y extracción de Polihidroxicanoatos por Pseudomona putida usando residuos orgánicos como sustrato

Cynthia Rocío Flores-Juárez
Ana Raquel S. Estilla-Escamilla
Juan Pablo Leyva-Hurtado
Fabiola Ramos-Alemán
Daniel Hernández-Arriaga
Julio Cesar González-Olvera
División industrial área de Nanotecnología
Universidad Tecnológica de Querétaro
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro
Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui

34

Uso de tomografía computarizada para la inspección de uniones adhesivas unidas usando adhesivo metilmetacrilato

Celso Eduardo Cruz González
Juan Manuel Salgado López
Luis del Llano Vizcaya
Marco Paredes
Dirección de Ingeniería de Manufactura.
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
Gerencia de Sistemas Mecánicos.
Dirección de Ingeniería Mecánica.
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial

40

Estudio de factibilidad de un policultivo acuapónico bajo invernadero

Samuel López-Tejeida¹, J. Josafat De león-Ramírez¹, Leticia Félix-Cuencas¹, Sergio Alonso Martínez-Ramos²

¹ Laboratorio de Bioingeniería. Facultad de Ingeniería, Campus Amazcala, Universidad Autónoma de Querétaro, El Marqués, Querétaro, México.

² Laboratorio de Diseño de Innovación Social. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México.

*Corresponding author, e-mail addresses: leonjrmz@gmail.com

Resumen

La acuaponía es cuestionada sobre su viabilidad en cuanto a la cantidad y calidad de los productos que permite generar. Es así que diversos estudios se centran en establecer las relaciones entre peces y plantas que permitan los mayores rendimientos, sin llegar a explorarse la opción de vincular más de una especie acuática y vegetal en cada ciclo de producción. Por tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la factibilidad de un policultivo acuapónico, integrado por tilapia-bagre y lechuga-espínaca. Se utilizaron tres tratamientos: tilapia con lechuga-espínaca (T₁), bagre con lechuga-espínaca (T₂) y tilapia-bagre con lechuga-espínaca (T₃). Se establecieron como variables de respuesta: tasa de crecimiento (TC), factor de conversión alimenticia (FCA), eficiencia proteica (EP) y tasa de sobrevivencia (TS) para el caso de los peces. Asimismo, se establecieron como variables en plantas: la tasa de crecimiento en planta (TCP), altura de plata (AP) y tasa de sobrevivencia de planta (TSP). Los resultados sugieren que los cultivos con una sola especie acuática contribuyen de mayor manera al crecimiento de la misma; sin embargo, la asociación de dos organismos acuáticos favorece el crecimiento de las plantas

Palabras clave: calidad de agua, desempeño productivo, policultivo, rendimiento

Abstract

Aquaponics is questioned about its viability in terms of the quantity and quality of the products that it allows to generate. Thus, various studies have focused on establishing the relationships between fish and plants that allow the highest performance; without even exploring the option of linking more than one aquatic and plant species in each production cycle. Therefore, the aim of this work is to determine the feasibility of an aquaponic polyculture, integrated by tilapia-catfish and lettuce-spinach. Three treatments were used: tilapia with lettuce-spinach (T₁), catfish with lettuce-spinach (T₂) and tilapia-catfish with lettuce-spinach (T₃). The response variables were established: growth rate (GR), feed conversion factor (FCF), protein efficiency (PE) and survival rate (SR) in the case of fish; Likewise, the plant growth rate (PGR), plant height (PH) and plant survival rate (PSR) were established as variables in plants. The results suggest that culture with a single aquatic species contributes more to its growth; however, the association of two aquatic organisms favors the growth of plants.

Keywords: Water quality, productive performance, polyculture, performance

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

27 de febrero de 2023

Introducción

La acuaponía hace referencia al cultivo de peces y plantas en un mismo sistema de producción; es decir es el resultado de la integración de la acuicultura y la hidroponía bajo un sistema de recirculación cerrado (Forchino et al., 2017). Los residuos generados a partir del crecimiento de los peces son aprovechados tras una conversión microbiana como nutrientes por las plantas involucradas, las cuales a su vez brindan una depuración y limpieza del agua requerida por los peces (Wongkiew et al., 2017).

La acuaponía es una alternativa ideal para solucionar la problemática para los acuicultores, para aprovechar el agua residual con altas concentraciones de nitrógeno (Gómez et al., 2022) y así, solventar el problema sobre el abastecimiento de nitrógeno para sus plantas (Lira-Saldivar et al., 2018). Es así que, la acuaponía es uno de los sistemas de producción agroalimentaria, que puede contribuir a la sustentabilidad (Forchino et al., 2017). Sin embargo, aún se tienen algunos desafíos por subsanar, derivados de la complejidad de integración y generación de condiciones propicias para el crecimiento y desarrollo de sus componentes biológicos (peces, plantas y bacterias nitrificantes), lo que impide obtener una alta productividad en los cultivos (Naspirán-Jojoa et al., 2022).

En este sentido, en estudios previos con sistemas acuapónicos se han evaluado las relaciones entre peces y plantas que permitan las mayores tasas de crecimiento. Por otro lado, se ha explorado la opción de vincular más de una especie acuática y vegetal en el mismo ciclo de producción, a pesar de que los policultivos en los sistemas acuapónicos podrían contribuir a un eficiente reciclado de nutrientes y a la integración de los procesos biológicos y químicos de los organismos involucrados en el sistema; todo lo anterior logra mantener la estabilidad en el medio.

La integración de sistemas de policultivo acuapónico puede repercutir en la diversificación de la producción, con una disminución sustancial al impacto ambiental e incrementar las ganancias

económicas. Por tanto, el objetivo de este estudio fue determinar la factibilidad de implementar un policultivo acuapónico a partir de su rendimiento y balance económico.

Metodología

Sistema de cultivo

Se establecieron tres sistemas acuapónicos, cada uno de los cuales estuvo integrado por un estanque de geomembrana con capacidad máxima de 500 litros (manteniendo un volumen de 350 L), un filtro tipo canister y dos bandejas plásticas con placa de poliestileno para el cultivo de las plantas (raíz flotante) cada una de 0.5 m² de área (Figura 1). Para la recirculación, cada sistema contó con una bomba sumergible de 65 W, con una tasa de flujo de 18 L/min.

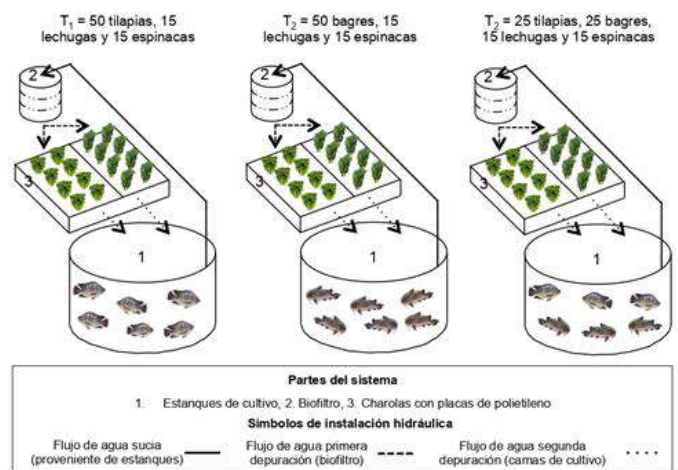


Figura 1. Esquema general de los sistemas acuapónicos empleados. Fuente: Elaboración propia.

Para el estudio, se emplearon 90 plantas de lechuga (*Lactuca sativa*) con una altura inicial media de 5.27 ± 0.21 mm y 90 plantas de espinaca (*Spinacia oleracea*) con una altura inicial media de 5.27 ± 0.21 mm. Durante el periodo experimental, se llevaron a cabo dos ciclos de producción de las plantas (cada uno de 60 días), en los que se usaron 45 plantas por especie, para lo cual fueron repartidos 15 plantas por tratamiento.

Diseño experimental

Se utilizó un diseño experimental de bloques completamente al azar con tres tratamientos y tres repeticiones. La unidad experimental fue de 50 individuos, los cuales fueron alimentados con una dieta de la marca Malta-Cleyton® (Tabla 1). Los tratamientos estuvieron constituidos de la siguiente manera: T₁ (50 alevines de tilapia), T₂ (50 alevines de bagre) y T₃ (25 alevines de tilapia junto con 25 de bagre); en cada uno de los tratamientos se colocaron además 15 plantas de lechuga y 15 de espinaca.

Rango de peso por pez	Porcentaje de alimento	Horarios de alimentación
5 – 20 g	8 %	9:00 am (30 %)
20 – 50 g	5 %	2:00 pm (40 %)
50 – 200 g	4 %	6:00 pm (30 %)

Tabla 1. Descripción del plan alimenticio empleado durante el período experimental (recomendación por parte de la marca Malta-Cleyton®). La cantidad de alimento suministrado fue ajustada a partir de biometrías realizadas semanalmente.

Parámetros de calidad de agua

El agua de los tanques fue monitoreada diariamente en las variables de temperatura, pH y oxígeno disuelto, usando el equipo Hach HQ40d®. Asimismo, se monitorearon semanalmente las concentraciones de nitratos, nitritos, amonio y fosfato mediante el equipo Hach DR6000® bajo el método 8039, 8057, 8038 y 8180 respectivamente.

Desempeño productivo

Para evaluar la factibilidad de implementar un policultivo acuapónico entre tilapia-bagre y lechuga-espinaca sobre el desempeño productivo se establecieron como variables de respuesta en los peces: la tasa de crecimiento (TC), el factor de conversión alimenticia (TCA), la eficiencia proteica (EP) y la tasa de sobrevivencia (TS):

$$TC (g) = \text{Peso final (g)} - \text{peso inicial (g)} \quad (1)$$

$$FCA (\%) = \frac{\text{gramos de alimento consumido}}{\text{gramos de incremento en peso}} \quad (2)$$

$$EP (\%) = \frac{\text{incremento en peso}}{\text{gramos de proteína ingerida}} \quad (3)$$

$$TS (\%) = \frac{\text{Cantidad final de individuos}}{\text{Cantidad inicial de individuos}} \times 100 \quad (4)$$

Mientras que, las variables de respuesta establecidas para las lechugas y espinacas fueron: la tasa de crecimiento en planta (TCP), la altura de la planta (AP) y la tasa de sobrevivencia de planta (TSP) usando las siguientes formulas:

$$TCP (g) = \text{Peso final (g)} - \text{peso inicial (g)} \quad (5)$$

$$AP (mm) = \text{Altura final} - \text{Altura inicial} \quad (6)$$

$$TSP (\%) = \frac{\text{Cantidad final de plantas}}{\text{Cantidad inicial de plantas}} \times 100 \quad (7)$$

Rendimiento del cultivo

Como rendimiento de un cultivo, se consideró la cantidad de biomasa generada por unidad experimental; el rendimiento de peces (RPE) y de plantas (RPL), se determinó a partir de la siguiente fórmula:

$$RPE = \frac{\text{Kilogramos de peces}}{\text{metro cúbico}} \quad (8)$$

$$RPL = \frac{\text{Kilogramos de plantas}}{\text{metro cuadrado}} \quad (9)$$

Análisis estadístico

Los resultados se analizaron mediante el *software* JMP® (9.0.1). Los datos recolectados para cada una de las variables se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) expresando los resultados como media \pm desviación estándar. Asimismo, se realizó la prueba de Tukey para determinar las diferencias significativas entre las medias de los tratamientos, utilizando un nivel de significancia $P < 0.05$.

Resultados

Calidad de agua

Durante los 120 días de experimentación (considerando dos ciclos de producción de lechuga y acelga), los resultados de los parámetros de calidad de agua estuvieron dentro de los rangos de tolerancia para el cultivo de *O. niloticus* (Tabla 2); por lo que se considera que la calidad de agua se mantuvo por la acción del biofiltro y la absorción de las raíces de plantas.

Variable	T ₁ Tilapia	T ₂ Bagre	T ₃ Tilapia - bagre
Temperatura (°C)	23.4 ± 1.6 ^a	22.6 ± 1.8 ^a	23.1 ± 1.4 ^a
pH	7.5 ± 0.3 ^a	6.4 ± 0.4 ^b	6.9 ± 0.4 ^{ab}
Oxígeno Disuelto (mg/l)	6.73 ± 0.75 ^a	6.82 ± 0.62 ^a	6.84 ± 0.78 ^a
Nitratos (mg/l)	39.17 ± 4.93 ^a	32.08 ± 3.65 ^{ab}	24.05 ± 4.59 ^b
Nitritos (mg/l)	1.26 ± 0.14 ^a	1.17 ± 0.16 ^a	1.03 ± 0.15 ^a
Amonio (mg/l)	1.09 ± 0.14 ^a	0.76 ± 0.16 ^b	0.81 ± 0.13 ^b
Fosfato (mg/l)	0.42 ± 0.05 ^b	0.55 ± 0.06 ^a	0.52 ± 0.06 ^{ab}

Tabla 2. Calidad del agua durante el período experimental. Los valores se presentan como media ± desviación estándar de las muestras recolectadas. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Los valores de referencia para cultivo de tilapia y bagre corresponden a Temperatura 20 – 32 °C, pH 5 – 9, Oxígeno 4 – 9, nitratos < 300, nitritos < 5, amonio < 2 y fosfato < 1.4

Desempeño productivo

En el caso de las tilapias, el desempeño productivo presentó diferencias significativas (Tabla 3). La TC de las tilapias en T₁ fue significativamente superior a las presentes en T₃; sin embargo, presentaron menor FCA y EP. Por su parte, los bagres tuvieron una TC similar entre tratamientos. Los valores de FCA y EP de los bagres de T₃ fueron significativamente superiores a los de T₂. Finalmente, la TS de ambas

especies (tilapias y bagres) no presentó diferencias entre tratamientos.

Variable	T ₁ Tilapia	T ₃ Tilapia
	Peso inicial (g)	5.21 ± 0.13
Peso final (g)	137.92 ± 4.68	123.14 ± 3.38
TC (g)	132.71 ± 3.65 ^a	117.81 ± 2.97 ^b
FCA	1.94 ± 0.06 ^a	1.61 ± 0.05 ^b
EP	1.14 ± 0.02 ^b	1.37 ± 0.03 ^a
TS (%)	76 ± 2 ^a	76 ± 2 ^a
	T ₂ Bagre	T ₃ Bagre
	Peso inicial (g)	9.72 ± 0.35
Peso final (g)	121.09 ± 4.09	118.14 ± 3.75
TC (g)	108.37 ± 3.83 ^a	111.29 ± 2.44 ^a
FCA	1.89 ± 0.05 ^a	1.67 ± 0.02 ^b
EP	1.17 ± 0.02 ^b	1.41 ± 0.03 ^a
TS (%)	78 ± 2 ^a	76 ± 2 ^a

Tabla 3. Rendimientos productivos de los organismos acuáticos. Se presentan las medias ± desviación estándar de la tasa de crecimiento (TC), la tasa de supervivencia (TS), la tasa de conversión alimenticia (FCA), la tasa de eficiencia proteica (EP) y tasa de sobrevivencia (TS) tras 120 días de experimentación. Los datos referentes a las tilapias se contrastan solo entre T₁ y T₃; mientras que, en lo que concierne a los bagres, se toman sólo los datos entre T₂ y T₃. Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Por otra parte, las plantas en T₂ y T₃ tuvieron un crecimiento similar, donde fue superior al observado en T₁, que para las variables de TCP, mientras que AP generó los valores más bajos. Por último, la TSP de las acelgas en T₃ fue significativamente superior a las presentes en T₁ y T₂; mientras que las lechugas no mostraron diferencias entre tratamientos (Tabla 4).

Variable	T ₁	T ₂	T ₃
	lechuga	lechuga	lechuga
Peso inicial (g)	11.54 ± 0.12	11.33 ± 0.06	11.46 ± 0.08
Peso final (g)	338.27 ± 14.37	357.63 ± 10.19	366.87 ± 13.57
TCP (g)	326.73 ± 9.62 ^b	346.11 ± 7.36 ^a	355.41 ± 6.84 ^a
AP (mm)	154.78 ± 5.36 ^b	179.34 ± 4.92 ^a	183.45 ± 5.13 ^a
TSP (%)	76.6 ± 3 ^a	80.0 ± 2 ^a	80.0 ± 2 ^a
Variable	T ₁	T ₂	T ₃
	espinaca	espinaca	espinaca
Peso inicial (g)	7.21 ± 0.10	7.17 ± 0.09	7.25 ± 0.12
Peso final (g)	267.63 ± 8.79	281.84 ± 11.93	295.32 ± 9.65
TCP (g)	260.42 ± 12.39 ^b	274.67 ± 9.87 ^{ab}	288.07 ± 10.03 ^a
AP (mm)	187.31 ± 7.98 ^b	193.14 ± 10.43 ^{ab}	221.79 ± 8.25 ^a
TSP (%)	73.3 ± 5 ^b	76.6 ± 3 ^b	86.6 ± 2 ^a

Tabla 4. Rendimientos productivos de ambas especies vegetales. Se presentan las medias ± desviación estándar de la tasa de crecimiento en planta (TCP), la altura de la planta (AP) y la tasa sobrevivencia de planta (TSP). Valores con diferentes superíndices presentan diferencias significativas ($P < 0.05$).

Rendimiento del cultivo

La mayor generación de biomasa para el caso de los peces se obtuvo en T₁ representado 10 y 13 % más del rendimiento obtenido en T₂ y T₃ respectivamente. Por otra parte, el rendimiento de las plantas mostró el comportamiento contrario, donde T₁ y T₂ estuvieron un 23 y 13 % respectivamente por debajo de la biomasa generada en T₃ (Tabla 5).

Variable	T ₁	T ₂	T ₃
Kg de peces/ m ³	15.74	14.17	13.84
Kg de plantas/ m ²	13.58	15.31	17.77
Insumos	\$ 886.1	\$ 853.4	\$ 875.9
Ingresos por producto generado	\$ 1743.2	\$ 1754.4	\$ 1692.3
Balance económico	\$ 857.1	\$ 901.0	\$ 819.4

Tabla 5. Rendimiento productivo e ingresos por tratamiento. El ingreso se calculó con base en precios del 30/enero/23 (tilapia \$ 80, bagre \$ 85, lechuga \$ 10 y espinaca \$ 12). Fuente: <http://www.economia-sniim.gob.mx>.

Discusión

Calidad de agua

La concentración de oxígeno disuelto presentó una disminución a través de los 120 días de experimentación, lo cual se relaciona con el incremento de la biomasa total en los estanques conlleva a mayor consumo de oxígeno (Núñez et al., 2021).

Los mayores valores de compuestos nitrogenados registrados en T₁ se vinculan con el metabolismo de las tilapias, las cuales excretan mayores cantidades de amonio en relación a los bagres (Obirikorang et al., 2020; Freitas et al., 2021). En este sentido, mayor concentración de amonio conlleva a mayor presencia de nitritos y nitratos (Morales-Morales et al., 2019).

Desempeño productivo

Los datos de crecimiento en peces sugieren que la presencia exclusiva de una sola especie acuática conlleva a generar mayor biomasa con respecto a la vinculado con dos especies. Sin embargo, el cultivo asociado de dos especies de organismos favorece la conversión alimenticia y eficiencia proteica. Esto coincide con la vinculación de dos especies de organismos acuáticos reportados por Pereira et al. (2018) y Hisano et al. (2019). Lo anterior podría

relacionarse con el consumo de alimento no aprovechado por las tilapias por parte de los bagres derivado de su distribución espacial: las tilapias se ubican mayoritariamente en la columna de agua, mientras que el bagre se ubica en el fondo del estanque.

Por su parte, ambas especies vegetales cultivadas en T₃ coinciden con los valores sobresalientes respecto de los otros tratamientos. Lo anterior pudiera asociarse a la presencia de amonio, del que se reportó que a mayor concentración de dicho compuesto se afecta negativamente el crecimiento de estos organismos (Lara-Izaguirre et al., 2019; Riaño-Castillo et al., 2019).

Rendimiento del cultivo

El rendimiento en cuanto a los productos acuáticos sugeriría el empleo de solo una especie, lo que deriva en la mayor productividad, principalmente en el caso de la tilapia. No obstante, la diversificación de productos permitiría contar con mayor cobertura de mercado, cuestión que en algún momento podría contribuir en la fluctuación de precios de los productos resultantes.

Conclusión

En esta investigación se determinó la factibilidad de implementar un policultivo acuapónico tilapia-bagre y lechuga-espínaca. Con base en los resultados, se concluye que la vinculación de dos especies acuáticas repercute positivamente en el mantenimiento de calidad de agua. Por otro lado, se propicia una mayor producción de las especies vegetales; sin embargo, de manera general el balance económico es ligeramente menor (5 % para este caso) al obtenido mediante un cultivo con solo una especie acuática. El estudio aporta información que permite considerar el establecimiento de sistemas acuapónicos en la modalidad de policultivo, con la finalidad de diversificar los productos obtenidos en cada ciclo de cultivo. Con esto, se permitirá potenciar la utilización de la acuaponía como una opción para la generación de alimento.

Referencias

- Forchino, A. A., Lourguioui, H., Brigolin, D., & Pastres, R. (2017). Aquaponics and sustainability: The comparison of two different aquaponic techniques using the Life Cycle Assessment (LCA). *Aquacultural Engineering*, 77, 80-88.
- Freitas, L. E. L. D., Silva, T. S. D. C., & Fracalossi, D. M. (2021). Protein to energy ratios and cost, performance, and ammonia excretion in juvenile jundiá (*Rhamdia quelen*), South American catfish. *Scientia Agricola*, 78.
- Gómez, M. A. C., Marchena, M. H., González, J. A. L., Buitrago, I. D. L., Bernal, R. A. B., & Pombo, J. R. (2022). Los sistemas acuapónicos como fuente de alimento con la implementación de nuevas tecnologías. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa*, 2(1), 245-256.
- Hisano, H., Barbosa, P. T., Hayd, L. A., & Mattioli, C. C. (2019). Evaluation of Nile tilapia in monoculture and polyculture with giant freshwater prawn in biofloc technology system and in recirculation aquaculture system. *International Aquatic Research*, 11(4), 335-346.
- Lara-Izaguirre, A. Y., Rojas-Velázquez, A. N., Romero-Méndez, M. J., Ramírez-Tobías, H. M., Cruz-Crespo, E., Alcalá-Jáuregui, J. A., & Loredó-Ostí, C. (2019). Crecimiento y acumulación de NO₃-en lechuga hidropónica con relaciones nitrato/amonio en dos estaciones de cultivo. *Revista fitotecnia mexicana*, 42(1), 21-29
- Lira Saldivar, R. H., Méndez Argüello, B., Santos Villarreal, G. D. L., & Vera Reyes, I. (2018). Potencial de la nanotecnología en la agricultura. *Acta universitaria*, 28(2), 9-24.
- Morales-Morales, E. J., Rubí-Arriaga, M., López-Sandoval, J. A., Martínez-Campos, Á. R., & Morales-Rosales, E. J. (2019). Urea (NBPT) una alternativa en la fertilización nitrogenada de cultivos anuales. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(8), 1875-1886.
- Naspirán-Jojoa, D. C., Fajardo-Rosero, A. G., Ueno-Fukura, M., & Collazos-Lasso, L. F. (2022). Perspectivas de una producción sostenible en acuicultura multitrófica integrada (IMTA): una revisión. *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 69(1), 75-97.
- Núñez, H., Vargas, R., Guerra, I., & Ramos, E. (2021). Efecto de la temperatura sobre el consumo de oxígeno en tilapias del Nilo con diferentes fenotipos de comportamiento. *Centros: Revista Científica Universitaria*, 10(2), 1-18.
- Obirikorang, K. A., Gyamfi, S., Goode, M. E., Amisah, S., Edziyie, R. E., Quagraine, K., ... & Frimpong, E. (2020). Effect of soybean meal diets on the growth performance, ammonia excretion rates, gut histology and feed cost of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *Aquaculture Research*, 51(9), 3520-3532.
- Pereira, F. A., Ha, N., Gonçalves, A. F. N., Antunes, H., Valenti, W. C., & El Hadi Perez Fabregat, T. (2018). Can the polyculture with South American catfish improve the feeding efficiency of rainbow trout culture?. *Aquaculture International*, 26, 487-493.

- Riaño-Castillo, E. R., Caicedo-Gegén, L., Torres-Mesa, A., Hurtado-Giraldo, H., & Gómez-Ramírez, E. (2019). Cambios en los niveles de nutrientes en solución hidropónica de espinaca baby (*Spinacia oleracea* L.), para su futura aplicación en acuaponía. *Orinoquia*, 23(1), 73-84.
- Wongkiew, S., Hu, Z., Chandran, K., Lee, J. W., & Khanal, S. K. (2017). Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering*, 76, 9-19.

Antecedentes para el desarrollo de ciudades inteligentes en México

Alma Alejandra Velázquez Alejos; Josefina Morgan Beltrán

Universidad Autónoma de Querétaro

Correspondencia: avelazquez58@alumnos.uaq.mx; jmorganbeltran@yahoo.com.mx

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo examinar los elementos base de algunos conceptos y antecedentes para el desarrollo de la investigación de ciudades inteligentes en México. Lo anterior se realiza presentando un análisis exploratorio de la revisión de la literatura de estos temas para poder ampliar el conocimiento sobre ellos. Una ciudad provee bienes y servicios para el bienestar de los habitantes. Con el incremento demográfico, se necesita mejorar su planeación y desarrollo para contrarrestar los problemas urbanos. Resulta necesario, para una sociedad actual, crear, transformar o desarrollar la inteligencia en las ciudades; además de una planeación integral de distintas dimensiones, características y elementos —por distintos actores— a través de políticas públicas. De esto se concluye que se tiene la necesidad de seguir ampliando estos temas que contengan los componentes que permitan cerrar la brecha que se tiene actualmente en México.

Palabras clave: ciudades inteligentes, innovación, tecnología, desarrollo, complejidad.

Abstract

The main objective of this article is to examine the essential elements for the development of research on intellectual cities in Mexico, which is presenting as an exploratory analysis of the literature on some concepts and antecedents of these topics to expand knowledge about them. A well-proven city and services for the well-being of the inhabitants, with the demographic increase its plane and development are better needed to contract urban problems for which a real society is increasingly necessary, which is why it is required to create, transform or develop intelligence in cities, comprehensive planning of different dimensions is required, characteristics and elements, by different actors, through public policies, which concludes that there is a need to continue expanding these issues, which contain the components that allow closing the current gap in Mexico.

Keyword: Smart cities, innovation, technology, development, complexity.

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

25 de febrero de 2023

Introducción

Ante el aumento de la población en las ciudades, se necesita desarrollar y fortalecer los procesos de planificación, tener conocimiento y participación de las estrategias que puedan cambiar la visión hacia el futuro y definir planes sustentables para dar paso hacia la innovación y, de esta manera, enfrentar los retos sociales y económicos que se tienen. De acuerdo con uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Asamblea General de las Naciones Unidas, las ciudades o asentamientos humanos deben ser inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles (ONU, 2017).

De acuerdo con la ONU, las ciudades y áreas metropolitanas son centros de crecimiento económico que contribuyen —aproximadamente— al 60 % del Producto Interno Bruto (PIB) mundial (Cabello, 2022). De acuerdo con el Banco Mundial (2020), alrededor del 56 % de la población mundial (4, 400 millones de habitantes) vive en ciudades. Por otra parte, de acuerdo con el censo de población y vivienda que se realizó en el 2020, en México viven 126, 014, 024 personas (INEGI, 2020). Este aumento pone grandes retos dentro de las estructuras de las ciudades; problemas tales como: movilidad, tráfico, residuos, impacto medioambiental, consumo de energía, disponibilidad de estacionamientos, inclusión social, consumo de agua e inseguridad, por mencionar algunas.

Las tecnologías son herramientas para mejorar la eficiencia de las ciudades y la economía. Las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) se han desarrollado de manera acelerada estos últimos años y son parte del marco para desarrollar e implementar una ciudad inteligente. Por sus características pueden aportar al cierre de brechas sociales y económicas, además de ser tomadas como herramientas para la solución de los problemas oportunos de la humanidad (Alvarado-López, 2019).

La innovación —en un contexto actual más complejo— se ha convertido en una herramienta necesaria para la supervivencia de los negocios,

empresas y sociedades, pues busca la creación de valor detrás de problemas económicos, ambientales y sociales. Existen megatendencias que han provocado la transformación de las sociedades contemporáneas en su era digital, tales como el proceso de urbanización y el rápido crecimiento de las ciudades, la revolución digital y la importancia de la información y los datos. Para poder realizar la planeación de una ciudad inteligente se requiere de una comprensión de todos los retos y componentes que se necesitan para llevar a cabo este trabajo.

Tomando en cuenta lo anterior, se debe de abordar el problema analizando las necesidades de la ciudad con un enfoque sustentable, habitable y con desarrollo urbano. Además, se necesitan crear entornos que permitan una integración y desarrollo de todas las personas que viven en ellos. Por esta razón, los servicios inteligentes para el contexto urbano deben de estar orientadas a la inclusión para maximizar el buen vivir de los ciudadanos, en conjunto con la naturaleza y abordando el problema con el análisis de necesidades de la ciudad, con un enfoque de sustentabilidad, habitabilidad y desarrollo urbano.

El desarrollo del modelo de una ciudad inteligente puede ayudar a la sociedad a limitar o eliminar los desafíos que afectan diariamente a los usuarios de la urbe; puede ayudar a elevar el grado de satisfacción de los habitantes para facilitar la integración de procesos públicos al realizar un buen diseño urbano para generar ventajas competitivas en actividades económicas, residenciales, laborales, culturales, sociales; y puede aprovechar los avances tecnológicos como las TIC, las cuales han cambiado la forma en que se realizan los negocios, empresas, organizaciones, sociedades, economías y comunicaciones. Los cambios tecnológicos han generado un nuevo paradigma hacia la conectividad, esta evolución cuenta con herramientas como la innovación para lograr un crecimiento sustentable.

El objetivo de este artículo es hacer un análisis de investigación cualitativo por medio de un análisis exploratorio y de mapeo, esto con el fin de organizar

el marco teórico y profundizar en los conceptos y, de esta manera, presentar los antecedentes para el desarrollo de ciudades inteligentes. El contenido de este artículo forma parte de un trabajo más amplio en la investigación de tesis doctoral para la planificación de Querétaro como ciudad inteligente. El texto se organiza de la siguiente manera: en la primera sección se presenta el marco teórico de la revisión de la literatura y sus antecedentes. En la segunda sección se presentan los elementos que conforman a las ciudades inteligentes. En la tercera sección se presentan las ciudades inteligentes que se consideran en América Latina. Finalmente, se plantean los resultados y las conclusiones.

Marco Teórico

Antecedentes

La tecnología responde a las necesidades del ser humano y de la sociedad. Sus desarrollos técnicos y científicos trascienden comunidades, gremios y asociaciones para generar cambio en los procesos (Ortiz & Nagles, 2013). La tecnología es una fuerza autónoma de la sociedad, el funcionamiento de las máquinas y procesos (Bijker, 2005) se han constituido como un pilar fundamental en el desarrollo de la cultura social y económica dentro de las sociedades modernas. La tecnología se desarrolló previo a la ciencia para responder ante las necesidades del ser humano (Cadeño, 2001). Actualmente, las tecnologías de la información dentro de la esfera de las ciudades pueden poner solución a los nuevos cuestionamientos urbanos (Pollio, 2016).

La innovación es tomar esa invención nueva y llevarla a los usuarios. La innovación aparece cuando la invención trasciende y tiene impacto sobre el mercado. Para Rogers et al., (2019), una innovación es una idea, práctica u objeto que una persona percibe como nuevo; si la idea le parece nueva a la persona, es una innovación; éstas requieren un período prolongado de tiempo para su adopción. Ante esto, un problema común para muchas personas es cómo acelerar la tasa de difusión de una innovación. La

adopción de una innovación tiene interacciones con diferentes agentes y va acompañado de aprendizaje intensivo (OECD;Eurostat, 2005).

La teoría evolutiva del cambio tecnológico tiene como objetivo explicar la innovación tecnológica. Los estudios concretos de artefactos arraigados de distintas épocas, culturas y tecnologías se organizan bajo cuatro conceptos: diversidad, continuidad, novedad y selección (Basalla, 1991). La diversidad es resultado de la evolución tecnológica con la aparición de distintos artefactos; dentro de la variedad existe una continuidad en donde se tiene un antecedente anterior; la novedad es parte del mundo artificial y es inspirada, ligada o en combinación con otras técnicas del pasado; finalmente, la selección se da bajo un cúmulo de artefactos añadidos con base en elecciones humanas.

Las tecnologías digitales permiten la vinculación del mundo físico con el digital. Los componentes, máquinas, sensores y sistemas informáticos están conectados en la cadena de valor e interactúan entre ellos utilizando protocolos basados en el internet para analizar datos, prevenir errores y adaptarse a los posibles cambios (Blanco et al., 2017). Todas las revoluciones industriales tienen la característica de la tecnología emergente, la cual modifica la producción en las industrias. El concepto de la Industria 4.0 integra las tecnologías digitales a los procesos industriales, fusiona los sistemas físicos, digitales y biológicos para generar una red de producción inteligente en donde las máquinas interactúan para transformar la producción. Todo lo anterior da paso a la cuarta transformación digital (Rozo-García, 2020).

Se pueden identificar los siguientes componentes-tecnologías presentes en la Industria 4.0: computación en la nube, computación cognitiva, ciberseguridad, tecnología móvil, impresión 3D, robots autónomos, Big Data, Internet de las Cosas (IoT), tecnologías de identificación de radiofrecuencia (RFID) y digital twins (Rozo-García, 2020). Es sobre todo el Internet de las Cosas dentro de la industria quien mejora el mantenimiento

predictivo para prevenir fallas gracias a su conectividad con sensores e internet, lo cual, a su vez, permite que las máquinas comiencen a trabajar de manera autónoma.

El desarrollo urbano —llamado asentamientos humanos o urbanismo— es la planeación del proceso racional y objetivo, científico y sistémico, de comprender, ordenar, dirigir, programar, proveer, diseñar, controlar o gobernar la creación (fundación) de la estructura o establecimiento de los asentamientos humanos (Cárdenas-Elorduy, 2012). La urbanización en México ha generado altos costos, esto debido a la deficiente y poca planificación (Cortés, 2015). Una ciudad es el espacio urbano donde aparecen y se divulgan nuevas ideas, tecnologías e iniciativas innovadoras y ha sido el fruto de la creación humana (Sikora-Fernández, 2017). No obstante, una ciudad puede tener distintas variantes, tamaños, tipos; cada ciudad es única de acuerdo con sus características y dinámica.

El término de ciudad inteligente (en inglés *Smart City*) surge en el siglo XX y visualiza la conexión de la infraestructura urbana con la implementación de las TIC, las cuales buscan la eficiencia en su funcionamiento para conectar a los usuarios con su entorno y por medio de la implementación de distintas tecnologías (Nazareno, 2017). Estudios previos de los autores Alvarado-López (2019), Cañadas (2018) y Bouskela y colaboradores (2016) plantean conceptos de ciudad inteligente (*Smart City*) a través de las teorías del nacimiento y desarrollo de asentamientos humanos, de la aplicación de la tecnología para gestionar y mejorar su funcionamiento, hasta el contexto de la ciudad del futuro y sustentable dotada de inteligencia.

Ciudades Inteligentes

La ciudad tiene una historia no lineal, siempre está en constante cambio, en crecimiento e innovación. Por esa razón es compleja y esa complejidad resulta en una variable inherente dentro de las ciudades inteligentes. Se tienen múltiples expectativas e interrogantes sobre el uso de la tecnología en un

espacio urbano, ya que ha tratado de romper los paradigmas de las ciudades actuales. Incluso el mismo concepto de ciudad inteligente es complejo, su significado ha evolucionado.

Las ciudades que se han transformado hacia este nuevo modelo van en aumento desde el siglo XXI. Las primeras fueron las ciudades europeas (Matus & Ramírez, 2016). El modelo de ciudad inteligente es una relativa novedad en el panorama internacional, lo cual no permitía tener ninguna reflexión posterior porque no existía una ciudad que se considerara y definiera como tal (Santangelo, 2016).

La definición de ciudad inteligente es compleja debido a la diversidad de factores que intervienen en ella (Moreno, 2015). Las ciudades inteligentes se crean a partir de una visión y se fundamentan en la inteligencia colectiva, la cual incluye la inteligencia humana, la ambiental, la computacional, las TIC, entre otras (Cañadas, 2018). Además, estas ciudades hacen uso de las tecnologías para mejorar su competitividad y garantizar su futuro sustentable al vincular redes de personas, empresas, infraestructuras, consumo de servicios y espacios (Parra-Valencia et al., 2017).

Una ciudad inteligente, conectada, sustentable y óptima gracias al uso de las TIC, es un fenómeno mundial en la actualidad. Resulta ser la solución para mitigar los desafíos previamente mencionados de la urbanización (movilidad, residuos, transporte, servicios públicos, consumo de energía, impacto medioambiental, disponibilidad de estacionamientos, inclusión social, consumo de agua e inseguridad). La ciudad inteligente representa nuevas etapas de comprensión de la relación de las ciudades con la tecnología.

La mayoría de los términos de la ciudad inteligente se centran en las características, perspectivas, dimensiones y aspectos y pueden ir desde el desarrollo hasta la planeación urbana; sin embargo, es sobre todo la aplicación de las TIC, pues éstas automatizan los servicios relacionados con la

gestión de la ciudad, la infraestructura para mejorar los servicios y la calidad de vida de los ciudadanos (Ahmad, 2019). Para Cañadas (2018) es una ciudad conectada, resiliente, innovadora, productiva, gestionada y exitosa en lo económico, social y científico; además, está diseñada para los usuarios ciudadanos para resolver los problemas complejos y crear nuevos escenarios de soluciones a largo plazo. De acuerdo con el Gobierno de México (2017), las ciudades inteligente conectan y comunican a sus habitantes mediante la infraestructura y el uso eficiente de la tecnología. El paradigma de la ciudad inteligente es inclusivo por tener la capacidad de reunir distintos conceptos y por ser de sentido común para distintas personas (Santangelo, 2016).

La dinámica de las ciudades es el resultado del trabajo y cooperación de los ciudadanos; es el espacio en donde se concentran las actividades de crecimiento económico, dentro de su entorno político, con una red de conexiones para optimizar el consumo de recursos y mejora de procesos. En una ciudad inteligente se involucran tecnologías, procesos y personas (Bouskela et al., 2016). Para Alvarado-López (2017) el punto coincidente es que se trata de un sistema complejo en el cual confluyen distintos actores y factores para alcanzar su funcionalidad (adaptación, interconexión, organización y retroalimentación).

Dentro de las características comunes de acuerdo con Salavarría (2018), las ciudades inteligente deben ser creadas para los ciudadanos utilizando las TIC para mejorar la calidad de vida de las personas y, de esta manera, poder dar acceso eficiente y efectivo a los servicios y a las actividades públicas. Además, deben ser sustentables, optimizar los recursos, reducir los costos de los bienes públicos, ser inclusivas y transparentes. Deben tener datos abiertos que permitan dar el seguimiento a los distintos ámbitos de la ciudad a través de canales de comunicación con los habitantes. También deben de generar riquezas ofreciendo infraestructuras necesarias para la innovación y así todas las actividades generen competitividad y empleos.

Una ciudad inteligente va más allá de una ciudad digital con infraestructura en TIC para aprovechar el mejoramiento de sus funciones urbanas. Se deben de tomar en cuenta distintos puntos de los diferentes contextos del concepto para la implementación de estrategias. En primer lugar, se debe tomar en cuenta la madurez de la ciudad o área en donde se pretende implementar la idea; no sólo pensar en la infraestructura física sino en el desarrollo y aplicación de las TIC. En segundo lugar, hay que tomar en cuenta las estrategias sociopolíticas y establecer los modelos básicos de acuerdo con las etapas de desarrollo y objetivos para llegar a la maduración. En tercer lugar, se deben dividir las estrategias en parciales y globales. Para los países emergentes, el modelo propuesto se basa en suposiciones de condiciones económicas, políticas, sociales y culturales, de acuerdo con su etapa de desarrollo.

El proyecto de una ciudad inteligente se debe construir por etapas. De acuerdo con Bouskela y colaboradores (2016), se debe de contar con el liderazgo del gobierno para que éste pueda ser reflejado en la gestión municipal y las distintas instituciones, con una visión integrada que promueva la colaboración entre todos los actores. Se debe de contar con gente capacitada en los distintos sectores para poder llevar a cabo la visión del proceso de transición. Asimismo, el principal componente resultar ser la colaboración de los ciudadanos, ya que representan el comienzo y final del ciclo de evaluación del proyecto. De acuerdo con Fernández (2017), el concepto de ciudad inteligente es relativo al desarrollo de la ciudad, pues se puede considerar como un territorio con gran capacidad de innovación y aprendizaje. En el enfoque europeo están vinculadas la reducción de emisiones de dióxido de carbono y otras acciones para mejorar el uso de energía y, de esta manera, poder ser sustentables en conjunto con la mejora de la calidad de vida de sus habitantes. En Estados Unidos cuentan con distintos conceptos con innovación y tecnologías para distintas áreas de la ciudad y su funcionamiento.

Ciudades inteligentes en América Latina

De acuerdo con el estudio de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), para el 2050 el 70 % de la población mundial vivirá en ciudades. La región de América Latina y el Caribe (ALC) está presentando un proceso de crecimiento significativo en el planeta (Bouskela et al., 2016). El aumento de la población en las ciudades Latinoamericanas lleva a su vez al incremento de las problemáticas que se asocian con la vida urbana (delincuencia, contaminación, agotamiento de recursos naturales, movilidad e inclusión, entre otros). El progreso urbano hacia la transformación de una ciudad inteligente dependerá no solo de la infraestructura física de la ciudad, sino de los servicios con los cuales se cuenten para las metas y objetivos de los mismos ciudadanos y su cohesión social. Dependerá de involucrar los factores humano, tecnológico e institucional para poder responder a las problemáticas previamente mencionadas. Con la tecnología digital, el internet y las tecnologías móviles la transformación a una ciudad inteligente es más viable (Bouskela et al., 2016).

Algunos países han formulado estrategias nacionales para promover las Ciudades Inteligentes (Matus y Ramírez, 2016). En este escenario existen estudios y modelos que incorporan algunas ciudades latinoamericanas dentro de sus rankings de acuerdo con los modelos de ciudades inteligente. La presencia digital dentro de la cultura ha comenzado a mostrarse en algunas ciudades, esto debido a la adopción del concepto y proyectos e iniciativas que consiguen mejoras en eficiencia energética, en la prestación de sus servicios y la movilidad; sin embargo, esto aún no se ha generalizado. Para la CEPAL (2021) el modelo de desarrollo urbano adopta tecnologías digitales para optimizar la eficiencia de las operaciones y servicios y, de esta manera, aumenta la calidad de vida de sus habitantes y mejora el medio ambiente.

La medición de las ciudades inteligente a través de los modelos existentes de autores como: Moreno (2015), Salavarría (2018) y Velarde (2020) resultan de diferentes parámetros y la importancia que

cada uno de ellos le da (economía, medio ambiente, gobernanza-gobierno, servicios públicos, tecnología, etc.). Cada parámetro, a su vez, cuenta con sus propios indicadores.

En México se expidió una ley para promover el acceso e inclusión digital como derecho. Con ese objetivo, se impulsa la infraestructura tecnológica, su acceso, con capacitación para personal en el ámbito de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación (Matus y Ramírez, 2016). No obstante, las ciudades de América Latina siguen trabajando en definir sus políticas y programas que les permitan incorporar la innovación e inteligencia con base en las TIC para poder promover la sostenibilidad y transformación hacia una ciudad inteligente.

Método

Se efectuó una metodología de investigación cualitativa por medio de un mapeo, como se muestra en la Figura 1, para organizar el marco teórico y poder profundizar en la revisión de la literatura (Hernández-Sampieri et al., 2014).

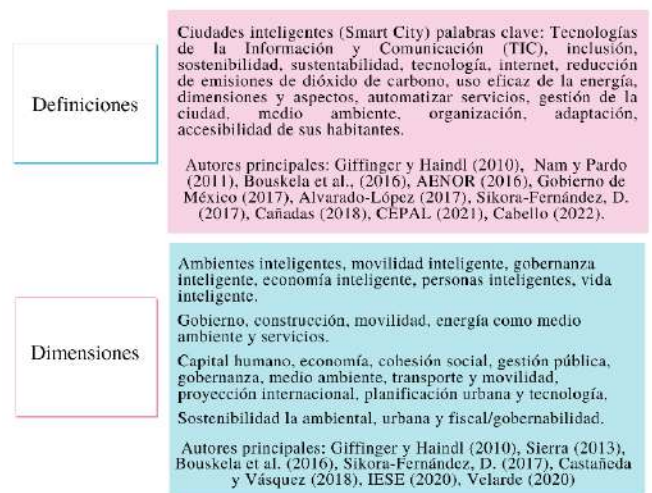


Figura 1. Mapeo de la Literatura de Ciudades Inteligentes (Smart City). Fuente: Elaboración propia.

Para llevar a cabo una buena práctica, ésta se debe basar en el análisis de la evidencia que existe, por lo cual se realizó una revisión sistemática de la literatura. Se consultaron bases de datos de publicaciones científicas a través de la búsqueda del tema y la detección de las palabras clave, lo

cual se hizo por medio de los motores de búsqueda de internet como *Dialnet*, *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*, *Google scholar (Google Académico)*, *Springer Link*, entre otros. Los términos han evolucionado a lo largo del tiempo, sin embargo, se consideró su exploración desde el estado de arte, pues se utilizaron técnicas de análisis y comprensión para poder argumentar los resultados que se presentan al lector.

Resultados

Si bien la visión de ciudad inteligente varía de acuerdo con las necesidades y perspectivas de cada ciudad. Según Giffinger y Haindl (2010), se identifican características en torno a seis dimensiones fundamentales, éstas son: ambientes inteligentes, movilidad inteligente, gobernanza inteligente, economía inteligente, personas inteligentes y vida inteligente. Para Castañeda y Vásquez (2018), Velarde (2020) y IESE (2020) establecen las siguiente dimensiones: capital humano, economía, cohesión social, gestión pública, gobernanza, medio ambiente, transporte y movilidad, proyección internacional, planificación urbana y tecnología. Por otra parte, Sierra (2013) menciona estas: gobierno, construcción, movilidad, energía, medio ambiente y servicios. Mientras que Bouskela et al. (2016), se basa en las dimensiones de sostenibilidad ambiental, urbana y fiscal/gobernabilidad.

Nam y Pardo (2011) adoptan un enfoque categorizando los componentes de las ciudades inteligentes dentro de tres factores centrales: Factores Tecnológicos (Infraestructura física, Tecnologías inteligentes, Tecnologías móviles, Tecnologías virtuales, Redes digitales); Factores Humanos (Infraestructura humana, Capital social); y Factores Institucionales (Gobernanza, Política, Regulaciones / directivas).

Para ser considerado dentro de la clasificación de ciudad inteligente se toman en cuenta las seis características principales y más relevantes de acuerdo con el estudio y guía metodológica de las ciudades inteligentes basado en Giffinger y Haindl (2010):

- 1) **Ambientes inteligentes (*Smart Environment*):** se refiere a la gestión eficiente y sustentable de los recursos que se tienen dentro de la ciudad (energía, agua, medio ambiente, gestión de residuos).
- 2) **Movilidad inteligente (*Smart Mobility*):** su objetivo es mejorar el transporte, la movilidad y accesibilidad en la ciudad (infraestructura, transporte, tráfico, estacionamiento, conectividad).
- 3) **Gobernanza inteligente (*Smart Governance*):** está dirigido hacia los gobiernos, los cuales deben ser abiertos y transparentes en apoyo con la tecnología para la búsqueda de calidad y eficiencia en los servicios (planificación estratégica, administración digital, información geográfica, transparencia y participación).
- 4) **Economía inteligente (*Smart Economy*):** está enfocada en el desarrollo económico de la ciudad a través de la innovación (turismo, consumo, negocios, empleo, emprendimiento, comercio, empresas digitales, ecosistemas de innovación).
- 5) **Personas inteligentes (*Smart People*):** está orientada a potenciar el capital humano y social de la ciudad (colaboración ciudadana e inclusión digital).
- 6) **Vida inteligente (*Smart Living*):** su objetivo es incrementar la calidad de vida de las personas (educación, salud, cultura, vivienda e infraestructura, asuntos sociales, seguridad, emergencias, urbanismo).

A continuación y de acuerdo con los seis puntos anteriores, se presenta la integración de las características y componentes de las ciudades inteligentes en la Figura 2.

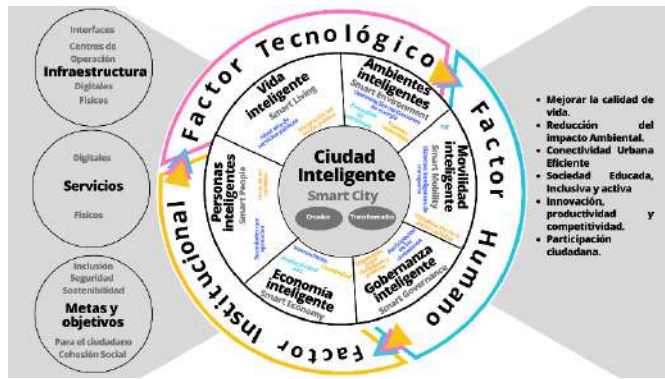


Figura 2 Características que conforman a las ciudades inteligentes. Adaptado de: (Alvarado-López, 2019; Cañadas, 2018; Copaja-Alegre & Esponda-Alva, 2019; Sikora-Fernández, 2017).

En el reporte de *Smart City Index IMD* (2021) se evaluaron 118 ciudades del mundo a partir de los aspectos económicos, tecnológicos y de las dimensiones humanas (calidad de vida, medio ambiente e inclusión). De las ciudades evaluadas encontramos a Buenos Aires, (Argentina), Medellín (Colombia), Ciudad de México (México), Santiago (Chile) y Bogotá (Colombia). Por otro lado, el *Cities in Motion Index IESE* (2022) considera las dimensiones de la economía (capital humano, tecnología, medio ambiente, proyección internacional) y de cohesión social (movilidad y transporte, gobernanza, planificación urbana y gestión pública). En su lista se encuentran Santiago (Chile), Buenos Aires (Argentina), Ciudad de México (México), Panamá (Panamá) y Montevideo (Uruguay). La mayoría de las ciudades latinoamericanas no ocupan los primeros puestos debido a que en la región se concentra la mayor urbanización en el planeta, por lo cual los desafíos son aún mayores.

Cabello (2022) segmenta las ciudades de acuerdo con su proceso de digitalización en América Latina y el Caribe, de lo cual resulta la siguiente división: Ciudades líderes, las cuales tienen un plan estratégico para la transformación digital; Ciudades en proceso de digitalización, las cuales se enfocan en la resolución de temas puntuales; y Ciudades de digitalización incipiente, las cuales están bajo el desarrollo del gobierno abierto y la participación ciudadana. No obstante, cada ciudad presenta

prioridades distintas de acuerdo con sus necesidades. En su estudio, Cabello (2022) detalla distintos patrones de desarrollo en las ciudades inteligentes; por ejemplo, Buenos Aires destaca en innovación pues atiende a los ciudadanos por medio de una Inteligencia Artificial y desde el desarrollo de las organizaciones políticas basadas en evidencia. Por otro lado, la Ciudad de México realiza distintos desarrollos en aplicaciones de software para simplificar trámites y procesos.

Para González y Luna (2019), en México se debe de estimular la creatividad institucional y colectiva para la creación de ciudades inteligente, esto a través de la generación de redes entre los actores (sector público, sector privado y sector social) para que puedan generar un desarrollo social inclusivo y económico.

Las iniciativas para la transformación a ciudades inteligente en América Latina están cambiando y ganando terreno. Colocan a las personas y su calidad de vida en este tipo de desarrollo urbano, con una búsqueda de formas para mejorar las ciudades. Hay una necesidad de avanzar en los programas locales y nacionales para ir adoptando los modelos de ciudades inteligente y así cerrar la brechas sociales que aún existen en América Latina (Alvarado-López, 2017). No obstante, estos proyectos generalmente requieren de una gran inversión por parte del gobierno, por lo cual se necesita de un conjunto de políticas y tecnologías que permitan atender y cerrar estas brechas (Cabello, 2022).

El trabajo realizado por Alvarado-López (2020), bajo un modelo de agregación ponderada de indicadores parciales, representa las dimensiones (sociales, económica, ambiental y acceso uso de TIC) del análisis de las ciudades (en este caso, Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey, Aguascalientes y Querétaro). Se destaca la Ciudad de México como la ciudad más inteligente dentro de la república mexicana. Sin embargo, ciudades pequeñas cuentan con características importantes de este tipo de modelo. Tal es el caso de Querétaro, que puede transitar hacia un modelo de ciudad inteligente y

sostenible a través de políticas públicas encaminadas a la articulación y suma de esfuerzos de gobierno, academia, sector productivo y ciudadanía. No obstante, se deben de fortalecer los estándares de calidad de vida para la población y los inversionistas.

Conclusiones

El enfoque para el desarrollo del modelo de una ciudad inteligente puede ayudar a la sociedad a limitar o eliminar los desafíos que afectan diariamente a los usuarios de la ciudad. Este enfoque puede ayudar a elevar el grado de satisfacción de los habitantes al facilitar la integración de procesos públicos realizando un buen diseño urbano para generar ventajas competitivas en actividades económicas, residenciales, laborales, culturales y sociales. Se pueden aprovechar los avances tecnológicos (como las TIC) que han cambiado la forma en que se realizan los negocios, las empresas, las organizaciones, las sociedades, la economía y las comunicaciones; avances que han generado un cambio de paradigma hacia la conectividad. Esta evolución cuenta con herramientas como la innovación para lograr un crecimiento sustentable.

Una ciudad inteligente debe de ir más allá de algunas aplicaciones para transporte o turismo; debe generar planeación de desarrollo urbano inteligente. Para esto, es necesario comprender lo que son las ciudades inteligentes, la digitalización o el Internet de las Cosas. De esta manera, podrán mejorar la vida de sus residentes utilizando las herramientas de gestión en una sociedad que cada vez está exigiendo y demandando más. Resultan indispensables: vías de movilidad para tener un tráfico eficiente; detección de niveles de basura para optimizar las rutas de recolección de residuos; acceso al transporte de servicios ciclísticos y públicos; consumo de energías limpias para reducir el impacto medioambiental; disponibilidad de información sobre los estacionamientos; mayor inclusión social; mejora en

la detección en niveles de consumo de agua; y mayor seguridad. La continuidad en estos esfuerzos va a depender de todos, pero sobre todo de los gobiernos locales y regionales.

Dentro de las desventajas de las ciudades inteligentes está el requerimiento de una gran inversión de capital para la integración de la tecnología. Se requiere del compromiso por parte de los actores involucrados para la financiación; así se podrá ofrecer el servicio. Otro aspecto clave es la capacidad de los gobiernos para establecer marcos de gobernanza para facilitar la gestión y promoción hacia otras instituciones, empresas y organizaciones civiles. Poseer un modelo integral será fundamental para definir la relación de las necesidades de la ciudad con su entorno. Si bien ya se tiene la tecnología disponible para realizar tal modelo, hace falta su difusión y su implementación para generar desarrollos estratégicos apropiados que estimulen de manera positiva la interacción de los actores y el fomento de la innovación para avanzar en la sostenibilidad y, de esta manera, integrar los campos económicos, políticos, sociales y culturales; campos que contribuyen a la solución de los problemas urbanos. Aún se tiene mucho que realizar dentro de las ciudades latinoamericanas y de México, particularmente.

En comparación con países europeos o norteamericanos, Latinoamérica refleja índices bajos en innovación y desarrollo de las TIC. Por esta razón, se pretende seguir con este tema para proporcionar más información y proponer más investigaciones para presentar la paradoja de lo simple con lo complejo, relacionadas con personas, movilidad, empleos, vivienda, urbanismo y sustentabilidad. Lo anterior con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas, a través de la solución de los problemas urbanos por medio de las ciudades inteligentes en México.

Referencias

- Ahmad, H. (2019). *Development of a Readiness Assessment Model for Evaluating Big Data Projects: Case Study of Smart City in Oregon, USA* [Tesis doctoral]. Universidad Estatal de Portland. DOI: <https://doi.org/10.15760/etd.6872>
- Alvarado-López, R. (2017). ciudad inteligente y sostenible: hacia un modelo de innovación inclusiva. *PAAKAT: Revista de Tecnología y Sociedad*, 7(13), pp. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.32870/pk.a7n13.299>
- Alvarado-López, R. (2019). Las Ciudades Inteligentes como nuevo modelo de gestión urbana en la era digital. *Las Ciencias Sociales y La Agenda Nacional Reflexiones y Propuestas Desde Las Ciencias Sociales*, 13. Recuperado de: <https://www.comecso.com/ciencias-sociales-agenda-nacional/cs/article/view/1647/1304>
- Alvarado-López, R. (2020). ciudades inteligente y sostenibles: una medición a cinco ciudades de México. *Reis*, 30(55), pp. 1–28. DOI: <https://doi.org/10.2307/40184061>
- Banco Mundial. (2020). *Desarrollo urbano: Panorama general*. Recuperado de: <https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview>
- Basalla, G. (1991). *La evolución de la tecnología*, Editorial Crítica.
- Bijker, W. E. (2005). ¿Cómo y por qué es importante la tecnología? *Redes*, 11(21), pp. 19–53.
- Blanco, R., Fontodrona, J., & Poveda, C. (2017). La industria 4.0: El estado de la cuestión. *Economía Industrial*, 406, pp. 151–164. Recuperado de: <https://www.mincotur.gob.es/Publicaciones/Publicacionesperiodicas/EconomiaIndustrial/RevistaEconomiaIndustrial/406/BLANCO, FONTODRONA Y POVEDA.pdf>
- Bouskela, M., Casseb, M., & Bassi, S. (2016). *La ruta hacia las Smart Cities Migrando de una gestión tradicional a la ciudad inteligente* (Vol. 454). Recuperado de: <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/La-ruta-hacia-las-smart-cities-Migrando-de-una-gestión-tradicional-a-la-ciudad-inteligente.pdf>
- Cabello, S. (2022). El camino de desarrollo de las ciudades inteligentes. Una evaluación de Bogotá, Buenos Aires, Ciudad de México y São Paulo. *CEPAL*, 76. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48000-camino-desarrollo-ciudades-inteligentes-evaluacion-bogota-buenos-aires-ciudad>
- Cadeño, R. (2001). Contribuciones cortas Ciencia y tecnología en la sociedad. Perspectiva histórico-conceptual. *Acimed*, 9(1), pp. 72–78. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/aci/v9n1/aci051001.pdf>
- Cañadas, R. (2018). Smart City From the Collective Intelligence , Desing Thinking , and Storytelling Approach. *VI Congreso Internacional Ciudades Creativas*, pp. 129–159. Recuperado de: https://www.ciudades-creativas.com/proceedings/6ccc/proceedings-6ccc_007.pdf
- Cárdenas-Elorduy, E. (2012). Historia Del Desarrollo Y La Planeación, Urbanos, En México. En *Asociación Mexicana de Urbanistas*, A. C. (AMU). Recuperado de: [http://bibliotecadigital.imipens.org/uploads/Historia del desarrollo y la planeación, urbanos, en Mexico -.pdf](http://bibliotecadigital.imipens.org/uploads/Historia%20del%20desarrollo%20y%20la%20planeacion,%20urbanos,%20en%20Mexico.pdf)
- Castañeda, E., & Vásquez, N. (2018). *Ciudades Inteligentes a las apuetsas de la agenda 2030 y desarrollo sostenible*. Universidad Cooperativa de Colombia. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12494/6398>
- CEPAL. (2021). *Tecnologías digitales para un nuevo futuro*. Recuperado de: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/46816/1/S2000961_es.pdf
- Copaja-Alegre, M., & Esponda-Alva, C. (2019). Tecnología e innovación hacia la ciudad inteligente. Avances, perspectivas y desafíos. *Bitácora Urbano Territorial*, 29(2), pp. 59–70. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v29n2.68333>
- Cortés, J. (2015). El crecimiento urbano de las ciudades: enfoques desarrollista, autoritario, neoliberal y sustentable. *Paradigma Económico*, 7(1), pp. 127–149. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5926288>
- Giffinger, R., & Haindl, G. (2010). Smart cities ranking: an effective instrument for the positioning of cities? *Architecture, City and Environment*, IV(12), pp. 7–25. DOI: <https://doi.org/10.5821/ctv.7571>
- Gobierno de México. (2017). *¿Qué son las “ciudades inteligente”?* Comisión Nacional para el uso eficiente de la energía. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conuee/articulos/que-son-las-ciudades-inteligentes>
- González, G., & Luna, J. (2019). Ciudades Inteligentes en México: de la sostenibilidad a la agenda de gobierno y legislativa. *Administración y Organizaciones*, 22(42), pp. 9–20. Recuperado de: <https://doi.org/10.24275/uam/xoc/dcsh/rayo/2019v22n42/gonzalez>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández, C., & Pilar, B. M. del. (2014). *Metodología de la Investigación*. (McGraw-Hill (ed.); 6a.). Recuperado de: <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- IESE. (2020). *Índice IESE Cities in Motion*.
- IESE. (2022). *IESE Cities in Motion Index 2022*. http://www.iese.edu/research/pdfs/ST-0396-E.pdf?_ga=1.13056181.367859667.1479064155
- IMD. (2021). *Smart City Index 2021 City performance overview By ranking*.
- INEGI. (2020). *Número de habitantes*. INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P>
- Matus, M., & Ramírez, R. (2016). Ciudades Inteligentes en Iberoamérica; ejemplos de iniciativas desde el sector privado, la sociedad civil, el gobierno y la academia. En *Infotec*. Recuperado de: <https://infotec.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1027/142/1/32.pdf#page=42>
- Moreno, C. (2015). *Desarrollo de un modelo de evaluación de ciudades basadas en el concepto de ciudad inteligente (Smart city)* [tesis

- doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. Recuperado de: [https://academic.microsoft.com/paper/2312859154/citedby/search?q=Desarrollo de un modelo de evaluación de ciudades basado en el concepto de ciudad inteligente \(Smart city\)&qe=Rld%253D2312859154&f=&orderBy=0](https://academic.microsoft.com/paper/2312859154/citedby/search?q=Desarrollo+de+un+modelo+de+evaluación+de+ciudades+basado+en+el+concepto+de+ciudad+inteligente+(Smart+city)&qe=Rld%253D2312859154&f=&orderBy=0)
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). Conceptualizing smart city with dimensions of technology, people, and institutions. *ACM International Conference Proceeding Series, June*, pp. 282–291. DOI: <https://doi.org/10.1145/2037556.2037602>
- Nazareno, J. (2017). Ciudades Inteligentes (Smart Cities). In *Comisión Nacional Para El Uso Eficiente De La Energía*. Recuperado de: https://www.gob.mx/uploads/attachment/file/272270/smartcity_MODIFICADA.pdf
- OECD;Eurostat. (2005). Manual de Oslo 2005. In *Manual de Oslo*. Recuperado de: https://datos.portaldelcomerciante.com/userfiles/30/Biblioteca/7c30b1dc2c2947a56553Manual_de_Oslo_Innovacionempresarial.pdf
- ONU. (2017). ODS 11: Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles en América Latina y el Caribe. *Organización de Las Naciones Unidas*. Recuperado de: https://www.cepal.org/sites/default/files/static/files/ods11_c1900717_press.pdf
- Ortiz, E., & Nagles, N. (2013). Gestión de Tecnología e Innovación. Teoría, proceso y práctica. En *Gestión de Tecnología e Innovación. Teoría, proceso y práctica*. DOI: <https://doi.org/10.21158/9789587562552>
- Parra-Valencia, J. A., Guerrero, C. D., & Rico-Bautista, D. (2017). IOT: una aproximación desde ciudad inteligente a universidad inteligente. *Revista Ingenio*, 13(1), pp. 9–20. DOI: <https://doi.org/10.22463/2011642x.2128>
- Pollio, A. (2016). Smart cities as hacker cities. Organized urbanism and restructuring welfare in crisis-ridden Italy. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 25(49–1), pp. 31–44. DOI: <https://doi.org/10.20983/noesis.2016.12.3>
- Rogers, E. M., Singhal, A., & Quinlan, M. M. (2019). Diffusion of innovations. En *An Integrated Approach to Communication Theory and Research, Third Edition*. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203710753-35>
- Rozo-García, F. (2020). Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0. *Revista UIS Ingenierías*, 19(2), pp. 177–191. DOI: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020019>
- Salavarría, O. (2018). *Smart City Diagnosis of the city Guayaquil*, [Tesis de Maestría] Universidad Politécnica de Valencia. DOI: <http://hdl.handle.net/10251/98485>
- Santangelo, M. (2016). A (more?) intelligent city. *Nóesis. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 25(49–1), pp. 65–77. DOI: <https://doi.org/10.20983/noesis.2016.12.5>
- Sierra, J. (2013). *Vigilancia Tecnológica E Inteligencia Competitiva En Ciudades Inteligentes Caso Salud Pública* [Tesis de Licenciatura] Universidad Pontificia Bolivariana. Recuperado de: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1532/VIGILANCIA%20TECNOL%20C3%93GICA%20E%20INTELIGENCIA%20COMPETITIVA%20EN%20CIUDADES%20INTELIGENTES%20CASO%20SALUD%20P%20C3%9ABLICA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sikora-Fernández, D. (2017). Factores de desarrollo de las ciudades inteligentes. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(1). Recuperado de: <http://www.scielo.org.ar/pdf/reuge/v26n1/v26n1a07.pdf>
- Velarde, J. (2020). *Nivel de conocimiento del modelo con enfoque de ciudades inteligentes y necesidad de implementación, en resiliencia post COVID-19 Trujillo, 2020* [Tesis Doctoral]. Universidad Cesar Vallejo. Recuperado de: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72254>

Tecnologías para optimizar el agua en la acuicultura

María de la Luz Sánchez Estrada; Valeria Caltzontzin Rabell;
Priscila Sarai Flores Aguilar, Genaro Martín Soto Zarazúa,

Correspondencia: luzsanc_25@hotmail.com, Valeria.caltzontzinrabell@gmail.com, pflores21@alumnos.uaq.mx ,
genaro.soto@uaq.mx

Resumen

En México la acuicultura, al igual que en otros países, está creciendo y obligando a los productores a consumir o extraer grandes cantidades de agua. Este consumo es comparable al que ocupa el ganado, razón por la cual los acuicultores mexicanos necesitan actualizarse en el uso racional del recurso hídrico. Lo anterior es posible lograrlo a través de tecnologías que se ocupan en otros países con el fin de hacer eficiente el consumo de agua para no drenarla como lo hacen la mayoría de las industrias acuícolas. Este texto presenta las tecnologías actuales que pueden utilizarse en el cultivo de peces para usar menos recurso hídrico.

Palabras clave: acuicultura, biofloc, acuaponía, sistema de recirculación acuícola

Abstract

As in other countries, aquaculture in Mexico is growing, forcing producers to consume or extract large amounts of water. This consumption is comparable to that of livestock; therefore, Mexican aquaculture farmers need to be updated in the rational use of water resources through technologies that are used in other countries to make water consumption efficient and not drain it as most aquaculture industries currently do. This manuscript presents current technologies that can be used in fish farming to use fewer water resources.

Keywords: aquaculture, biofloc, aquaponic, recirculating aquaculture sistem

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

06 de marzo de 2023

Introducción

La acuicultura es una de las mayores industrias para la producción de alimentos. Su crecimiento promedio anual es de 3.2 % y se prevé que su consumo aumente de 52 % a 58 % para el año 2030 (Tom et al., 2021). Entre los organismos más cultivados se encuentran: camarón, róbalo, rodaballo, fugu, mero, tilapia, carpa y abulón (Robles-Porchas et al., 2020).

Este crecimiento se debe principalmente al aumento poblacional y a la disminución en la captura de especies salvajes. Sin embargo, esta demanda trae consigo daños al ambiente pues se contamina el agua, se genera eutrofización y se liberan químicos tóxicos, entre otros (Ahmad et al., 2021). El agua en los sistemas acuícolas tiene una importante carga orgánica, la cual está compuesta de residuos de alimento, heces y nutrientes como fósforo y nitrógeno, los cuales crean un ambiente dañino para los peces. Además, esta composición aumenta la actividad de bacterias aeróbicas y provoca que el oxígeno disuelto en el agua disminuya. La escasez del agua, así como su contaminación, son retos a los cuales nos enfrentamos como humanidad. Por esa razón, se requiere del desarrollo de tecnologías sustentables para optimizar y mejorar el tratamiento de aguas residuales acuícolas (Tom et al., 2021).

Para contribuir en la solución de esta problemática se han propuesto, desarrollado e implementado diversas tecnologías, tales como: los Sistemas de Recirculación Acuícola (RAS por sus siglas en inglés), el Sistema Biofloc y la Acuaponía. En la Figura 1 se ilustra su funcionamiento. El presente trabajo tiene como objetivo describir cada una de las tecnologías tradicionales, las nuevas propuestas, sus ventajas y desventajas, así como las perspectivas que existen respecto a su desarrollo.

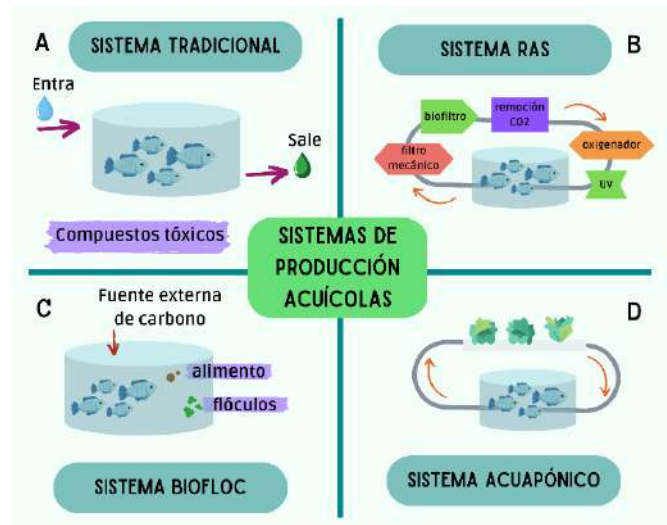


Figura 1. Tipos de sistemas de producción acuícola Fuente: Elaboración propia.

Sistema tradicional

La técnica de cultivo acuícola tradicional (utilizada por la mayoría de los acuicultores) usa una gran cantidad de agua limpia y tiene la desventaja de tirar agua sin medida diariamente. En promedio se tiene una tasa de recambio de entre el 20 % y 50 % del volumen de un estanque; este porcentaje puede ser ajustado dependiendo de la densidad y la disponibilidad de agua (Ver Figura 1a). La razón del recambio se debe a la concentración dentro de los estanques de sedimentos y compuestos tóxicos como amoníaco, amonio, nitritos (NH_3 , NH_4^+ , NO_2), entre otros; compuestos que deben ser removidos (Guzmán-Luna et al., 2021).

Para el año 2015, México contaba con 47 centros de cría de alevines y 3 970 centros de engorde registrados en el Consejo Nacional de Pesca y Acuicultura (aunque existían otros no registrados). Los sistemas de producción acuícola son los sistemas extensivos, semi-intensivos e intensivos que, de acuerdo con los insumos que requieran, generan diferentes impactos ambientales. Por ejemplo, los sistemas de producción semi-intensivos e intensivos se caracterizan por su maximización de la producción con altos rendimientos de 100 Tm/ha/año a 500 Tm/ha/año. Estos sistemas dependen totalmente de

alimento comercial, energía y recambios constantes de agua. En contraste, los sistemas extensivos almacenan peces a bajas densidades (tres peces por m³) y requieren de fertilizantes para estimular la producción natural del alimento dentro de los estanques. La desventaja: los fertilizantes contaminan el agua (Guzmán-Luna et al., 2021).

En una comparativa de la cantidad de agua utilizada en México para producir proteína de origen animal, la tilapia producida en sistemas intensivos genera la mayor huella hídrica (126 l/g de proteína), por encima de la carne de res (51 l/g), el cerdo (33 l/g) y las aves de corral (14 l/g) (Guzmán-Luna et al., 2021).

A pesar de que los peces de la acuicultura muestran un gran potencial para contribuir a la seguridad alimentaria, este tipo de producción está relacionada con altos impactos ambientales. México produce el 91 % de la tilapia que se consume en el país y, además, es el noveno productor mundial de tilapia con 180 000 toneladas reportadas en 2017 (Guzmán-Luna et al., 2021).

Recientes estudios resaltan una gran preocupación sobre la acuicultura de tilapia en los sistemas intensivos de México, pues éstos tienen grandes huellas de agua, energía y tierra debido a las cargas de efluentes del estanque. Sin embargo y debido al rápido crecimiento de la acuicultura, estas preocupaciones no han recibido mucha atención de los organismos que protegen el agua, por lo cual las consecuencias son inciertas a corto plazo.

En este sentido, los investigadores científicos centran sus estudios en hacer eficientes los procesos acuícolas para mejorar el rendimiento del cultivo, el control de enfermedades, el ahorro de energía y agua. Es este último, el agua, el más importante en el enfoque de este artículo, pues frente al calentamiento global el recurso hídrico en la acuicultura deberá ser monitoreado y regulado, esto con el fin de tomar acciones inmediatas para optimizar su uso.

Sistema de Recirculación Acuícola

Una de las estrategias que ha mostrado gran potencial es el Sistema de Recirculación Acuícola (RAS por sus siglas en inglés) (Figura 1b). Este sistema, el cual permite cultivar peces bajo techo y en un sistema controlado, fue desarrollado en 1950 en Japón. La primera vez que se propuso para la producción comercial de peces fue en Dinamarca en los años setenta. A partir de ahí, y durante las últimas dos décadas, la aplicación y desarrollo de estos sistemas ha crecido de manera significativa.

Los sistemas RAS han otorgado la oportunidad de producir peces en agua con baja calidad y entornos poco favorables. Se ha reportado que es posible cultivar tanto peces de agua dulce y cálida como peces de agua salada y fría; es posible producir alevines, peces en etapa juvenil y exóticos, lo cual lo vuelve un sistema flexible (Ahmed & Turchini, 2021). Algunos ejemplos de especies cultivadas son anguila, gambas, salmón, lubina, trucha, rodaballo, tilapia, atún, entre otros (Ahmad et al., 2021).

Un sistema RAS está compuesto por tanques con peces que se encuentran bajo un ambiente controlado dentro de construcciones cerradas, normalmente invernaderos. Para limpiar el agua se utilizan sedimentadores, filtros mecánicos, filtros biológicos y esterilización UV. Para oxigenarla se utilizan oxigenadores. Una vez tratada, el agua recircula nuevamente al sistema (Robles-Porchas et al., 2020). De manera general, se logra reutilizar hasta un 90 % total del agua (Tom et al., 2021), pues sólo se tienen pérdidas por evaporación y por la extracción de lodos sedimentados (los cuales contienen entre 85 % y 98 % de la materia orgánica) (Ahmad et al., 2021).

La densidad de cultivo que puede lograrse con el sistema RAS se encuentra entre 70 kg/m³ y 120 kg/m³, con radios de conversión alimenticios entre 0.8 y 1.1. En los sistemas más grandes se pueden generar hasta 500 toneladas de peces al año. Esta elevada producción hace que el sistema también se conozca como cultivo hiper o super intensivo. Respecto a su impacto ambiental, este sistema permite aumentar el manejo de residuos, reducir la cantidad de agua utilizada y reciclar los nutrientes. Además, debido a los procesos de tratamiento sobre los nitritos presentes en el agua, los cuales son convertidos a nitratos, puede ser incorporado en un sistema integrado de agricultura y acuicultura conocido como Acuaponía (Ahmed & Turchini, 2021).

Aunque el RAS presenta diversas ventajas, su contribución a la producción acuícola global es baja. Esto se debe a diversos retos económicos y tecnológicos que incluyen la compra de equipos sofisticados como bombas, reguladores de temperatura, filtros y sensores para el monitoreo avanzado, además de la necesidad de la automatización de los sistemas de control (Ahmad et al., 2021). En este sentido, la energía juega un importante papel pues aumenta los costos operacionales. En comparación con un sistema de flujo continuo, el consumo total de energía del sistema RAS es entre 24 % y 40 % mayor (Badiola et al., 2018). Algunas propuestas para atacar estas desventajas incluyen: el uso de energías renovables como los sistemas fotovoltaicos para equipos (Badiola et al., 2018), la optimización de los procesos, el análisis tecno-económico para la compra de equipos más eficientes y el análisis del ciclo de vida del proceso completo, esto con el fin de identificar oportunidades que disminuyan los costos de transportación de los insumos (Ahmed & Turchini, 2021).

Sistema Biofloc

Otra tecnología ampliamente aceptada y de fácil manejo es el sistema Biofloc. Éste fue reportado por primera vez por Avnimelech en 1999 y desde entonces ha sido ampliamente estudiado como una de las alternativas de cultivo acuícola más sostenible, esto debido a que en él no existe el intercambio de agua. Esta tecnología es compleja pues se requiere conocimiento del sistema. En términos generales, se utiliza una fuente de carbono externa (comúnmente melaza), mientras los compuestos nitrogenados (amonio, nitritos y nitratos), el alimento no consumido y las heces de los peces son aprovechadas por una variedad de microorganismos (principalmente bacterias heterotróficas) quienes favorecen el crecimiento microbiano para formar los flóculos bacterianos conocidos como Biofloc. En los últimos 20 años se ha demostrado que la tecnología Biofloc es rentable y respetuosa con el medio ambiente, pues reduce los costos de alimentación debido a que el Biofloc sirve como alimento vivo para los peces (Minaz & Kubilay, 2021).

Otra ventaja del Biofloc: ayuda a que los peces no enfermen y las mortalidades disminuyan, esto en virtud de la existencia de una comunidad microbiana heterótrofa. Sin embargo, se requiere un consumo de oxígeno mayor en el agua para las bacterias y los peces, por lo cual la aireación debes ser constante. Actualmente han aparecido otras variantes de esta tecnología como el *flocponics*, el cual incorpora plantas en el cultivo para el mejor aprovechamiento de los nutrientes del medio (Ariza & Rodríguez, 2019; Pinho *et al.*, 2022).

Por otro lado, surgió una nueva variante de la tecnología Biofloc para su uso en los cultivos de camarón. Se trata de un concepto innovador llamado acumimética (*aquamimicry* en inglés), el cual favorece el crecimiento de los copépodos. Esta técnica fue creada en 2013 por dos antiguos criadores de camarones de Tailandia, Sutee Prasertmark y Veerasan Prayotamornkul. Este método trata de imitar el alimento de los camarones en el medio acuático natural, para ello simula las condiciones

naturales mediante alimento con zooplancton y el uso de bacterias beneficiosas para mejorar la calidad del agua. Para que la acumimética sea exitosa es necesario usar fuentes de carbono fermentado de salvado de arroz, soja y harinas de trigo combinadas con la aplicación de probióticos que mejoran pronunciadamente la floración de zooplancton. Además, es preciso promover la calidad del agua y facilitar el reciclaje de metabolitos nitrogenados en el sistema mediante la creación de una relación simbiótica entre derivados de fuentes de carbono fermentadas (por ejemplo, oli-gosacáridos) y probióticos (por ejemplo, especies de *Bacillus*). Lo anterior reduce la aplicación de terapéuticos y contribuye a la acuicultura verde (Khanjani et al., 2022).

Sistema acuapónico

Los sistemas acuapónicos consisten en integrar prácticas acuícolas con diversas formas de cultivo como, por ejemplo, la hidroponía (cultivo sin suelo) para de esta forma compartir recursos tales como el agua y los nutrientes (Figura 1d). Fue Naegel (1977) el primero en describir un sistema de recirculación en producción combinada de peces y plantas, lo cual dio la base para los sistemas acuapónicos modernos. Más adelante, en los años noventa, Masser, Timmons, Hargreaves, Losordo y Rakocy fueron los pioneros en ocupar, modificar, medir y estandarizar los sistemas acuapónicos acoplados o de un ciclo para producción de vegetales con peces (Rakocy et al., 2016).

A partir de entonces, se generaron un sin número de adecuaciones y modificaciones en la producción; además, se probaron más de 150 tipos de cultivos entre los que se encuentran plantas pertenecientes a la horticultura, plantas medicinales, condimentos y árboles frutales con poco requerimiento nutricional. Respecto a la ingeniería de los sistemas, se han hecho adaptaciones para casi todos los modelos hidropónicos conocidos, tales como: Cultivo en capa nutriente (NFT), Cama flotante (DWF), Cultivo con medio inerte, Flujo y reflujos, Riego por goteo, Torres y paredes verticales, Aeroponía e incluso, como se mencionó anteriormente, se han hecho adaptaciones para

cultivos con Biofloc (Figura 1c) (Flores-Aguilar et al., 2020).

Las tres partes principales de un sistema acuapónico son: el cultivo acuícola, el cultivo vegetal y los microorganismos que se encuentran de forma natural en el agua. Estos últimos, anteriormente menospreciados, hoy en día se sabe que son la clave del buen funcionamiento, rendimiento, crecimiento, desarrollo y calidad del alimento que se integre en un sistema acuapónico. Estos microorganismos consumen los compuestos en las aguas residuales acuícolas, es decir, los desechos metabólicos de los peces por respiración (orina, heces y alimentos no consumidos) y los transforman en las formas químicas más asimilables para las plantas (Delaide et al., 2019). Recientes estudios han reportado que estas aguas residuales generan un estrés benigno en las plantas, de tal manera que aumentan su contenido de antioxidantes, vitaminas y minerales (Delaide et al., 2019).

En contraste, se ha observado a lo largo de más de cuatro décadas que la recirculación del agua de manera continua entre los peces y las plantas genera un equilibrio en el pH. Este proceso es desfavorable para el rendimiento pues no permite que cada componente del sistema acuapónico (peces, plantas y microorganismos) tenga su pH apropiado. Las plantas requieren de un pH de entre 5.5 y 6.0; los peces necesitan un pH de entre 7.0 y 8.0; finalmente, los microorganismos requieren un pH de entre 7.0 y 9.0. Como consecuencia, en 2015 se hizo una modificación a los sistemas acuapónicos en donde el agua que regaba a las plantas no regresaba finalmente al estanque (Goddek et al., 2019). A estos sistemas se les nombró Acuapónicos desacoplados (por sus siglas en inglés AQD). Así, cada ciclo del agua en cada unidad de producción mantiene las condiciones óptimas respectivas. De esta manera es posible aprovechar mejor los nutrientes y el agua, lo cual aumenta el rendimiento y hace a estos sistemas más sostenibles y con cero recambios (Goddek et al., 2019).

En los sistemas acuapónicos modificados es posible cultivar plantas con mayores requerimientos

nutricionales, pues es posible añadir más nutrientes a la parte vegetal sin causar algún daño a los peces, lo cual abre una ventana de posibilidades para cultivar nuevas especies (Rodgers et al., 2022). Pese a estos datos favorables, los AQD tienen como desventaja el costo de inversión y el monitoreo necesario para las unidades de plantas y peces. Por esta razón no se recomiendan su uso en escalas pequeñas. Hoy en día estos sistemas sólo se utilizan a escala semi-comercial y comercial (Goddek et al., 2019).

A continuación, en la Tabla 1 se muestran las ventajas y desventajas de cada sistema presentado.

Sistema de producción	Ventajas	Desventajas	Referencia
Tradicional	Diferentes organismos a cultivar	huella hídrica energética y terrestre son similares a la carne de res	(Guzmán-Luna et al., 2021)
SAR	-Mayor control sobre la producción -Flexibilidad en tipo de cultivo -Se pueden tener cultivos superintensivos	-Adopción lenta de la tecnología por la sociedad. -Requiere equipos sofisticados. -Son costosos (equipo y energía). -Son complejos.	(Ahmed & Turchini, 2021)
Biofloc	-No hay intercambio de agua -Los flocos sirven como alimento vivo disminuyendo los costos de alimentación -menor mortalidad debido a que el sistema inmune de los peces mejora	- Necesita una fuente de aireación constante - mayor formación de lodos	(Ariza y rodríguez, 2019)
Acuaponía	-Se diversifica la producción obteniendo proteína vegetal y animal -Trazabilidad en la producción y a modo orgánico -Menos contaminación por gases tipo invernadero -Mejor uso de los recursos no renovables (agua y nutrientes)	-Conocimiento de cultivo mínimo requerido -Cálculo de cantidades de peces y de plantas (regla general 1:2 respectivamente) -Requiere infraestructura inicial lo cual representa costos de inversión	(Goddek et al., 2019; Flores-Aguilar et al., 2020; Rodgers et al., 2022)

Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes sistemas acuícolas. Fuente: Elaboración propia.

Sostenibilidad para la acuicultura

La Economía circular (EC) es un modelo económico actual y global para el manejo de los bienes y servicios. Comenzó con Stahel y Reday (1967) para establecer el enfoque que debía tomar la industria y la producción en el planeta. Se conceptualizó con Pearce y Turner (1989), quienes explicaron que el ciclo de los materiales (dentro de la economía global) debía seguir el principio de “todo es entrada de otro todo” y, de esta manera, señalaron que las salidas y desechos de un proceso podían ser de nuevo incluidos, ya fuera en el mismo proceso o dentro de otros alternativos, esto con el fin de evitar desechos innecesarios (Figura 2).

El principio de la EC, aplicado a los sistemas de producción de alimentos, busca la conservación de la biodiversidad y el aprovechamiento máximo de los recursos finitos (agua y nutrientes) que circulan dentro de los sistemas de producción. Esto genera una expansión para obtener subproductos de calidad, buscar la concreción del ideal de “cero-desperdicios” y, como resultado añadido, fomentar la seguridad alimentaria y nutricional (Serraj et al., 2018).



Figura 2. Esquema general de la Economía Circular Fuente: Elaboración propia.

Existen tres principios que resumen como debe ser la sostenibilidad en el sector acuícola y piscícola en conjunto con la aplicación de la EC: 1) “Preservar y mejorar el capital natural, minimizando la extracción de recursos y priorizando los renovables”. 2) “Optimizar los rendimientos de los recursos, empleando tecnologías eficientes y promoviendo los flujos circulares de productos y materiales para que sean empleados en su estado de máxima utilidad (mayor valor)”. 3) Minimizar los efectos negativos de la producción de residuos, minimizando su producción y facilitando la conversión de residuos en recursos” (Rodríguez, 2019).

En este sentido, las tecnologías que se describen en este trabajo se han documentado por proveer casi en su totalidad estos tres principios. Existen muchas asociaciones gubernamentales y privadas que promueven y fomentan la investigación, aplicación y transferencias de estas tecnologías para transformar las técnicas piscícolas hacia una Acuicultura Climáticamente Inteligente, esto con el fin de lograr una productividad sostenible en este sector, mientras al mismo tiempo se garantiza la seguridad alimentaria, nutrición y crecimiento económico. Asimismo, se promueve la producción y consumo responsables, lo cual contribuye al desarrollo sostenible local que se encuentra en la Agenda 2030 con sus 17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible (Figura 2). Los recursos que usamos pertenecen al mismo planeta en que vivimos todos, colaborar localmente marca la diferencia de manera global (FAO, 2022; Randers et al., 2019; Sachs et al., 2021).

Referencias

- Ahmad, A., Sheikh Abdullah, S. R., Hasan, H. A., Othman, A. R., & Ismail, N. 'Izzati. (2021). Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. *Journal of Environmental Management*, 287(January), 112271. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>
- Ahmed, N., & Turchini, G. M. (2021). Recirculating aquaculture systems (RAS): Environmental solution and climate change adaptation. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126604. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126604>
- Ariza, F. G., & Rodríguez, E. M. (2019). Tecnología Biofloc (BFT), una alternativa sostenible para el desarrollo de la acuicultura: revisión. *Ingeniería y Región*, 21, pp. 2-11.
- Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture*, 176(3-4), pp. 227-235. [https://doi.org/10.1016/S0044-8486\(99\)00085-X](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(99)00085-X)
- Badiola, M., Basurko, O. C., Piedrahita, R., Hundley, P., & Mendiola, D. (2018). Energy use in Recirculating Aquaculture Systems (RAS): A review. *Aquacultural Engineering*, 81, pp. 57-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2018.03.003>
- Delaide, B., Teerlinck, S., Decombel, A., & Bleyaert, P. (2019). Effect of wastewater from a pikeperch (*Sander lucioperca* L.) recirculated aquaculture system on hydroponic tomato production and quality. *Agricultural Water Management*, 226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105814>
- FAO. (2022). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2022*. FAO. DOI: <https://doi.org/10.4060/CC0461EN>
- Flores-Aguilar, P. S., García-Trejo, J. F., & Martínez-Guido, S. I. (2020). Aquaponic: a Versatile and Integrated alternative in Food Production for the Mexican environment. *Ciencia Autónoma University of Queretaro (UAQ)*, 13, 43-53. Goddek, S., Joyce, A., Wuertz, S., Körner, O., Bläser, I., Reuter, M., & Keesman, K. J. (2019). Decoupled Aquaponics Systems. *Aquaponics Food Production Systems*, pp. 201-229. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8
- Guzmán-Luna, P., Gerbens-Leenes, P. W., & Vaca-Jiménez, S. D. (2021). The water, energy, and land footprint of tilapia aquaculture in Mexico, a comparison of the footprints of fish and meat. *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105224. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105224>
- Khanjani, M. H., Mozanzadeh, M. T., & Fóes, G. K. (2022). Aquamimicry system: a suitable strategy for shrimp aquaculture—a review. *Annals of Animal Science*, 22(4), pp. 1201-1210. DOI: <https://doi.org/10.2478/aoas-2022-0044>
- Minaz, M., & Kubilay, A. (2021). Operating parameters affecting biofloc technology: carbon source, carbon/nitrogen ratio, feeding regime, stocking density, salinity, aeration, and microbial community manipulation. *Aquaculture International*, 29(3), pp. 1121-1140. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00681-x>

- Pinho, S. M., de Lima, J. P., David, L. H., Emerenciano, M. G., Goddek, S., Verdegem, M. C., ... & Portella, M. C. (2022). FLOCponics: The integration of biofloc technology with plant production. *Reviews in Aquaculture*, 14(2), pp. 647-675. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12617>
- Rakocy, J., Masser, M., & Losordo, T. (2016). *Recirculating Aquaculture Tank Production Systems: Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture*. DOI: <http://osufacts.okstate.edu>
- Randers, J., Rockström, J., Stoknes, P.-E., Goluke, U., Collste, D., Cornell, S. E., & Donges, J. (2019). Achieving the 17 Sustainable Development Goals within 9 planetary boundaries. *Global Sustainability*, 2. DOI: <https://doi.org/10.1017/SUS.2019.22>
- Robles-Porchas, G. R., Gollas-Galván, T., Martínez-Porchas, M., Martínez-Cordova, L. R., Miranda-Baeza, A., & Vargas-Albores, F. (2020). The nitrification process for nitrogen removal in biofloc system aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 12(4), pp. 2228–2249. DOI: <https://doi.org/10.1111/raq.12431>
- Rodgers, D., Won, E., Timmons, M. B., & Mattson, N. (2022). Complementary Nutrients in Decoupled Aquaponics Enhance Basil Performance. *Horticulturae* 2022, 8(2), p. 111. <https://doi.org/10.3390/HORTICULTURAE8020111>
- Rodríguez, M. (2019). *Implicaciones de la Economía Circular para el sector acuícola*. Recuperado de: <http://webs.uvigo.es/miguel.r/>
- Sachs, J., Schmidt-Traub, G., Kroll, C., Lafortune, G., & Fuller, G. (2021). Sustainable Development Report 2020. In *Sustainable Development Report 2020*. Cambridge University Press. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108992411>
- Serraj, R., Krishnan, L., & Pingali, P. (2018). *Agriculture and Food Systems to 2050: A Synthesis* (pp. 3–45). DOI: https://doi.org/10.1142/9789813278356_0001
- Tom, A. P., Jayakumar, J. S., Biju, M., Somarajan, J., & Ibrahim, M. A. (2021). Aquaculture wastewater treatment technologies and their sustainability: A review. *Energy Nexus*, 4(July), 100022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2021.100022>

Reconocimiento de la Lengua de Señas Mexicana mediante redes neuronales

Autores: Kenneth Mejía Pérez, Diana Margarita Córdova Esparza

Facultad de Informática, Campus Juriquilla, Av. De las Ciencias S/N, Querétaro, Qro.

Correspondencia: kmejia09@alumnos.uaq.mx , diana.cordova@uaq.mx

Resumen

En el presente trabajo de investigación se desarrolló un sistema para el reconocimiento automático del abecedario dactilológico de la Lengua de Señas Mexicana (LSM), esto mediante el uso de redes neuronales recurrentes y el uso de una cámara de profundidad. Para la clasificación automática del conjunto de señas se utilizó una red neuronal recurrente (RNN, por sus siglas en inglés). Para evaluar el rendimiento del clasificador se calculó la precisión, la recuperación y la exactitud.

Palabras clave: Lengua de señas, cámara RGB-D, redes neuronales

Abstract

In the present research work, we developed a system for automatically recognizing the Mexican Sign Language (LSM)'s dactylological alphabet using a depth camera and recurrent neural networks (RNN) and its variations, such as LSTM and GRU. We used precision, recall, and accuracy to evaluate the classifier's performance.

Keywords: Sign Language, RGB-D camera, neural networks

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

23 de febrero de 2023

1. Introducción

La lengua de señas es uno de los medios de comunicación más utilizado por las personas con discapacidades auditivas en todo el mundo. La lengua de señas se diferencia de una lengua oral debido a que utiliza el canal de comunicación visogestual en lugar del audio-vocal (Tovar, 2001). Por tal motivo, la lengua de señas, como cualquier otro idioma, tiene su propia estructura fonológica. No obstante, el término fonología hace referencia a sonidos verbales (Burquest, 2009). Por esta razón, en la lengua de señas el concepto de fonología se sustituye por el de querología, el cual describe las unidades combinatorias elementales o queremas que constituyen las palabras y signos de las lenguas de señas. La querología analiza las señas mediante los siguientes parámetros en función de rasgos geométricos y de movimiento (Rodríguez-González, 1992):

1. Queirema (configuración): forma que adopta la mano de acuerdo con la configuración de los dedos.
2. Kinema (movimiento): como algunas señas son dinámicas, el kinema se refiere a la forma en la cual se realiza el movimiento (circular, zig zag, lineal, etc.) que produce diferencias semánticas.
3. Toponema (ubicación): espacio donde se hace la seña.
4. Kineprosema (dirección): movimiento de las manos hacia un sentido.
5. Queirotropema (orientación): orientación de la mano con respecto al cuerpo.
6. Prosonema (rasgos no manuales): se refiere a todos aquellos rasgos que no utilizan las manos, principalmente movimiento corporal y expresiones faciales.

La lengua de señas, también conocida como lengua de signos, clasifica las señas en unimanuales y bimanuales. Las unimanuales pueden ser estáticas o dinámicas; mientras que las bimanuales pueden ser simétricas o asimétricas (Cruz y Ramírez, 2017).

El presente trabajo de investigación se encuentra estructurado en cuatro secciones. En la primera sección se realiza una introducción sobre la lengua de señas y su estructura querológica. En la segunda sección se presenta la metodología utilizada para desarrollar el sistema de reconocimiento del abecedario dactilológico, el cual consiste en las siguientes etapas: adquisición de las imágenes, preprocesado de los datos, almacenamiento de la información, entrenamiento del clasificador y análisis e interpretación de los resultados. En la tercera sección se muestran los resultados obtenidos y, finalmente, en la cuarta sección se describe la discusión y las conclusiones derivadas de esta investigación.

1.1 Lengua de Señas Mexicana

El desafío de las personas con discapacidad auditiva para comunicarse con su entorno limita su desarrollo educativo, profesional y social; como resultado, se ven condicionadas sus oportunidades de inclusión. Ante esta necesidad, las personas sordas han desarrollado su propia forma de comunicación: la Lengua de Señas Mexicana (LSM). A pesar de que ésta les permite comunicarse entre sí, no siempre facilita la relación con el resto de la comunidad, sobre todo, con los oyentes que desconocen esta lengua.

La LSM representa una de las formas de expresión de la comunidad sorda en México y una herramienta fundamental para la inclusión en los procesos de participación social. La LSM se compone de signos visuales con una estructura lingüística propia con la cual se identifican y expresan las personas sordas en México.

1.2 Aprendizaje automático

El aprendizaje automático (*Machine Learning*) se sitúa dentro de la Inteligencia Artificial (IA) (ver Figura 1) y su objetivo es desarrollar sistemas que “aprenden” por sí mismos, esto en función de los datos de entrada, los cuales pueden provenir de imágenes o videos. Se clasifica en dos tipos de aprendizaje: supervisado y no supervisado.

Generalmente, el aprendizaje automático supervisado se usa para clasificar o hacer predicciones de datos, mientras que el aprendizaje no supervisado se utiliza para encontrar estructuras y patrones dentro de los conjuntos de datos que se están analizando.

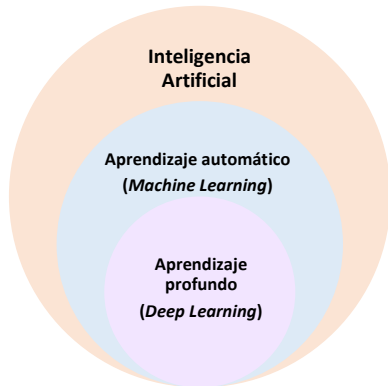


Figura 1. Aprendizaje automático (*machine learning*). Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se muestra como es el funcionamiento de las técnicas de clasificación que se basan en el aprendizaje automático, el cual consiste en: recibir información proveniente del mundo (entrada), extraer características mediante un descriptor, realizar la clasificación y, finalmente, obtener una salida como respuesta a la técnica de clasificación utilizada.

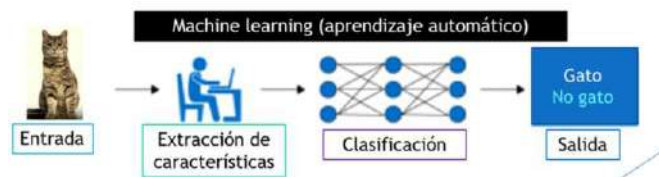


Figura 2. Etapas del aprendizaje automático (*machine learning*). Fuente: elaboración propia.

1.3 Redes Neuronales Artificiales

Las Redes Neuronales Artificiales (ANN, por sus siglas en inglés *Artificial Neural Networks*) se tratan de un modelo computacional inspirado en las redes neuronales biológicas, el cual forma parte de las técnicas del aprendizaje automático y se utiliza en diversas tareas como el reconocimiento de

patrones, la detección y clasificación de objetos y la predicción de datos, por mencionar algunas.

En la Figura 3 se muestra la configuración básica de una red neuronal, la cual consta de una capa de entrada (*input layer*), una capa oculta (*hidden layer*) para el procesamiento de la información y una capa de salida (*output layer*).

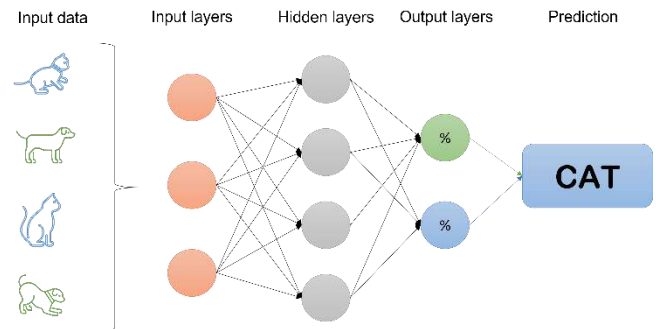


Figura 3. Estructura básica de una red neuronal. Fuente: elaboración propia.

Dentro de las redes neuronales existen diversos modelos, como lo son las redes neuronales profundas (DNN, por sus siglas en inglés *Deep Neural Networks*), las redes neuronales convolucionales (CNN, por sus siglas en inglés *Convolutional Neural Networks*), las redes neuronales recurrentes (RNN, *Recurrente Neural Networks*), entre otras.

1.3.1 Red neuronal recurrente

Una RNN permite realizar la clasificación de datos que varían en el tiempo, es decir, es un modelo que tiene la misma premisa que una red neuronal artificial, pero añade recurrencia de la capa de salida de la neurona pasada a la capa de entrada de la siguiente neurona, de esta manera la salida de la neurona pasada influye en el compartimiento de la siguiente red (Grossberg, 2013).

2. Metodología

En la presente investigación se desarrolló el reconocimiento del abecedario dactilológico de la Lengua de Señas Mexicana (LSM) siguiendo la metodología que se muestra en la Figura 4.

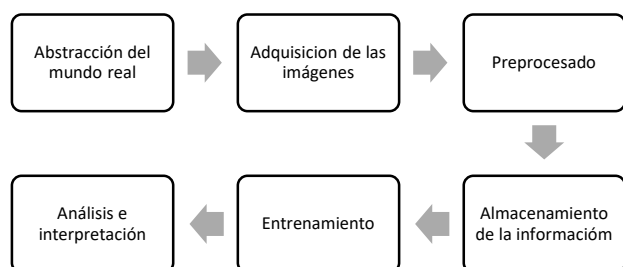


Figura 4. Metodología desarrollada para el sistema de reconocimiento automático. Fuente: elaboración propia
A continuación, se describen cada una de las etapas de la metodología.

Etapa 1. Abstracción del mundo real

Esta etapa es fundamental para poder modelar un sistema de visión por computadora. De manera conceptual, un sistema de visión por computadora o visión artificial se basa en un conjunto de herramientas tecnológicas que permiten captar y registrar imágenes del mundo real, esto con el propósito de poder procesarlas de manera digital a través de una computadora y así obtener información que puede ser relevante para una aplicación en particular. Por tal motivo, es necesario hacer un análisis acerca del tipo de tecnología que se utilizará para realizar la adquisición de estas imágenes, pues debe cumplir con las características pertinentes para la aplicación que se requiere desarrollar.

Etapa 2. Adquisición de las imágenes

Para esta etapa se creó un corpus con el abecedario dactilológico mediante el uso de una cámara de profundidad OAK-D. Este dispositivo consta de tres cámaras: una cámara central para capturar la información RGB y dos cámaras laterales para medir distancias utilizando la disparidad entre las imágenes. Asimismo, para la adquisición de los datos e imágenes se utilizó la librería DepthAI (Documentación de DepthAi, 2021).

Las señas pertenecientes a la LSM que se adquirieron se enlistan en la Tabla 1 junto a una breve descripción querológica.

Tabla 1. Descripción del cuerpo de los datos.

Tipo de seña	Seña	Estática/Dinámica
Abecedario dactilológico	A	Estática
	B	Estática
	C	Estática
	D	Estática
	E	Estática
	F	Estática
	G	Estática
	H	Estática
	I	Estática
	J	Dinámica
	K	Dinámica
	L	Estática
	M	Estática
	N	Estática
	Ñ	Dinámica
	O	Estática
	P	Estática
	Q	Dinámica
	R	Estática
	S	Estática
	T	Estática
	U	Estática
	V	Estática
	W	Estática
	X	Dinámica
	Y	Estática
Z	Dinámica	

Como se puede observar, se adquirieron un total de 27 señas distintas pertenecientes al abecedario dactilológico. De estas señas, seis son estáticas y 21 son dinámicas.

Etapa 3. Preprocesado

En esta etapa se detectaron de forma automática los puntos característicos (*keypoints*) de la cara, cuerpo y manos que se usan al realizar cada una de las señas. Para la detección automática de estos puntos se utilizó la librería MediaPipe (Zhang et al., 2020) (Singh et al., 2021). Cabe mencionar que los puntos de interés seleccionados quedaron distribuidos de la siguiente manera: 20 para la cara, cinco para el cuerpo y 21 para cada mano.

Etapa 4. Almacenamiento de la información

Los datos capturados se almacenaron en tablas de valores separados por comas (csv), las cuales están estructuradas en 20 filas y 201 columnas, en donde

cada archivo representa una única repetición de una seña individual y cada fila representa la información obtenida en un solo fotograma.

Las filas, por otra parte, están estructuradas con la información obtenida del cuerpo (cinco puntos), rostro (20 puntos), mano izquierda (21 puntos) y la mano derecha (21 puntos). Cabe mencionar que cada punto se representa por sus coordenadas (X, Y, Z). Esta información de distancia tiene como unidad de medida el metro y están calculadas respecto al punto central de la imagen capturada. Además, los datos toman valores negativos en los ejes -X, -Y, -Z, lo cual resulta muy útil cuando se quiere conocer la dirección del movimiento realizado.

Etapa 5. Entrenamiento

Debido a que el abecedario dactilológico consta de señas estáticas y dinámicas, se optó por utilizar un modelo neuronal recurrente (descrito en la sección 1.3.1), el cual permite clasificar información que varía con el tiempo. Asimismo, es importante denotar que mediante el sistema de adquisición se captura información tridimensional de cada una de las señas, lo cual representa una ventaja con respecto a los trabajos que se encuentran en el estado del arte, esto debido a que los datos adquiridos son invariantes a escala y cambios lumínicos.

Después de capturar el corpus del abecedario dactilológico, se dividió el conjunto de datos en tres partes: 70 % para datos de entrenamiento, 15 % para validación y 15 % para pruebas. Se realizaron entrenamientos empleando la red neuronal recurrente (la cual se muestra en la Figura 5) y haciendo variaciones en la capa de entrada y la capa oculta (ver Tabla 2) para encontrar el mejor modelo neuronal para las señas adquiridas. Se siguió la siguiente configuración para los cuatro modelos entrenados: 32 y 64; 64 y 128; 128 y 256; 256 y 512.

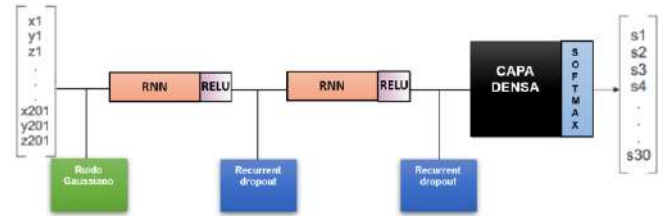


Figura 5. Arquitectura de la red neuronal. Fuente: elaboración propia

Como configuración general del modelo neuronal, se utilizó un diseño de 500 épocas y detención temprana con el fin de evitar un sobreajuste en el entrenamiento de los datos, esto con una paciencia de 50 épocas; también, se empleó la función de pérdida de entropía cruzada categórica para medir la pérdida entre las distribuciones probabilidad y, finalmente, se utilizó el optimizador de Adam para reducir el error en la red mediante las librerías de Keras (Chollet et al; 2018) y Tensorflow (Abadi et al; 2018).

Etapa 6. Análisis e interpretación

En esta etapa se realizó un análisis de los resultados con el propósito de inferir el comportamiento de los parámetros del modelo neuronal en relación con las métricas calculadas para su validación.

Como fue descrito con anterioridad, los modelos resultantes de la etapa de entrenamiento fueron probados con el conjunto de datos de prueba (15 % de los datos). Para la validación del modelo se calculó un promedio de la exactitud obtenida de cada en red entrenada.

La exactitud (*Accuracy*) mide la frecuencia con la que las predicciones coinciden con las etiquetas, es decir, el porcentaje de valores predichos que se corresponden con los valores reales. La exactitud se calcula mediante la ecuación (1).

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

Tabla 2: Variaciones en la arquitectura del modelo neuronal utilizado para la clasificación de las señas.

Modelo			
Neuronal	Capa 1	Capa 2	Exactitud
RNN	32	64	0.7925
	64	128	0.7950
	128	256	0.7432
	256	512	0.5432

Por otra parte, se calcularon los valores de las métricas: precisión (*precision*) y recuerdo (*recall*), para poder realizar una comparativa entre los distintos experimentos.

La precisión indica la proporción de identificaciones positivas que fueron realmente correctas. La precisión se calcula con la ecuación (2).

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

El recuerdo (*recall*) representa la proporción de positivos reales identificados correctamente. El recuerdo se calcula por medio de la ecuación (3).

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

3. Resultados

La experimentación se realizó utilizando 27 clases correspondientes al abecedario dactilológico de la LSM, los cuales fueron adquiridos mediante la cámara de profundidad OAK-D. De estos datos, se utilizó el 70 % para el entrenamiento, 15 % para datos de validación y el 15 % para pruebas.

Mediante una red neuronal recurrente, se realizó el entrenamiento variando la capa de entrada y la capa oculta con diferentes cantidades de neuronas. Después de seleccionar los mejores modelos, el experimento se repitió. En esta ocasión se añadió ruido gaussiano de forma aleatoria a los datos entrenados para ayudar a mejorar la robustez de la red neuronal con datos atípicos.

En la Figura 6 se muestra la comparación entre las métricas de precisión y recuerdo de los cuatro modelos entrenados sin ruido. Se puede observar que el mejor modelo corresponde a una

red con una capa de entrada de 32 neuronas y una capa oculta formada por 64 neuronas.

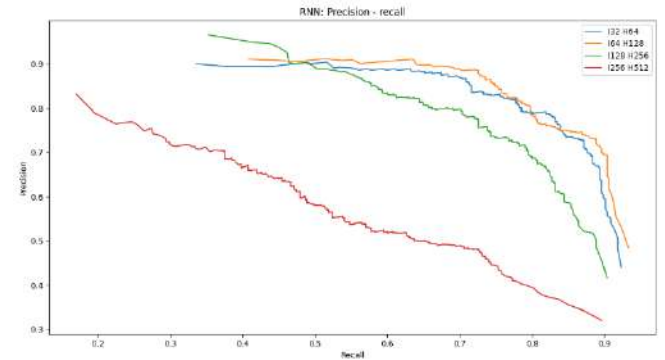


Figura 6. Comparación entre los valores de precisión y recuerdo. Fuente: elaboración propia

En la Tabla 3 se muestra la exactitud de los mejores modelos neuronales entrenados con ruido. Como se puede observar, la exactitud incrementó en el primer caso respecto a los modelos entrenados sin ruido.

Tabla 3: Variaciones en la arquitectura del modelo neuronal con ruido gaussiano, utilizado para la clasificación de las señas.

Modelo	Ruido	Capa 1	Capa 2	Exactitud
Neuronal	Gaussiano	32	64	0.8074
	0.1	64	128	0.7925

Finalmente, se muestra en la Figura 7 la matriz de confusión por clase. En este instrumento se observan en tonalidades más oscuras las señas en las que se obtuvo una mayor exactitud.



Figura 7. Matriz de confusión para el modelo entrenado sin ruido, con 32 capas de entrada y 64 capas ocultas. Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Figura 5, las señas más descriptivas son D, I, Ñ, Q y X. Por otra parte, las señas que tienen más problemas para ser reconocidas son las de C y T, las cuales son altamente confundibles con W y S, respectivamente.

4. Discusión y conclusiones

En este trabajo de investigación se implementó un sistema para el reconocimiento de la lengua de señas utilizando una cámara RGB-D. Se recolectó un conjunto de datos de 27 señas pertenecientes al abecedario dactilológico de la Lengua de Señas Mexicana. Para realizar el entrenamiento, validación y prueba del modelo neuronal, para cada seña se extrajeron puntos característicos de las manos, el cuerpo y los rasgos faciales y se realizó la transformación de estos puntos en coordenadas 3D para entrenar el clasificador basado en redes neuronales recurrentes (RNN). Con el clasificador entrenado con datos ruidosos se obtuvo un 80.74 % de exactitud para el mejor de los casos. Estos resultados son congruentes con el análisis querológico de las señas procesadas, debido a que es altamente conocido que las señas pertenecientes al abecedario dactilológico comparten una gran cantidad de rasgos similares.

Con respecto a otros trabajos desarrollados en la literatura que hacen uso de cámaras RGB-D y redes neuronales, se encuentra la propuesta de Galicia et al. (2015) en la cual se propone un sistema para reconocer cinco vocales (A, E, I, O, U) y dos consonantes (B, L) de la LSM mediante el uso de un sensor Kinect y una red neuronal; el resultado fue una exactitud del 76.19 %. Los autores Martínez-Gutiérrez et al. (2019) desarrollaron un software que permite capturar 22 puntos de la mano en coordenadas 3D por medio de la cámara Intel-RealSense f200 y el uso de una red neuronal perceptrón multicapa, del cual obtuvieron una tasa de reconocimiento del 80.11 %.

Cabe mencionar que una de las principales ventajas que ofrecen los sistemas de reconocimiento basados en cámaras de profundidad (RGB-D) es la adquisición de las señas sin colocar

dispositivos externos en el usuario, lo cual permite una comunicación más natural.

Referencias

- Abadi, M., Agarwal, A., Barham, P., Brevdo, E., Chen, Z., Citro, C., Corrado, G. S., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Goodfellow, I., Harp, A., Irving, G., Isard, M., Jia, Y., Jozefowicz, R., Kaiser, L., Kudlur, M., ... Zheng, X. (2015). TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Distributed Systems. Tensorflow.org. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.04467>
- Burquest, D. A. (2009). Análisis fonológico: un enfoque funcional. *SIL International*, 9254(17). Recuperado el 17 de marzo del 2023, de: <https://www.sil.org/resources/archives/9254>.
- Chollet, F. (2021). Keras: The python deep learning library. Version (2.7.0). Keras. Recuperado el 17 de marzo del 2023, de: <https://keras.io/>.
- Luxonis. (2020). DepthAI's Documentation. versión (2.6.0.0), Recuperado el 17 de marzo del 2023 de: <https://docs.luxonis.com/en/latest/>
- Mercader Flores, C. A., Escobar Dellamary, L., Ramírez Barba, M. del R. G., Pool Westgaard, M., & Cruz Aldrete, M. (2017). C. E. Escobedo Delgado (Ed.), *Diccionario de Lengua de Señas Mexicana Ciudad de México* (pp. 1–505). INDEPENDI. Recuperado el 17 de marzo del 2023 de: https://pdh.cdmx.gob.mx/storage/app/media/banner/Dic_LSM%202.pdf
- Galicia, R., Carranza, O., Jimenez, E. D., & Rivera, G. E. (2015). Mexican sign language recognition using movement sensor. *2015 IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/isie.2015.7281531>
- Grossberg, S. (n.d.). Recurrent neural networks. Scholarpedia. Recuperado de: http://www.scholarpedia.org/article/Recurrent_neural_networks
- Martínez-Gutiérrez, M. E., Rojano-Cáceres, J. R., Benítez-Guerrero, E., & Sánchez-Barrera, H. E. (2019). Data Acquisition Software for sign language recognition. *Research in Computing Science*, 148(3), pp. 205–211. <https://doi.org/10.13053/rcs-148-3-17>
- González Rodríguez, M. A. (1992). *Lenguaje de Signos*. Confederación Nacional de Sordos de España.
- Singh, A. K., Kumbhare, V. A., & Arthi, K. (2022). Real-time human pose detection and recognition using MediaPipe. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 145–154. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7088-6_12
- Tovar, L. A. (2011). La Importancia Del Estudio De Las Lenguas De Señas. Zhang, F., Bazarevsky, V., Vakunov, A., Tkachenka, A., Sung, G., Chang, C.-L., & Grundmann, M. (2020). *MediaPipe Hands: On-Device Real-Time Hand Tracking*.

Biosíntesis y extracción de Polihidroxicanoatos por *Pseudomonas putida* usando residuos orgánicos como sustrato

Cyntia Rocío Flores-Juárez¹, Ana Raquel S. Estilla-Escamilla¹, Juan Pablo Leyva-Hurtado¹, Fabiola Ramos-Alemán¹, Daniel Hernández-Arriaga², Julio Cesar González-Olvera³

¹División industrial área de Nanotecnología, Universidad Tecnológica de Querétaro, Querétaro, Qro. C.P. 76148, México

²Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Tecnológico Nacional de México, Campus Querétaro, C.P. 76000, Querétaro, Qro., México

³Universidad Politécnica de Santa Rosa Jáuregui, Parque Industrial Querétaro, C.P. 76220, Santa Rosa Jáuregui, Qro., México

Correspondencia: cynthia.flores@uteq.edu.mx

Resumen

Bacterias como *P. aeruginosa*, *P. fluorescens* y *P. putida*, tienen la capacidad de producir biopolímeros como los polihidroxicanoatos (PHA), principalmente PHAs de cadena corta como el polihidroxiacetato (PHA) y co-polímeros PHB-PHV (polihidroxiacetato-polihidroxiacetato). En esta investigación se evaluó la producción de PHAs a partir de una cepa de *P. putida* usando residuos de glicerol y lactosuero como fuentes de carbono, también se realizó un comparativo entre dos métodos de extracción de PHAs con solventes orgánicos, se evaluaron los métodos que utilizan dispersiones hipoclorito de sodio-cloroformo y 1,2-propilencarbonato. Del comparativo entre fuentes de carbono, los resultados mostraron que el glicerol al 1% (v/v) es una mejor fuente de carbono con un rendimiento de 1.337 g/L en comparación a los lactosueros que mostraron un rendimiento de 0.830 g/L, así mismo, en el comparativo entre métodos de extracción, el método con dispersiones hipoclorito de sodio-cloroformo resultó con rendimientos más altos en cuanto a producción de PHAs cuantificados de forma gravimétrica.

Palabras clave: Polihidroxicanoatos, *Pseudomonas putida*, biopolímeros.

Abstract

Bacteria such as *P. aeruginosa*, *P. fluorescens* and *P. putida*, have the ability to produce biopolymers such as polyhydroxyalkanoates (PHAs), mainly short-chain PHAs such as polyhydroxybutyrate (PHB) and co-polymers such as PHB-PHV (polyhydroxybutyrate-polyhydroxyvalerate). In this investigation, the production of PHAs from a strain of *P. putida* was evaluated using glycerol and whey as carbon sources. A comparison was also made between two different extraction methods with organic solvent, using dispersions with sodium hypochlorite and chloroform and 1,2-propylenecarbonate. From the comparison between carbon sources, the results showed that glycerol at 1% (v/v) is a better carbon source with a yield of 1.337 g/L compared to whey that showed a yield of 0.830 g/L, likewise, in the comparison between extraction methods, the method with sodium hypochlorite-chloroform dispersions resulted in higher yields in terms of gravimetrically quantified PHAs production.

Keywords: Polyhydroxyalkanoates, *Pseudomonas putida*, biopolymers.

Artículo arbitrado

Recibido:

15 de febrero de 2023

Aceptado:

23 de febrero de 2023

Introducción

Los PHAs son polímeros de ácidos hidroxialcanoicos almacenados en forma de gránulos intracelulares que se acumulan en diferentes especies bacterianas bajo estrés nutricional generado por exceso en una fuente de carbono y déficit de otros nutrientes como nitrógeno, fósforo y magnesio (Shah & Kumar, 2021). Los PHA son considerados como candidatos para el reemplazo de los polímeros tradicionales de origen petroquímico (Trakunjae et al., 2022). El interés sobre los PHA ha aumentado enormemente durante la última década debido a que, además de ser biodegradables y biocompatibles, se pueden obtener a partir de recursos renovables como son los residuos de la industria láctea o de glicerol, residuo de la producción de biodiesel buscando revalorizar este tipo de residuos de manera que sean aprovechados y no ocasionen un mayor impacto al ambiente (Bedade et al., 2021; Kanavaki et al., 2021). En la actualidad se conocen decenas de géneros diferentes de bacterias productoras de PHA, tanto Gram negativas como Gram positivas, que los acumulan en el citoplasma bajo ciertas y determinadas condiciones de cultivo. Gran parte del éxito de estos biopolímeros estará dado por el tipo de sustrato utilizado, así como el método de extracción, ya que tradicionalmente se utilizan solventes orgánicos como el cloroformo que limitan el proceso de escalamiento. Se han evaluado diferentes alternativas más verdes en el proceso de extracción como el 1,2-propilencarbonato, sin embargo, hasta el momento el cloroformo sigue siendo la alternativa con más alto rendimiento (Etxabide et al., 2022; Wongmoon & Napathorn, 2022).

Método

Microrganismo y medio de cultivo

Para evaluar la bioconversión del glicerol y el lactosuero en PHAs se utilizó una cepa de la bacteria gram negativa *Pseudomonas putida*, aislada y caracterizada previamente. Se preparó un medio de cultivo mínimo mineral con la siguiente composición: 3 g/L de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 3.5 g/L de K_2HPO_4 , 1.5 g/L de KH_2PO_4 , 0.2 g/L de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y 1 mL de

solución de metales traza que contiene 0.3 g/L de $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 0.5g/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.2 g/L de EDTA y 1 g/L de $\text{CaCl}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Como fuente de carbono se usó glicerol al 1 y 2%, lactosuero al 1 y 2% (v/v) y glucosa al 1% (m/v) como control positivo. El medio de cultivo se autoclavó a 121 °C por 15 minutos para asegurar esterilidad. La producción del biopolímero se realizó en matraces Erlenmeyer de 250 mL con un volumen útil de 50 mL añadiendo 10% de inóculo al caldo de cultivo. Se incubó a 30 °C durante 72 h en agitación constante a 150 rpm. Transcurrido el tiempo de incubación, se centrifugó a 4000 rpm durante 30 minutos para recuperar la biomasa. Se descartó el sobrenadante y la biomasa se secó a 40 °C durante 24 h para determinar el peso seco. Se procedió a realizar la extracción del biopolímero con los métodos propuestos, tomando al método hipoclorito de sodio-cloroformo como método de referencia y que se describe en el siguiente apartado. Los experimentos para el comparativo entre los dos métodos de extracción se realizaron solamente con las fermentaciones de glucosa al 1% (m/v).

Métodos de extracción de PHAs

Para el comparativo entre los métodos de extracción se realizó una fermentación con el método descrito en el apartado anterior y usando glucosa al 1% como sustrato, todas las mediciones se hicieron por duplicado. La biomasa seca se pretrató con el hipoclorito de sodio (NaClO) al 5% y cloroformo (CHCl_3) en una proporción (1:1) considerando 1 mL por cada 0.02 g de biomasa seca. La mezcla se agitó por 1 h a temperatura ambiente y posterior a ello se centrifugó a 10000 rpm por 10 minutos, se descartó la fase acuosa conteniendo el hipoclorito de sodio. Se adicionó 1 volumen de metanol y se dejó reposar a 4 °C durante 24 h para precipitar los PHA. Por último, se dejó evaporar hasta peso constante (Pradhan et al., 2018). Se evaluó un método alternativo que consistió en el uso de 1,2-propilencarbonato como solvente orgánico. Se adicionó 1,2-propilencarbonato en una proporción de 25 mL por 1 g de biomasa seca. Se incubó a 100 °C durante 30 minutos. Se dejó reposar 24 h, se añadió 1 volumen de acetona para precipitar el PHA, se centrifugó la mezcla y se descartó el

sobrenadante, dejando evaporar a hasta secar completamente. El cálculo de rendimiento de los PHAs se realizó mediante gravimetría (Rao et al., 2019; Trakunjae et al., 2022).

Caracterización de PHAs

Las muestras de PHA se caracterizaron mediante espectrofotometría UV, la metodología consiste en realizar una reacción de oxidación entre el PHA recuperado y H₂SO₄ concentrado. Las muestras se incubaron a 100 °C durante 1 h, promoviendo la ruptura de los polímeros a monómeros y la posterior oxidación de estos hasta ácido crotonico, el cual se cuantificó mediante espectrofotometría a 235 nm.

Análisis estadístico

Todas las mediciones se realizaron por duplicado y se realizó una prueba de ANOVA de un factor para determinar diferencias estadísticamente significativas y prueba de Tukey para comparación de medias entre pruebas.

Resultados y discusión

Se realizaron fermentaciones con *Pseudomonas putida* para evaluar su capacidad para producir PHA con diferentes sustratos, así mismo, se evaluaron dos metodologías para recuperar el polihidroxialcanoato de la biomasa celular. Tradicionalmente se ha utilizado al cloroformo como solvente principal, debido a su alta solubilidad con compuestos lipídicos, sin embargo, tiene la desventaja de ser un compuesto con alta toxicidad a la salud y al medio ambiente. Como alternativa se evaluó un solvente menos contaminante en este caso, el 1,2-propilencarbonato.

En la figura 1 se muestra el biopolímero resultante del proceso de extracción con el método de dispersiones de hipoclorito de sodio y cloroformo.

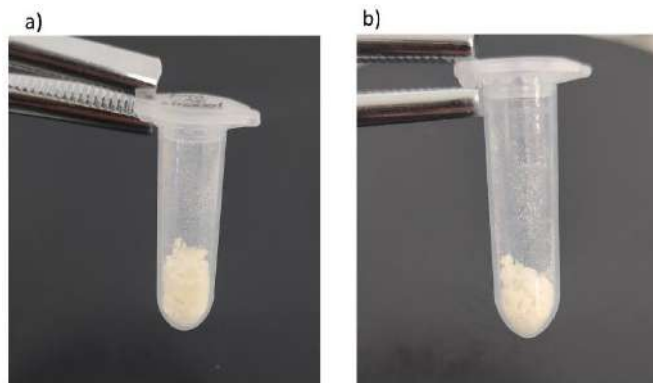


Figura 1. PHA obtenido del proceso de extracción después del proceso de secado. a) PHA obtenido a partir de glicerol 1%, b) PHA obtenido a partir de glucosa 1%. Fuente: elaboración propia.

La Tabla 1 muestra los resultados del comparativo entre los métodos de extracción usando glucosa 1% como fuente de carbono. La metodología que involucra el uso de hipoclorito de sodio como pretratamiento y solubilización con cloroformo mostró rendimientos más altos, con 1.83 g/L de PHA. Este método fue usado como referencia ya que históricamente ha sido el método más utilizado, aunque tiene como desventaja el uso de un solvente altamente tóxico.

El método de extracción con 1,2-propilencarbonato mostró una recuperación de PHA de 0.843 g/L lo cual lo hace un método menos competente en comparación con el cloroformo, dichos resultados se confirman con el análisis estadístico realizado (ANOVA) donde se confirma una diferencia significativa ($P < 0.05$) entre ambos métodos de extracción evaluados. Todas las mediciones se realizaron por duplicado y de forma gravimétrica después del proceso de evaporación del solvente.

Método evaluado	PHA recuperado (g/L)
Hipoclorito/cloroformo	1.83 ± 0.11
1,2-propilencarbonato	0.843 ± 0.038

Tabla 1. Comparativo entre métodos de extracción de PHA usando glucosa 1% (m/v) como sustrato. Fuente: elaboración propia.

En la figura 2 se muestran los resultados del comparativo entre el glicerol y los residuos de lactosuero en cuanto a su potencial para producir PHAs. Se tiene al glicerol como mejor alternativa produciendo 1.337 g/L y 1.275 g/L para glicerol al 1 y 2%.

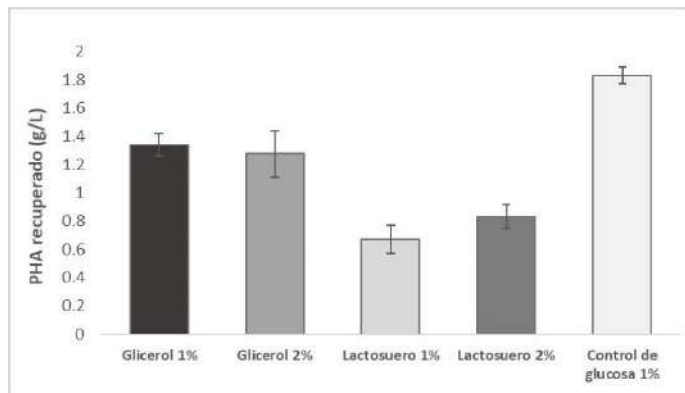


Figura 2. Rendimientos de PHAs obtenidos con glicerol y lactosuero. Fuente: elaboración propia.

El mejor resultado del glicerol al 1% podría ser explicado por la relación C/N que existe, ya que se ha reportado que relaciones C/N muy grandes reducen la producción de los PHAs (Márquez Romero, 2020) mientras que el lactosuero mostró rendimientos más bajos debido a que por su composición, está conformado principalmente por grasas y moléculas más difíciles de metabolizar.

Como es de esperar, el control de glucosa al 1% muestra un rendimiento más alto (1.83 g/L) que los residuos de glicerol y lactosuero, debido a que en la ruta metabólica la glucosa es convertida directamente

a piruvato y posteriormente a acetil-CoA, sin embargo, en este caso lo que se pretende es utilizar fuentes de carbono que provengan de residuos orgánicos con la finalidad de revalorizarlos.

Se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) y se determinó que existen diferencias significativas entre las diferentes fuentes de carbono evaluadas ($P < 0.05$). Además, se aplicó la prueba de Tukey para hacer comparaciones múltiples entre medias entre los diferentes sustratos y se encontró que no existen diferencias significativas entre glicerol 1% y 2%, así mismo no hay diferencias significativas entre lactosuero 1 y 2%, en los demás casos si hay diferencias significativas.

De acuerdo con los productos de metabolismo reportados en la literatura, se espera que el PHA obtenido sea polihidroxibutirato (PHB), para caracterizarlo, se identificó mediante espectrofotometría UV.

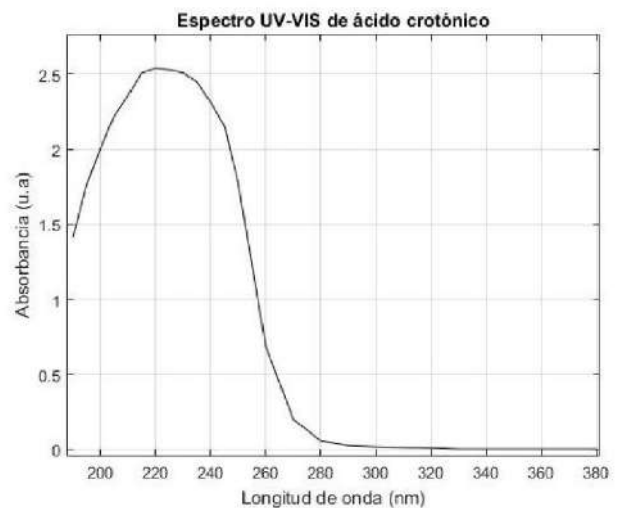


Figura 3. Espectro de absorción UV-Vis para el ácido crotonico. Fuente: elaboración propia.

En la figura 3 se observa la presencia de un máximo de absorción consistente con el ácido crotonico. Como se mencionó en la metodología, el polihidroxibutirato se oxida hasta ácido crotonico, el cual presenta un pico de absorción alrededor de 235 nm (Rao et al., 2019).

Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivos: 1) evaluar dos diferentes métodos de extracción de PHAs a partir de bacterias de *P. putida* y 2) un comparativo entre diferentes fuentes de carbono (glicerol y lactosueros) con la finalidad de a futuro, revalorizar estos residuos orgánicos. Del primer objetivo se concluye que el método tradicionalmente usado con cloroformo sigue siendo el que genera mayores rendimientos de biopolímero, con la desventaja de la alta toxicidad de dicho solvente. Diversos autores han reportado el uso de compuestos orgánicos alternativos al cloroformo como es el uso de ácido acético como solvente, aunque con rendimientos menores. Se han reportado el uso de metodologías alternativas al cloroformo como es el uso de etilencarbonato y propilencarbonato, donde en conjunto con protocolos de incubación largos y tratamientos térmicos y de pH ha obtenido rendimientos cercanos a los obtenidos con el cloroformo. Otras metodologías alternativas utilizan cloruro de metileno así como metodologías enzimáticas con tripsina, bromelina, alcalasas en combinación con detergentes como el SDS (dodecilsulfato sódico) o uso de nuevas tecnologías como la extracción ultrasónica (Farfán, 2019; Pradhan et al., 2018).

Del segundo objetivo se concluye que el glicerol resulta una mejor fuente de carbono en comparación a los lactosueros, sin embargo, se podría evaluar a futuro el uso de diferentes proporciones entre ambos residuos con la finalidad de aprovechamiento.

Actualmente se están evaluando diferentes fuentes de carbono como glicerol crudo, glicerol residual del proceso de producción de biodiesel y residuos de lactosueros de la región con la finalidad de revalorizar estos residuos. Aun es necesario optimizar parámetros para obtener mayores rendimientos, así mismo se evaluarán otros métodos de digestión alternativos al hipoclorito de sodio como son el SDS y Tritón X-100. En el estado de Querétaro la producción de leche y queso, así como la industria vinícola entre otras, han mostrado un gran auge, sin embargo, los desechos generados requieren de un aprovechamiento por lo

que la producción de biopolímeros a partir de ellos puede ser una alternativa interesante.

Se agradece a CONACYT por el apoyo para la realización de este trabajo mediante el financiamiento del proyecto A1-S-43130 de la convocatoria de Ciencia básica.

Referencias

- Bedade, D. K., Edson, C. B., & Gross, R. A. (2021). Emergent Approaches to Efficient and Sustainable Polyhydroxyalkanoate Production. *Molecules*, 26(11), 3463. <https://doi.org/10.3390/molecules26113463>
- Etxabide, A., Kilmartin, P. A., Guerrero, P., de la Caba, K., Hooks, D., West, M., & Singh, T. (2022). Polyhydroxybutyrate (PHB) produced from red grape pomace: Effect of purification processes on structural, thermal and antioxidant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*, 217(July), 449–456. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.07.072>
- Farfán, F. R. (2019). Extracción, purificación y modificación de un biopolímero del tipo poli (3- hidroxibutirato) obtenido de la fermentación de ácidos grasos con *B. cepacia*. Andrés. *Tesis de Grado*.
- Kanavaki, I., Drakonaki, A., Geladas, E. D., Spyros, A., Xie, H., & Tsiotis, G. (2021). Polyhydroxyalkanoate (Pha) production in pseudomonas sp. phdv1 strain grown on phenol as carbon sources. *Microorganisms*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081636>
- Márquez Romero, A. (2020). *Influencia de las condiciones de operación (pH, temperatura, relación C/N/P) en la producción de polihidroxialcanoatos (PHAs) a partir de efluentes acidogénicos de biomasa lignocelulósica*. [Universidad de Cádiz, España]. <https://rodin.uca.es/xmlui/handle/10498/23761#.X8OcaIxcCNM.mendeley>
- Pradhan, S., Dikshit, P. K., & Moholkar, V. S. (2018). Production, ultrasonic extraction, and characterization of poly (3-hydroxybutyrate) (PHB) using *Bacillus megaterium* and *Cupriavidus necator*. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(8), 2392–2400. <https://doi.org/10.1002/pat.4351>
- Rao, A., Haque, S., El-Enshasy, H. A., Singh, V., & Mishra, B. N. (2019). RSM–GA based optimization of bacterial PHA production and In Silico modulation of citrate synthase for enhancing PHA production. *Biomolecules*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/biom9120872>
- Shah, S., & Kumar, A. (2021). Production and characterization of polyhydroxyalkanoates from industrial waste using soil bacterial isolates. *Brazilian Journal of Microbiology*, 52(2), 715–726. <https://doi.org/10.1007/s42770-021-00452-z>

Trakunjae, C., Sudesh, K., Neoh, S., Boondaeng, A., Apiwatanapiwat, W., Phornphimon, J., & Vaithanomsat. (2022). Biosynthesis of P (3HB- co -3HHx) Copolymers by a Newly Engineered Strain of *Cupriavidus necator*. *Polymers*, 14(4074).

Wongmoon, C., & Napathorn, S. C. (2022). Optimization for the efficient recovery of poly(3-hydroxybutyrate) using the green solvent 1,3-dioxolane. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10(December), 1–16.
<https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1086636>

Uso de tomografía computarizada para la inspección de uniones adhesivas unidas usando adhesivo metilmetacrilato.

Celso Eduardo Cruz González^a Juan Manuel Salgado López^a

Luis del Llano Vizcaya^b Marco Paredes^a

- a. Dirección de Ingeniería de Manufactura. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

Correo electrónico: ecruz@cidesi.edu.mx, msalgado@cidesi.edu.mx,

- b. Gerencia de Sistemas Mecánicos. Dirección de Ingeniería Mecánica. Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial. Av. Playa, Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro.

Correo electrónico: lvizcaya@cidesi.edu.mx

Resumen

Con el fin de determinar la calidad y confiabilidad de materiales compuestos y uniones adhesivas, la industria aeronáutica ha impulsado las técnicas de inspección no destructivas para detectar defectos. Por lo general, las técnicas no destructivas volumétricas son utilizadas en la industria para lograr este propósito. En ese sentido, el objetivo de trabajo es mostrar la efectividad para detectar imperfecciones en uniones adhesivas por medio de tomografía computarizada de una unión adhesiva aluminio-acero para detectar imperfecciones en este tipo de uniones y permitir al analista o ingeniero determinar causas que generaron la falla en componentes unidos con adhesivo.

Palabras clave: Acero, Adhesivo, aluminio, tomografía computarizada.

Abstract

In order to determine the quality and reliability of composite materials and adhesive joints, the aeronautical industry has promoted non-destructive inspection techniques to detect defects. In general, volumetric non-destructive techniques are used in the industry to achieve this purpose. In this sense, the aim of the work is to show the effectiveness to detect imperfections of adhesive joints by means of computed tomography of an aluminum-steel adhesive joint to detect imperfections in this type of joints and allow the analyst or engineer to determine causes that generated the failure of components joined with adhesive.

Keywords: Adhesive, aluminum-steel, computer tomography.

Artículo arbitrado

Recibido:	Aceptado:
15 de febrero de 2023	21 de febrero de 2023

Introducción.

Con base en la definición del instituto TWI, las pruebas no destructivas (END) son técnicas de prueba y análisis utilizadas por la industria para evaluar la sanidad de un material, componente, estructura o sistema en busca de diferencias características o defectos de soldadura y discontinuidades sin causar daños a la pieza original (TWI, 2022).

Por otro lado, la mayoría de autores reconocidos en el desarrollo de uniones adhesivas coinciden en que las pruebas no destructivas deben ser empleadas en la inspección de la sanidad de las uniones adhesivas. Esta necesidad de conocer la sanidad y con ello la integridad de uniones adhesivas es evidente revisando la literatura en este campo. En ese sentido, en la literatura han sido documentados los métodos más utilizados en la industria aeronáutica y las tendencias de ese tiempo (Ehrhart et.al., 2013, p.235). En este mismo sentido se ha reportado que en una unión adhesiva el módulo se puede determinar mediante la técnica de espectroscopia ultrasónica. Lo anterior con una precisión de $\pm 6\%$, mientras el espesor del adhesivo en la junta se puede conocer con la misma precisión que con otras técnicas como por ejemplo: estereoscopia (Cawley & Hodson, 1989, p.1382).

La evaluación de la calidad de las juntas adhesivas en tuberías de plástico de fibra de vidrio mediante NDT térmico activo ha sido reportada en literatura por la industria petrolera, la cual las ha venido empleando en plataformas y tuberías para agua o aceite a temperaturas moderadas. Así, la detección de defectos (fallo adhesivo o desprendimiento) en dichas uniones, gana importancia. Allí se sugieren que los resultados del NDT térmico activo están limitados a espesores de 8mm y que por debajo de

dicho espesor, los resultados son adecuados (Grosso et.al, 2013).

Otro ejemplo de este tipo es el análisis por ultrasonido y termografía lock-in para la evaluación del desprendimiento de juntas adhesivas en materiales compuestos. En dicho trabajo se consideraron nueve juntas con diferentes defectos en forma de despegue parcial y la inspección se basó en la propagación de ondas guiadas por ultrasonidos. Los resultados mostraron que las representaciones bidimensionales de los valores de la raíz cuadrada media ponderada permitieron identificar la presencia de defectos reales en la película adhesiva y determinaron su geometría (Palumbo et.al., 2016, p.7).

La aplicación del método de termografía infrarroja pulsada para la evaluación no destructiva de juntas adhesivas de material compuesto para aeronaves. La inspección, se realizó en las uniones adhesivas de la estructura portante del ala y las juntas estructurales relacionadas específicamente. Los resultados, sugieren que su interpretación es sencilla y se pueden utilizar para la evaluación tanto cualitativa como cuantitativa de las uniones adhesivas de piezas compuestas delgadas (Kostroum & Dvorak, 2021, p.17).

La inspección basada en emisiones acústicas también ha sido aplicada para la determinación del daño por fatiga en juntas adhesivas de compuesto de fibra de carbono (CFRP). Esto, debido a que las uniones adhesivas se emplean cada vez más y están sometidas a usos severos cada vez más frecuentemente. Por tal motivo, los autores realizaron el procedimiento de inspección en uniones adhesivas CFRP-CFRP mediante emisión acústica. Sus resultados sugieren que, tras una adecuada elaboración y filtrado mediante algoritmos de reconocimiento de patrones, la

técnica permite una identificación y caracterización efectiva de la extensión de los daños por fatiga en dichas uniones adhesivas (Carboni & Bernasconi, 2022, p.395).

Por su parte el método de inspección de ondas Lamb en uniones adhesivas ha sido investigado y se ha señalado que los defectos más típicos encontrados con la técnica de ondas Lamb fueron huecos y adhesión débil en el sustrato. Lo anterior, apunta a dicha técnica como una posible solución de inspección efectiva sin limitante del sustrato (Ramalho, Lopez y da Silva, 2022, p.20).

Como pudo notarse de la revisión bibliográfica, diversas técnicas no destructivas han sido aplicadas en uniones adhesivas de fibra de carbono y para la industria aeronáutica. Además, que queda en claro que estas son un tema de relevancia industrial, sobre todo si están enfocadas en la aplicación en materiales compuestos de la industria aeronáutica. En este sentido debe mencionarse que las técnicas volumétricas son las más aplicadas; ya que los defectos que se generan en las uniones adhesivas son variables y difíciles de detectar por otro tipo de técnicas no destructivas. No obstante, no existe información suficiente de la inspección de uniones adhesivas utilizando tomografía computarizada (CT).

La tomografía computarizada (CT), es un método radiográfico que proporciona una técnica de examinación volumétrica ideal cuando el objetivo principal es ubicar y dimensionar el detalle plano y en tres dimensiones (ASTM E1441-11. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging).

En este trabajo se empleó un adhesivo base metilmetacrilato auto curable en uniones aluminio-aluminio, acero-acero y acero-aluminio. El objetivo es mostrar la efectividad para detectar imperfecciones de la inspección por medio de

tomografía computarizada de una unión adhesiva aluminio-acero para detectar imperfecciones en este tipo de uniones y permitir al analista o ingeniero determinar causas que generaron la falla en componentes unidos con adhesivo. Además de presentar como alternativa de inspección no destructiva la tomografía computarizada aplicada en uniones adhesivas entre aluminio y acero.

Metodología.

Preparación de uniones adhesivas.

Las uniones adhesivas, se prepararon mediante la metodología estipulada en la norma (ASTM D1002. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal), 2019), así como los métodos y herramientas diseñados por (Marin-Galicia, Santillan & Cruz –Gonzalez, 2020)

El proceso general, fue la activación de la superficie mediante limpieza ultrasónica, chorro de arena, limpieza con acetona y secado al aire. Una vez secos los sustratos se procedió a colocarlos entre los sujetadores del herramental; los topes se ajustaron a colocarlos entre los sujetadores del herramental y los topes se ajustaron para generar un espesor de 0.3 mm de película adhesiva. En la sección de materiales, se describirán los sustratos empleados en este trabajo. La Figura 1, muestra un ejemplo del proceso de pegado.



Figura 1. Esquema de proceso de pegado en herramental para probetas. Fuente: elaboración propia.

Inspección post-fractura.

Se realizó una inspección visual post-fractura en las probetas ensayadas de aluminio-acero, para determinar el modo de falla de la unión adhesiva, con el fin de relacionar esta información con lo encontrado mediante CT. La inspección estereográfica post-fractura, se realizó en tres grupos (aluminio-acero) una vez que se sometieron a una carga estática en tensión. Lo anterior, mediante el empleo de microscopio estereoscopio Carl Zeiss modelo Axiovision. Las observaciones, se realizaron a 7X, 20X y 30X de magnificación.

Tomografía computarizada (CT).

La inspección por medio de tomografía computarizada (CT), se realizó por medio de un escáner Phoenix -vtomex - m. Para la inspección, se empleó un voltaje de 210 kV, una corriente de 210 μ A, una resolución de 44.59 μ m, filtrado con 0.3mm CU, 1600 imágenes y un detector modelo GE DXR-250. Finalmente, el dimensionamiento del defecto se llevó a cabo con las herramientas del Software VG Studio Max 3.2.

Materiales.

Los materiales involucrados fueron placas de aluminio 6061-T6 de 6mm de espesor y acero de alta resistencia DUAL-TEN® 590/600 de 3.2 mm de espesor. Las probetas fueron cortadas y se prepararon con las dimensiones estipuladas en la norma ASTM D1002. Las tiras de 120x25xespesor de pared de cada lámina se cortaron utilizando de una máquina de corte con chorro de agua marca Mitsubishi modelo Suprema. Posteriormente, se mecanizaron hasta las dimensiones finales mediante una maquina CNC HASS VF2. Después, las dimensiones fueron corroboradas mediante calibrador Vernier 12" Mitutoyo de 0.01mm de exactitud. Finalmente, se procedió al pegado de las probetas como se describió en la sección de metodología.

El adhesivo utilizado fue el metil metacrilato MP55420, el cual es un adhesivo de dos componentes que puede unir plásticos, metales y materiales compuestos. Este adhesivo cura a temperatura ambiente y libera calor mediante una reacción exotérmica cuya temperatura puede alcanzar 70°C (fuente: el autor). El tiempo de manejo es de 13 minutos máximo y cura totalmente después de 24 horas. La información técnica de este adhesivo se puede encontrar en la hoja técnica (HB fuller technical data sheet, 2018).

Resultados.

Inspección post-fractura.

El efecto del curado en las uniones adhesivas, es muy importante ya que tiene impacto directo en las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas (Cruz-González, Vargas –Arista, Santillán, Barba Pingarron & Guzmán, 2022). En ese sentido, se ha notado que el cambio de coloración (de ámbar a café oscuro) en la superficie de fractura de las

probetas fracturadas aluminio-acero sugiere falla cohesiva-adhesiva (ver Figura 2).

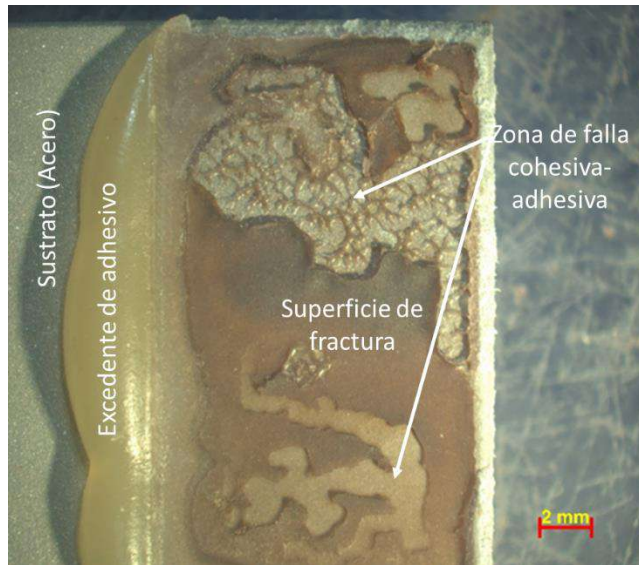


Figura 2. Superficie de fractura de probeta de tensión de unión aluminio-acero (7X de magnificación). Fuente: elaboración propia

Lo anterior lleva a la necesidad de realizar la inspección post-fractura utilizando microscopio estereográfico en la superficie de fractura de cada probeta aluminio-acero. Por tal motivo, se procedió a inspeccionar la superficie de la zona café oscuro, encontrando áreas que parecieran óxido o bien algún problema generado durante el curado de la película de adhesivo.



Figura 3. Imagen a mayores aumentos de la zona falla cohesiva-adhesiva (30X de magnificación). Fuente: elaboración propia

Posteriormente, se procedió a remover una sección de la película de adhesivo sobre la superficie de la probeta para verificar si lo observado era óxido. La Figura 4, muestra el resultado de la remoción de una pequeña cantidad de adhesivo en la superficie del sustrato acero. En la superficie (ver flecha negra Fig. 4), se puede apreciar una parte del sustrato totalmente limpia, se aprecia el acabado superficial sin algún tipo de oxidación. Por lo tanto, se descarta que el cambio de coloración sea generado por óxido de la superficie.

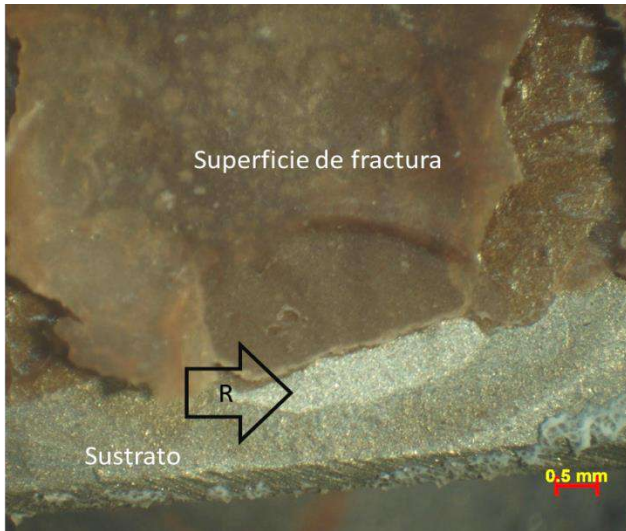


Figura 4. Superficie de fractura de probeta de tensión de unión sustrato acero (20X de magnificación). Fuente: elaboración propia

Inspección CT.

Una vez inspeccionada la superficie de fractura, se procedió a revisar la sanidad de los testigos de las probetas aluminio-acero mediante CT. La Figura 5, muestra la sección transversal de unión adhesiva aluminio-aluminio a 133% de magnificación donde se puede observar los sustratos y la película adhesiva. Por otro lado, la Figura 6 muestra la sección transversal de la unión adhesiva aluminio-acero a 133% cuyos sustratos de espesor disímil pueden ser notados.

Una vez inspeccionado la sección transversal, se procedió a inspeccionar dicha sección desde una vista superior a 188% ya que en la primera inspección, no se localizaron defectos. En la Figura 7, se muestra la inspección en vista superior de la película adhesiva a lo largo del traslape de la junta. El resultado de la inspección CT, muestra una superficie limpia y no se aprecian defectos de sanidad. Esto, es congruente con el resultado de prueba de tensión donde se apreció una fractura cohesiva.

En contraste, la Figura 8 muestra la superficie del sustrato de acero. En dicha Figura, se puede apreciar un defecto señalado por flechas amarillas el cual se encuentra dentro de la película adhesiva. La extensión del defecto, es de aproximadamente el 45% de la superficie interna de la película adhesiva.

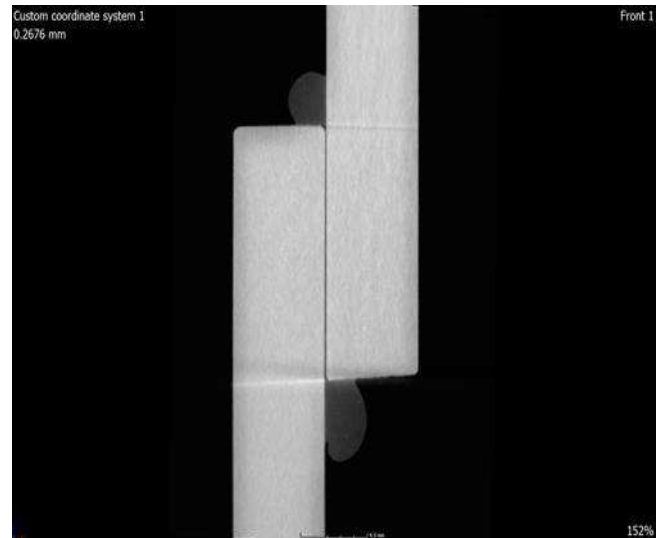


Figura 5. Unión adhesiva aluminio-aluminio cuyos sustratos tienen 6mm de espesor. Fuente: elaboración propia

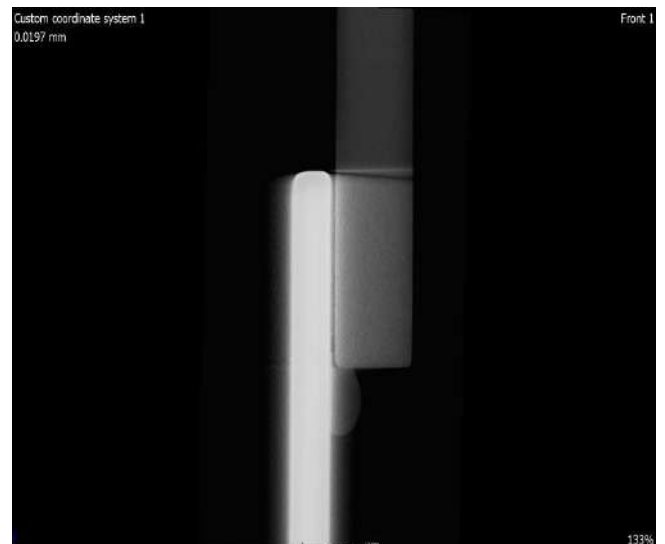


Figura 6. Unión adhesiva aluminio-acero cuyos sustratos tienen 6mm y 3.2mm de espesor. Fuente: elaboración propia



Figura 7. Vista superior de la unión aluminio-aluminio sin defectos. Fuente: elaboración propia

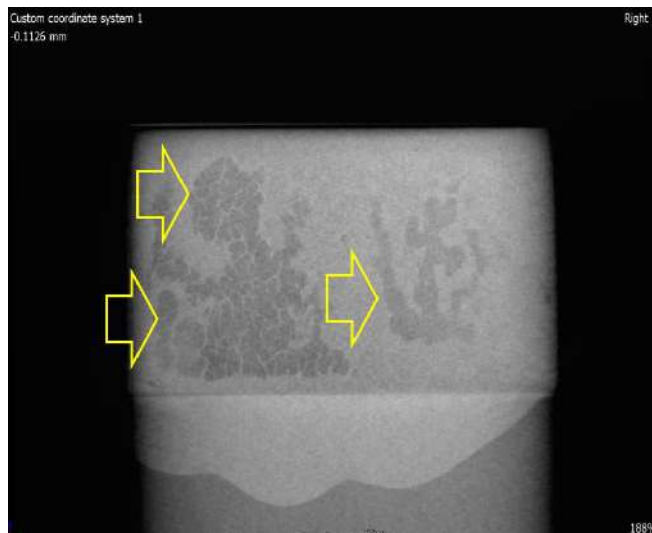


Figura 8. Vista superior de la unión aluminio-acero con defecto (señalado con flechas amarillas). Fuente: elaboración propia

Debido a que la reacción de curado del metilmetacrilato es exotérmica y que los sustratos tienen diferentes conductividades térmicas, se determinó la cantidad de calor de cada sustrato por medio de la Ley de Fourier para la transferencia de calor (Ecuación 1). Se consideró el tiempo de distribución de temperatura de pared interna con reacción exotérmica a 70°C y la pared externa a 21°C, en relación a espesor de probeta y

conductividad térmica de cada material. (Çengel, Yunus, 2011). (Mills, Anthony F., 1997), (Incropera, F.P., 1999).

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de sus interacciones. La conducción puede ocurrir en sólidos, líquidos o gases. En la figura 9 puede observarse el esquema de flujo de calor a través de una pared o sustrato.

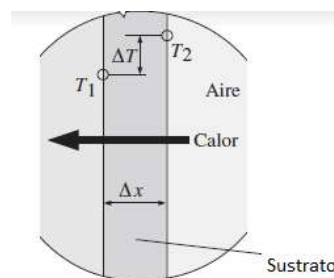


Figura 9. Conducción del calor a través de sustrato. Fuente: elaboración propia.

$$Q_{cond} = k_t A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (1)$$

La tasa de conducción de calor Q_{cond} a través de una capa de espesor constante Δx es proporcional a la diferencia de temperatura ΔT en la capa y el área A normal a la dirección de transferencia de calor, mientras que es inversamente proporcional al espesor de la capa. La constante de proporcionalidad k_t es la conductividad térmica del material, la cual es una medida de la capacidad del material para conducir calor.

En el caso límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación (1) se reduce a la forma diferencial Ec. (2).

$$Q_{cond} = -k_t A \frac{dT}{dx} \quad (W) \quad (2)$$

La cual se conoce como ley de Fourier de conducción de calor, e indica que la tasa de conducción de calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa misma dirección. El calor es conducido en la dirección de temperatura decreciente, y el gradiente de temperatura se vuelve negativo.

Cuando la temperatura disminuye con x creciente. Por consiguiente, se agrega un signo negativo en la ecuación para hacer de la transferencia de calor en la dirección x positiva una cantidad positiva.

Discusión.

Los resultados de la inspección mediante estereoscopio, revelaron que el cambio de coloración no fue provocado por oxidación superficial de los sustratos. Esto, pudo ser corroborado al descubrir la superficie limpia del sustrato de acero (Figura 4). Para (Omairey, Jayasree, & Kazilas, 2021), las incertidumbres más comunes en una unión adhesiva pueden manifestarse como enlaces de beso, porosidad y vacíos en el adhesivo. En ese sentido, el defecto observado se asemeja a un enlace de beso (Baker & Nezhad, 2021).

Sin embargo, los enlaces de beso están relacionados con contaminación en la superficie del sustrato que inhibe la formación de la unión. En este caso, es notorio que ocurrió un fenómeno que generó un defecto en la película adhesiva en forma de fractura superficial en el lado del sustrato de acero; es posible relacionar un causal debido a cantidad de flujo de calor conducido. El aluminio al ser mejor conductor de calor, absorbe 91.6% aproximadamente más cantidad de calor que el acero, provocándose una dirección de flujo disipado en dirección a sustrato de aluminio, por consecuencia se determina un curado a temperatura no homogénea. Conservándose de forma simultánea mayor temperatura en el acero mientras en aluminio se tiene decremento de temperatura en dependencia a los espesores sugeridos en la unión adhesiva.

En ese trabajo, la técnica CT se aplicó en una unión adhesiva con metales y pudo detectarse el defecto tipo enlace de beso en la unión aluminio-acero. Además de la identificación de este defecto, también esta técnica hizo posible determinar la

zona y extensión del defecto a lo largo de la película adhesiva.

Conclusiones.

Con base en los resultados expuestos en los párrafos anteriores, se pueden concluir que:

Considerando que defectos que se generan en las uniones adhesivas son variables y difíciles de detectar, entonces esta técnica es una alternativa viable para su aplicación en uniones de este tipo que son utilizadas en la industria aeronáutica y en materiales compuestos. Además, la técnica de inspección volumétrica, tomografía computarizada puede usarse para completar la información del tipo de defectos en uniones adhesivas de aluminio-aluminio, acero-acero y acero-aluminio unidas con adhesivo base metilmetacrilato auto curable.

Como conclusiones específicas se obtiene lo siguiente:

Se observó cambio de coloración (de ámbar a café oscuro) en la superficie de fractura de las probetas fracturadas aluminio-acero que sugieren falla cohesiva-adhesiva.

Se inspecciona la superficie de la zona café oscuro, encontrando zonas que parecieran óxido o bien algún problema generado durante el curado de la película de adhesivo. Dicha hipótesis es descartada, ya que se observó que el cambio de coloración no era generado por óxidos de la superficie. Esto fue comprobado después de la remoción de una pequeña cantidad de adhesivo en la superficie del sustrato acero, donde se apreció una parte del sustrato totalmente limpia, sin algún tipo de oxidación.

Posterior a la inspección de la superficie de fractura, y revisar la sanidad de los testigos de las

probetas aluminio-acero mediante CT se muestra en sección transversal de la unión adhesiva aluminio-acero a 133%, el hallazgo de sustratos de espesor disímil.

En inspección de sanidad de los testigos de las probetas aluminio-acero mediante CT en vista superior de la película adhesiva a lo largo del traslape de la junta. Se manifiesta una superficie limpia y no se aprecian defectos de sanidad. En correspondencia congruente con el resultado de prueba de tensión donde se apreció una fractura cohesiva.

Es posible apreciar en la superficie del sustrato de acero un defecto el cual se encuentra dentro de la película adhesiva. La extensión del defecto, es cuantificable siendo aproximadamente el 45% de la superficie interna de la película adhesiva.

Adicionalmente es posible calcular espesores correlacionados con el material de sustrato y balancear la disipación de calor de la reacción exotérmica del adhesivo bilateralmente en forma homogénea.

Agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial el invaluable apoyo a la ciencia en México.

Referencias.

(2019). *ASTM D1002. Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. American Society of Testing Materials.

Aluminum 6061-T6; 6061-T651. (s.d.). Fonte: MATWEB. Material Property Data: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matgu id=1b8c06d0ca7c456694c7777d9e10be5b&ckck=1>

- ArcelorMittal*. (s.d.). Fonte: DH steels for cold drawing: https://automotive.arcormittal.com/products/flat/third_gen_AHSS/DH
- ASTM E1441-11. Standard Guide for Computed Tomography (CT) Imaging. (s.d.). American Society for Testing Materials.
- Baker, A., & Nezhad, H. Y. (2021). 15 - Adhesively bonded repairs to highly loaded structure. Em *Adhesive Bonding (Second Edition)* (pp. 437-497). Berlin: Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies.
- Carboni, M., & Bernasconi, A. (2022). Acoustic emission-based monitoring of fatigue damage in CFRP-CFRP adhesively bonded joints. *Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 393-397.
- Cawley, P., & Hodson, M. J. (1989). The NDT of Adhesive Joints Using Ultrasonic Spectroscopy. Em D. O. Thompson, & D. E. Chimenti, *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. (pp. 1377-1384). Boston: Springer.
- Cruz González, C. E., Vargas-Arista, B., Santillan, S., Barba Pingarron, A., & Guzman, I. (2022). Effect of curing post-treatment time on mechanical properties and stress distribution of adhesively bonded dissimilar steel-aluminum joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology volume 121*, 4929-4940.
- Ehrhart, B., Valeske, B., & Bockenheimer, C. (2013). 9 - Non-destructive evaluation (NDE) of aerospace composites: methods for testing adhesively bonded composites. Em *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites* (pp. 220-237). Berlin: Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering.
- Grosso, M., Marinho, C. A., Nesteruk, D. A., Rebello, J. M., Soares, S. D., & Vavilov, V. P. (2013). Evaluating quality of adhesive joints in glass-fiber plastic piping by using active thermal NDT. *Proceedings Volume 8705, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXV; 87050T (2013)*. Baltimore, Maryland, United States: SPIE Defense, Security, and Sensing.
- HB Fuller*. (s.d.). Fonte: MP55420 Technical Data Sheet: https://www.hbfuller.com/-/media/files/resource-library/tds/structural-marine-bonding/mp55420-tds_en-20200707.pdf
- Kostroun, T., & Dvořák, M. (2021). Application of the Pulse Infrared Thermography Method for Nondestructive

Evaluation of Composite Aircraft Adhesive Joints. *MDPI. Materials*, 1-19.

Marin-Galicia, D. N., Santillan, S., & Cruz-González, C. E. (2020). *Diseño y manufactura de herramienta para fabricación de probetas empleadas en investigación de uniones adhesivas/tesis que para obtener el título de Licenciada en Tecnología*. Cuautitlán Izcalli., Mexico: Universidad Autónoma de México.

MatWeb. *Material Property Data*. (15 de 12 de 2021). Fuente: <http://www.matweb.com/>

Omairey, S., Jayasree, N., & Kazilas, M. (2021). Defects and uncertainties of adhesively bonded composite joints. *SN Applied Sciences volume 3*, 1-14.

Palumbo, D., Tamborrino, R., Galiotti, U., Aversa, P., & Luprano, V. (2016). Ultrasonic analysis and lock-in thermography for debonding evaluation of composite adhesive joints. *NDT & E International*, 1-9.

Petrie, E. (1990). *Handbook of Adhesives and Sealants, Third Edition*. Chicago: McGraw-Hill.

Ramalho, G. M., Lopes, A. M., & da Silva, L. F. (2022). Structural health monitoring of adhesive joints using Lamb waves: A review. *Structural Control and Health Monitoring*, 1-22.

TWI. (26 de 10 de 2022). Fuente: What is Non-Destructive Testing (NDT)?: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-non-destructive-testing>

Wojtczak, E., & Rucka, M. (2019). Wave Frequency Effects on Damage Imaging in Adhesive Joints Using Lamb Waves and RMS. *MDPI. Materials*, 1-18.

Çengel, Yunus. (2011). *Transferencia de calor y de masa un enfoque práctico*, Tercera Edición, Editorial McGraw-Hill, México

Mills, Anthony F. (1997), *Transferencia de calor*. Tercera edición, Irwin, México.

Incropera, F.P.(1999), *Fundamentals of heat and mass transfer*, J. Wiley

