

Consumo de electricidad y gas en vivienda: casos de estudio en ciudades de México de cuatro regiones climáticas

Rodríguez-Muñoz, N.A., Ortega-Ávila, N., Nájera-Trejo, M.

The use of Arduino as a didactic tool: An approach in the detection of adulterated mezcal

Sifuentes-Gallardo, C., Ortega-Sigala, J.J., Guzmán-Fernández, M., Zambrano, M., Berumen-Torres, J., Rodríguez-Tenorio, D., Rodríguez González, B., Cardoso-Pérez, M., Cruz-Domínguez, O., Wassim, S. y Durán-Muñoz, H.

Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en *Fagus crenata*

Sotomayor-Castellanos, J.R., Macedo-Alquicira, I.

Estudio exploratorio de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como actividad productiva del valle de Mexicali, México

Michel-López, C.Y., Caballero-Julián, S., Flores-Garivay, R., Lara-Rivera, A.L., Morales-Hernández, J.C., Zambrano-Reyes, C.

Evaluación de la citotoxicidad de andamios de PCL y PLGA con células troncales de pulpa dental para ingeniería tisular

Rosales-Ibáñez, R., Rodríguez-Martínez, J.J., González-González, A.M., Morales-De la Luz, R., Sánchez-Pech, J.C., Hernández-Sánchez, F., Villamar-Duque, T.E., González Aragón-Pineda, A.E., Flores-Sánchez, M.L.O.

Autopercepción de las emociones de los universitarios en el regreso a las actividades presenciales tras el fin del aislamiento voluntario por el COVID-19

Brício-Barrios, E.E., Arceo-Díaz, S., Brício-Barrios, J.A., Ochoa-Flores, S., Ramírez-Guzmán, M.C., Flores-Anguiano, M.

Artículo presentado en Congreso CNIES 2021 IPN ESIME Zacatenco

Análisis de Series Temporales Aplicado al Modelado de Aportaciones del Embalse Angostura

Marín-Cruz, I., Martínez-Martínez, J.L., Mota-Palomino, R.O.A., Badaoui, M.



Cintillo Legal

RIIT REVISTA INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA, Vol. 11, No. 63. Julio - Agosto 2023, es una publicación bimestral editada y publicada por Universidad Autónoma de Coahuila, boulevard Venustiano Carranza s/n colonia República Oriente, C.P. 25280, Saltillo, Coahuila, Tel. (844) 414 85 82, <https://riit.com.mx/>, correo electrónico: publicacionesriit@uadec.edu.mx. Editor responsable: Dra. Antonia Mtz. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2022-021512364600-102, ISSN: 2007-9753, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Departamento de Divulgación y Comunicación Digital de la Dirección de Investigación y Posgrado de la UAdeC, Q.F.B. Fernando García, Edificio "D" planta alta, unidad Camporredondo, Saltillo, Coahuila, C.P. 25280, Tel. (844) 414 85 82, fecha de última modificación: 01 Julio 2023.

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

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

Tabla de Contenido

Título artículo/ Autores	Páginas
Consumo de electricidad y gas en vivienda: casos de estudio en ciudades de México de cuatro regiones climáticas Rodríguez-Muñoz, N.A., Ortega-Ávila, N., Nájera-Trejo, M.	1 - 24
The use of Arduino as a didactic tool: An approach in the detection of adulterated mezcal Sifuentes-Gallardo, C., Ortega-Sígala, J.J., Guzmán-Fernández, M., Zambrano, M., Berumen-Torres, J., Rodríguez-Tenorio, D., Rodríguez-González, B., Cardoso-Pérez, M., Cruz-Domínguez, O., Wassim, S., Durán-Muñoz, H.	25 - 38
Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en <i>Fagus crenata</i> Sotomayor-Castellanos, J.R., Macedo-Alquicira, I.	39 - 62
Estudio exploratorio de la alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) como actividad productiva del valle de Mexicali, México Michel-López, C.Y., Caballero-Julián, S., Flores-Garivay, R., Lara-Rivera, A.L., Morales-Hernández, J.C., Zambrano-Reyes, C.	63 - 78
Evaluación de la citotoxicidad de andamios de PCL y PLGA con células troncales de pulpa dental para ingeniería tisular Rosales-Ibáñez, R., Rodríguez-Martínez, J.J., González-González, A.M., Morales-de la Luz, R., Sánchez-Pech, J.C., Hernández-Sánchez, F., Villamar-Duque, T.E., González Aragón-Pineda, A.E., Flores-Sánchez, M.L.O.	79 - 94
Autopercepción de las emociones de los universitarios en el regreso a las actividades presenciales tras el fin del aislamiento voluntario por el COVID-19 Bricio-Barrios, E.E., Arceo-Díaz, S., Bricio-Barrios, J.A., Ochoa-Flores, S., Ramírez-Guzmán, M.C., Flores-Anguiano, M.	95 - 107
Análisis de Series Temporales Aplicado al Modelado de Aportaciones del Embalse Angostura Marín-Cruz, I., Martínez-Martínez, J.L., Mota-Palomino, R.O.A., Badaoui, M.	108 - 127



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Consumo de electricidad y gas en vivienda: casos de estudio en ciudades de México de cuatro regiones climáticas

Electricity and gas consumption in housing: case studies in Mexican cities in four climatic regions

Rodríguez-Muñoz, N.A.^{a*}, Ortega-Avila, N.^a, Nájera-Trejo, M.^b

^a CONAHCYT - Departamento de Ingeniería Sustentable; Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.; C.P. 34147, Durango, Durango.

^b Departamento de Ingeniería Sustentable, Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C.; C.P. 34147, Durango, Durango.

norma.rodriguez@cimav.edu.mx*; naghelli.ortega@cimav.edu.mx; mario.najera@cimav.edu.mx

Innovación tecnológica: Metodología de modelación de vivienda para cuantificar requerimientos energéticos.

Área de aplicación industrial: Aplicación en la industria de la construcción, diseñadores y desarrolladores de vivienda, tomadores de decisiones en política pública energética y de vivienda, usuarios de tarifa eléctrica doméstica.

Recibido: 18 agosto 2022

Aceptado: 30 mayo 2023

Abstract

Mexican families allocate a significant proportion of their income to paying energy bills such as electricity and gas, necessary for the use of electrical appliances, air conditioning, and sanitary water heating. This research discusses the challenges that Mexican families have in paying for the energy required to satisfy their needs for thermal comfort and water heating for sanitary use. Simulations were carried out to quantify the energy required to maintain thermal comfort and heat water for sanitary use in four Mexican cities: Cancún, Quintana Roo with a tropical climate; Hermosillo, Sonora with hot arid; Durango, Durango with a temperate semi-arid, and Puebla, Puebla with a temperate sub-humid climate. Thus, the minimum and maximum average temperatures inside, the monthly bills, and the total annual expenses for energy were calculated. In all the cities, except for Puebla, maximum interior temperatures of 30 °C were reached, while in all the cities except Cancún, indoor temperatures were below 18 °C. Furthermore, it was found that

the city that requires more energy to achieve thermal comfort and heat water is Hermosillo (hot-arid climate); however, there is a higher expense in Durango (temperate semi-arid climate). In all cases, water heating represents up to 66% of the energy cost in Mexican homes, with Durango and Puebla being the cities where the greatest amount of energy is required to bathe with hot water. It is also deduced that due to the high monthly expenses for electricity and gas that households need to make, families need to take energy deprivation measures to prioritize food and transportation expenses, putting them at risk of energy poverty. Finally, it is essential to continue taking action to improve the design and construction of Mexican housing, adapt existing regulations and improve the availability of economical and efficient equipment to meet the energy needs of Mexican families.

Keywords: cooling, heating, thermal comfort, water heating.

Resumen

Las familias mexicanas destinan una proporción importante de su ingreso al pago por energéticos como la electricidad y el gas; los cuales son necesarios para el uso de electrodomésticos, climatización y el calentamiento de agua sanitaria. A través de esta investigación se ponen a discusión los retos que tienen las familias mexicanas para costear la energía requerida para satisfacer sus necesidades de confort térmico y calentamiento de agua sanitaria. Con este fin, se realizaron simulaciones para cuantificar la energía requerida para mantener el confort térmico y calentar agua de uso sanitario en cuatro ciudades mexicanas: Cancún, Quintana Roo con clima tropical; Hermosillo, Sonora con clima árido cálido; Durango, Durango con clima templado semiárido, y Puebla, Puebla con clima templado subhúmedo. Así, se calcularon las temperaturas promedio mínimas y máximas en el interior, las facturas mensuales y el monto total anual a desembolsar por la energía. En todas las ciudades, con excepción de Puebla, se alcanzaron temperaturas máximas en el interior de 30 °C, mientras que, en todas las ciudades excepto Cancún, se tuvieron temperaturas interiores menores a los 18 °C. Se encontró que la ciudad que requiere más energía para lograr confort térmico y calentar agua es Hermosillo (clima árido cálido); sin embargo, en Durango (clima templado semiárido) se tiene un desembolso mayor. En todos los casos el calentamiento de agua representa hasta un 66% del costo por energéticos en los hogares mexicanos, siendo Durango y Puebla las ciudades donde se requiere mayor cantidad de energía para bañarse con agua caliente. También se deduce que debido a los altos gastos por electricidad y gas que requieren realizarse en los hogares mensualmente, las familias necesitan tomar medidas de privación energética para dar prioridad a gastos de alimentación y transporte, poniéndose en riesgo de pobreza energética. Finalmente, es esencial continuar tomando acciones de mejoramiento en el diseño y construcción de la vivienda mexicana, realizar la adecuación de la normativa existente y mejorar la disponibilidad de equipamiento económico y eficiente para lograr satisfacer las necesidades energéticas de las familias mexicanas.

Palabras clave: aire acondicionado, calefacción, calentamiento de agua, confort térmico.

1. Introducción

Las edificaciones son responsables del 38% de las emisiones totales de dióxido de carbono (CO₂) (Global Alliance for Buildings and Construction GABC, 2020) y de aproximadamente una cuarta parte del consumo energético a nivel mundial (International Energy Agency IEA, 2021). Estadísticas de la Agencia Internacional de Energía muestran que el uso final de energía en el sector de edificios aumentó de 118 EJ en 2010 hasta casi 130 EJ en 2019; donde los usos energéticos que se han incrementado con mayor velocidad son los relacionados con el enfriamiento de espacios y el uso de electrodomésticos (International Energy Agency IEA, 2021).

En 2020, el consumo de energía en el sector residencial en México ascendió a 914.87 PJ, de los cuales 330.28 PJ corresponden a uso de leña, 260.09 PJ a electricidad y 289.54 PJ a gas licuado de petróleo (gas L.P.) (SENER, 2021). Al comparar con las cifras de 2019, se puede observar que se tuvo un incremento del 12.04% en el consumo de electricidad y 25.32% en el uso del gas L.P.; por otro lado, es importante mencionar que el uso de la energía solar en los hogares también tuvo un aumento del 14.32%. A través de diversos estudios se ha identificado que existe una mejora en la eficiencia energética en los hogares mexicanos y que ya se observa un cambio en la tendencia de crecimiento del uso de la energía eléctrica.

Actualmente, la intensidad en el uso de la energía es menor, incluso aunque se ha incrementado el equipamiento de los hogares, otra tendencia observable es que hay un crecimiento menor del consumo de electricidad en las casas en climas templados (SENER - CONUEE, 2018). Una situación destacable es que el 90% del consumo de electricidad en los hogares mexicanos se hace con equipos que están regidos por alguna

Norma Oficial Mexicana (NOM), por lo que en lo general cumplen con requerimientos mínimos de desempeño (SENER - CONUEE, 2018). En el mismo sentido, se ha identificado que en el 50.6% de los hogares existe disposición al ahorro de energía eléctrica y que hay conciencia en la compra de equipos ahorradores, principalmente en hogares urbanizados (Morales-Ramírez, Dionicio, Alvarado-Lagunas, Elías, González Del Ángel, 2021).

En el Código de Edificación de Vivienda, los edificios de uso residencial en México se clasifican en seis categorías de acuerdo a su precio y superficie construida: económica (40 m²), popular (50 m²), tradicional (71 m²), media (102 m²), residencial (156 m²) y residencial plus (más de 188 m²) (SEDATU - CONAVI, 2017). De estas, las viviendas del tipo económica, popular y tradicional son consideradas como Vivienda de Interés Social (VIS), que son las destinadas a las personas con menores ingresos. En los últimos tres años, el registro de vivienda popular y tradicional concentra más del 70% del total (Registro Único de Vivienda (RUV), 2022).

No obstante, aún existen numerosos problemas asociados a la construcción masiva de vivienda, entre ellos la edificación de fraccionamientos en las periferias urbanas, hacinamiento, falta de infraestructura de agua y saneamiento, baja calidad y durabilidad de los materiales, entre otros (ONU-Hábitat, 2019). El programa de Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) de la Organización de las Naciones Unidas, calcula que en las zonas urbanas 1,100 millones de personas viven en condiciones de habitabilidad inadecuada; por lo que hace un llamado a mejorar la calidad de vida de las familias de menores recursos a través del acceso a vivienda adecuada y accesible (Berkowitz, Bill, Brownlee, 2022).

1.1. Energía en la vivienda

En los hogares se utiliza energía para la realización de distintas actividades que conllevan la satisfacción de las necesidades básicas como el uso de electrodomésticos, iluminación, enfriamiento y calentamiento de espacios, calentamiento de agua, cocción y conservación de alimentos (refrigerador). Así, las familias deben destinar una porción de su ingreso para la compra del equipamiento requerido y para la operación del mismo. Sin embargo, debido a los bajos ingresos que prevalecen en México, se ha encontrado que existe dificultad para satisfacer las necesidades energéticas. De acuerdo a la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en los Hogares (ENIGH) (INEGI - Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2021), los ingresos trimestrales promedio por hogar fueron de \$55,073, mientras que para el primer decil fueron de \$11,127 (\$52.8 pesos diarios por perceptor). La dificultad de costear las necesidades energéticas ha sido documentada por diversos estudios; la cual persiste, aunque los precios de los energéticos en México no son necesariamente elevados, comparados con otras partes del mundo (Daniel Howdle, 2022).

En el caso particular de la electricidad, su bajo costo a nivel residencial se debe principalmente a la existencia de un subsidio universal al consumo, es decir, para cualquier usuario final, siempre y cuando no se excedan ciertos límites regionales preestablecidos, en cuyo caso existe un régimen de excepción para aplicar una tarifa “doméstica de alto consumo (DAC)” (Beltrán Nishizaki, 2020). Al respecto, Gopal et al. analizaron la aplicación de programas de incentivos financieros, bajo la hipótesis de que los subsidios al consumo final de energía eléctrica reducen la percepción del valor de la eficiencia energética para el consumidor y aumentan los costos al gobierno (Gopal,

Leventis, Phadke, & de la Rue du Can, 2014). Encontraron que si se evitan estos subsidios se podrían cubrir los costos de manufactura de aires acondicionados, refrigeradores y televisores más eficientes que los modelos con eficiencia promedio. Igualmente, a través de un estudio de privación de servicios energéticos en México se encontró que sin importar la región climática donde viven las familias, existe un acceso desigual a los servicios energéticos (García Ochoa, Ávila-Ortega, & Cravioto, 2022); por lo que habría que repensarse la política energética para atender esta compleja desigualdad.

La vivienda económica, su problemática y sus posibles soluciones han sido ampliamente estudiadas mundialmente, y México no es la excepción. Además, desde hace décadas se ha identificado que hay una tendencia de incremento en el uso de la energía eléctrica, la cual permanecerá igual si no se tienen cambios en la penetración de las tecnologías, el uso del equipo y el tamaño de la vivienda (Rosas-Flores & Gálvez, 2010). En un contexto similar, Hancevic y López Aguilar estimaron reducciones en el uso de energía en el sector residencial al aplicar un escenario de mejoramiento en la eficiencia energética, a través del reemplazo masivo de electrodomésticos; se determinaron reducciones de 9.9% en el consumo de energía, 3.9 millones de toneladas de CO₂ y una potencial reducción en subsidios de 7.5 billones de pesos por año (Hancevic & López-Aguilar, 2019).

En otra investigación se calculó el requerimiento energético de sistemas de acondicionamiento de aire, como aires acondicionados, calefactores y ventiladores, en tres regiones climáticas en México (Rosas-Flores & Rosas-Flores, 2020) y se determinó que el 19% del consumo de energía en el sector residencial se destina a estos sistemas. También encontraron que se podrían ahorrar 94.7 TWh y evitar 44.6 MM toneladas de CO₂

si se utilizara aislamiento térmico en todas las casas existentes y proyectadas hasta el 2030. Por su parte, Oropeza-Pérez realizó un análisis de sensibilidad del desempeño energético de aires acondicionados y de la aplicación de medidas pasivas de enfriamiento en vivienda mexicana, a partir del cual estimó ahorros de 770 USD en las facturas de electricidad y retornos de inversión tan bajos como dos años por el uso de equipo altamente eficiente (Oropeza-Pérez, 2016).

1.2. Pobreza energética

Considerando que algunos estudios estiman que la relación entre el gasto energético y el ingreso total de las familias es un elemento clave en el análisis de la pobreza energética, en la investigación de Santillán et al. se calculó que en México 29.7% de la población vive en pobreza energética, mientras que 17% se encuentra en pobreza energética extrema (Santillán, Cedano, & Martínez, 2020); sin embargo, únicamente en el 9.4% de los hogares con pobreza energética sobrepasa el 10% del ingreso destinado a servicios energéticos. Esto podría estar relacionado con que la electricidad se encuentra subsidiada y que en algunas ocasiones los combustibles que se usan para cocinar (como la leña) pueden carecer de un costo económico directo. En otro estudio se calculó que aproximadamente el 37% de los hogares mexicanos (11 millones) viven en pobreza energética, donde la mayor privación se da en el confort térmico en el clima cálido, que padecen el 33% de las familias, y destaca que un 8.7% no tienen acceso a algún medio de calentamiento de agua para el aseo personal (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). Sin embargo, este último nivel de acceso es muy dispar entre niveles de ingresos, dado que al 2006 solo el 6% de los hogares en el decil I contaban con un calentador de agua a gas, mientras que las viviendas del decil X

tuvieron un 106% de cobertura (Rosas, Sheinbaum, & Morillon, 2010).

Por otro lado, también se percibe que existe una heterogeneidad espacial en los niveles de privación de los bienes económicos, donde Guerrero y Chiapas tienen un índice de pobreza energética en el hogar por arriba del 70%, mientras que Baja California tiene un 12% (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). García y Graizbord calcularon la privación de los servicios energéticos en México, donde hasta un 42.1% de los hogares urbanos en climas cálidos se privan del uso de aire acondicionado (enfriamiento) y 18.6% de calentamiento de agua (García Ochoa & Graizbord, 2016b). Ahora bien, al clasificar a los hogares por ingresos, determinaron que las familias de ingresos menores a \$7,062 pesos trimestrales presentan una privación de hasta el 73.7% en el uso de aire acondicionado y un 82.9% en el calentamiento de agua.

Por otra parte, en la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares de INEGI, se determinó que solo el 43.5% de los hogares cuentan con algún calentador de agua, con una distribución particular (56% en el centro del país, 48% en el norte y 9% en el sur), siendo más del 75% tecnologías que queman gas; además, destaca que solo el 6.3% de las viviendas tienen un calefactor, situación que varía enormemente entre regiones (20.4% en la región norte y 1.6% en la región sur) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018).

Adicionalmente, Collins menciona que el estar en habitaciones con temperaturas menores a los 16 °C incrementa el riesgo de adquirir una enfermedad respiratoria y que a los 12 °C se tiene riesgo de un problema cardiovascular (Collins, 1986), estos riesgos son especialmente adversos para población vulnerable como infantes y adultos mayores. Mientras que en una investigación por Flores-

Larsen y Filippín concluyeron que las familias de bajos recursos no pueden afrontar los periodos de ondas de calor de forma resiliente, debido al diseño ineficiente de la vivienda; y encontraron que el 39% de los hogares no encienden el equipo de enfriamiento debido a restricciones económicas (Flores-Larsen & Filippín, 2021).

En cuanto a las consecuencias de la privación de servicios de agua caliente para aseo personal, Reyes determinó que, para limitar su consumo de gas, los habitantes de viviendas “populares” en la Ciudad de México llegan a reducir a cinco minutos el tiempo para ducharse, calientan el agua directamente en la estufa o incluso usan una resistencia eléctrica (Reyes, 2021). Igualmente destaca que los residentes de la colonia analizada ven la falta de acceso a mejores tecnologías como un obstáculo para reducir su consumo de gas, aunque el 21% no cuenta con calentador de agua y solo 3% tiene un calentador solar. Esta situación reduce en general la calidad de vida de estas personas, sobre todo en la temporada fría, dado que el gasto más alto en energía es el de adquisición de gas, por lo que deben ajustar sus actividades o usar herramientas rudimentarias para su aseo personal.

Esta investigación se enfocó en calcular los requerimientos energéticos relacionados al uso de aire acondicionado para enfriamiento y calefacción y al calentamiento de agua, en una vivienda económica construida en cuatro ciudades con distintos climas (tropical, desértico, templado semiárido y templado subhúmedo). El objetivo de este análisis fue el de cuantificar las facturas mensuales a pagar por estos servicios energéticos y el impacto que tienen sobre el presupuesto familiar.

2. Métodos

Se realizaron simulaciones de forma horaria durante un año típico meteorológico de una vivienda tipo, para cuatro ciudades mexicanas ubicadas en distintas regiones climáticas, con el programa Energy Plus a través de la interfaz Design Builder v4.7. EnergyPlus es un programa de simulación energética para realizar análisis energético y estimación de cargas térmicas en las edificaciones (U.S. Department of Energy's - DOE y National Renewable Energy Laboratory - NREL). Este programa permite la modelación de la edificación en tres dimensiones, la implementación de los sistemas constructivos y sus propiedades, el horario e intensidad de ocupación, así como la incorporación de las características de los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). A través del programa se realiza la simulación energética a través de balances de energía entre el ambiente interior de la edificación y las condiciones meteorológicas exteriores en periodos horarios.

La vivienda analizada se encuentra orientada hacia el sur y está construida con sistemas constructivos y materiales genéricos como lo son el bloque de concreto, losa de vigueta-bovedilla y ventanas de aluminio con cristal sencillo. En la modelación se consideró que la vivienda tiene dos casas contiguas, una de cada lado, para representar adecuadamente el adosamiento de la vivienda estudiada. En la Figura 1 se observa la fachada y el plano de distribución de la vivienda, que consta de dos recámaras, un baño, un área que funge como cocina-sala y un patio de servicio interior. La casa tiene una altura de piso a techo de 2.95 m y tiene 51.25 m² de construcción, de los cuales 47.6 m² son de área a climatizar y tiene un volumen de aire para acondicionar de 118.9 m³.



Figura 1. Fachada y plano de vivienda estudiada (INMUVI-Durango).

De acuerdo a la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en la Vivienda (ENCEVI) del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), únicamente el 5% de las viviendas en México tienen al menos un tipo de aislante térmico, siendo Sonora el estado con mayor número de viviendas aisladas (395,534 viviendas) y Tlaxcala con el menor (2,646 viviendas). El 14.9% de las viviendas en la región cálida extrema y el 1.5% de las viviendas en las regiones templada y tropical cuentan con aislamiento térmico en algún elemento de la vivienda (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). En la encuesta se desagrega la información de la región cálida extrema, donde se encontró que, de las viviendas aisladas, el 89.6% de la vivienda tiene techos aislados, por lo que la cubierta o losa

considerada fue aligerada compuesta de vigueta y bovedilla; mientras que el suelo de la vivienda es de concreto y piso cerámico directamente sobre el terreno.

En la Tabla 1 se muestran los materiales que conforman los sistemas constructivos de muros, techo, piso y ventanas, su espesor y el coeficiente total de transferencia de calor (Valor U). Se observa que los muros de la vivienda son de bloque de concreto sin aislar. La vivienda tiene cinco ventanas hacia el exterior, las cuales son de cristal claro con marco de aluminio, también cuenta con dos ventanas hacia el patio interior; en total la vivienda tiene 8.26 m² de área acristalada. Mientras que cuenta con dos puertas de tipo tambor de madera hacia el exterior (3.2 m²) y tres puertas interiores.

Tabla 1. Información de los sistemas constructivos de la vivienda.

Sistema	Materiales	Espesor total (m)	Valor U (W/m ² ·K)
Muros exteriores	Pintura blanca Enjarre de mortero Bloque de concreto Yeso	0.2464	2.076
Muros interiores	Bloque de concreto	0.2000	1.663

Techo	Concreto Vigueta pretensada y bovedilla Yeso	0.2450	0.875
Suelo	Piso cerámico Concreto Tierra	0.4000	1.814
Ventanas	Cristal claro	0.0030	6.257 *SHGC= 0.858
Puertas	Puerta de madera tipo tambor	0.0350	0.7800

*SHGC: Coeficiente de Ganancia de Calor Solar (Solar Heat Gain Coefficient).

2.1.Clima y uso de energía

La vivienda está habitada por una familia de cuatro personas que salen durante el horario laboral y escolar. Esta ocupación se consideró como típica debido a que, de acuerdo a INEGI, las viviendas mexicanas se habitan en promedio por 3.6 personas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020).

Se consideraron cuatro escenarios de ocupación y uso de los sistemas de climatización para las viviendas: (1) sin equipo de climatización, (2) climatización 24 horas continuas, (3) climatización durante su ocupación y (4) climatización durante ciertos periodos de ocupación. El primer escenario se utiliza para determinar las temperaturas interiores en el caso de que la vivienda no posea equipo de climatización o no lo encienda. El segundo escenario se utiliza para conocer el requerimiento energético de la vivienda bajo el uso automático del sistema de climatización, en el supuesto de que la vivienda se encuentra habitada por alguna persona que permanezca continuamente en el hogar (adultos mayores, bebés e infantes o alguna persona que haga labores del hogar) o como en el caso de confinamiento por la COVID-19. Mientras que para el escenario

(3) se consideró un uso de los sistemas de climatización durante el tiempo que la vivienda se habita (lunes a viernes de 18:00 h a 8:30 h y durante el fin de semana las 24 horas). Finalmente, el escenario (4) considera que los sistemas se apagan durante la noche al dormir, por lo que operan de lunes a viernes de 7:00 h a 8:30 h y de 18:00 h a 23:00 h y el fin de semana de 7:00 h a 23:00 h (Urban & Gomez, 2013).

También se consideró que las personas que habitan la vivienda se encuentran realizando una actividad de pie de forma relajada, equivalente a 1.0 Met¹, con una vestimenta de 1.0 Clo en invierno y de 0.5 Clo en verano². La vivienda cuenta con iluminación y equipamiento con electrodomésticos básicos, cuyo consumo mensual es de 100 kWh; este se considera como base para el cálculo de los requerimientos energéticos mensuales (Lucero-Álvarez, Rodríguez-Muñoz, & Martín-Domínguez, 2016).

La temperatura de la vivienda se mantiene dentro del rango de temperaturas que brinda confort térmico durante su ocupación, dependiendo de las características meteorológicas de la región climática en la

¹ El metabolismo de una persona es medido usando las unidades Met. Se considera que una persona en confort térmico con una actividad de un Met presentará una pérdida de calor de 100 W.

² Un Clo representa a la ropa que tiene una resistencia térmica de 0.155 m² °C/W; donde un Clo de cero simboliza a una persona desnuda mientras que un Clo de 1.0 representa un traje de oficina.

cual se encuentra la ciudad. En la Tabla 2, se presenta el tipo de clima que presentan las ciudades objeto de estudio y el rango de temperaturas dentro del cual se mantiene un confort térmico adecuado; asimismo, estas temperaturas se utilizan para el

establecimiento de los termostatos que encienden y apagan los sistemas de climatización. En la misma tabla se menciona la clasificación climática a la que pertenecen las ciudades de acuerdo al sistema Köppen-Geiger y a la utilizada por INEGI.

Tabla 2. Tipo de clima y cálculo de rango de confort térmico para cada ciudad.

Ciudad	Tipo de clima		T_{ma}	T_c	ΔT_c	Temperaturas para termostatos (°C)	
	Köppen-Geiger *	INEGI †	°C			T_{c-min}	T_{c-max}
Cancún, Q.R.	Aw - tropical	Cálido subhúmedo	26.00	27.54	4.50	25.29	29.79
Hermosillo, Son.	BWh - árido cálido	Seco cálido muy seco	24.20	26.57	4.50	24.32	28.82
Durango, Dgo.	BSk - semiárido frío	Seco templado y semifríos semisecos	18.70	23.60	4.00	21.60	25.60
Puebla, Pue.	Cwb - templado de montaña con invierno seco	Templado subhúmedo	16.70	22.52	4.00	20.52	24.52

Fuentes: *(Climate-Data.org, 2022), † (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2022).

El concepto de confort térmico se refiere a la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico circundante, es evaluada a través de una valoración subjetiva y se determina considerando condiciones psicológicas, fisiológicas y ambientales (ANSI/ASHRAE, 2013).

Las personas que viven en climas cálidos y tropicales, necesitan una variedad diferente de condiciones de confort térmico que las personas en climas templados. Asimismo, las personas que viven permanentemente en espacios acondicionados tienen una banda más estrecha de comodidad, en comparación con personas que habitan en edificios naturalmente ventilados. Esto es, las personas tienen distintas expectativas de las condiciones térmicas dependiendo donde se

encuentren. Por otro lado, la teoría del confort térmico adaptativo indica que el confort térmico depende de las condiciones exteriores históricas y de la capacidad de la persona para controlar el entorno. Esta teoría sugiere que los humanos son capaces de adaptarse a una gama amplia de condiciones térmicas, lo cual tiene un impacto importante en las condiciones de confort de los edificios esperadas (uso de termostatos) y, por lo tanto, del consumo de energía (Alliance for an Energy Efficient Economy AEEE, 2020).

Las temperaturas de confort térmico mínimas y máximas fueron calculadas con el método adaptativo de Humphreys y Nicol utilizando la ecuación (1) para calcular la temperatura de confort mensual (T_c), mientras que con las ecuaciones (2) y (3) se calcularon las

temperaturas mínimas y máximas (Nicol & Humphreys, 2002). Este método de confort térmico se ideó para introducir nociones de sustentabilidad a los estándares de confort, en contraste con los índices racionales tradicionalmente utilizados. Ya que todas las personas, conscientemente o inconscientemente, nos adaptamos constantemente a las condiciones climáticas cambiantes de nuestro planeta.

$$T_c = 13.5 + 0.54T_{ma} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$T_{c-\min} = T_c - \Delta T_c / 2 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$T_{c-\max} = T_c + \Delta T_c / 2 \quad (\text{Ec. 3})$$

Para esta investigación se calculó la temperatura exterior media mensual (T_{ma}) a través de información climática de cada ciudad obtenida del programa Meteonorm versión 7.3. Mientras que, con la amplitud de la oscilación promedio de la temperatura del

aire (ΔT_a), se identificó la amplitud de la zona de confort (ΔT_c) (Barrios, Guillermo, Elías, Pablo, Huelsz, Guadalupe, Rojas, 2010). Las ciudades estudiadas se encuentran en cuatro clasificaciones climáticas distintas (tropical, desierto, semiárida templada y templada subhúmeda), por lo que la temperatura de confort (T_c) para cada una de ellas varía con la temperatura ambiental.

En la Figura 2 se muestra la información de las variables climáticas promedio mensual de las ciudades analizadas, aquí se observan las diferencias particulares a las cuales se exponen las personas que habitan las viviendas en estas localidades. Se presentan la temperatura promedio (T_a), temperatura mínima ($T_{a-\min}$), temperatura máxima ($T_{a-\max}$) y la humedad relativa promedio mensual (RH).

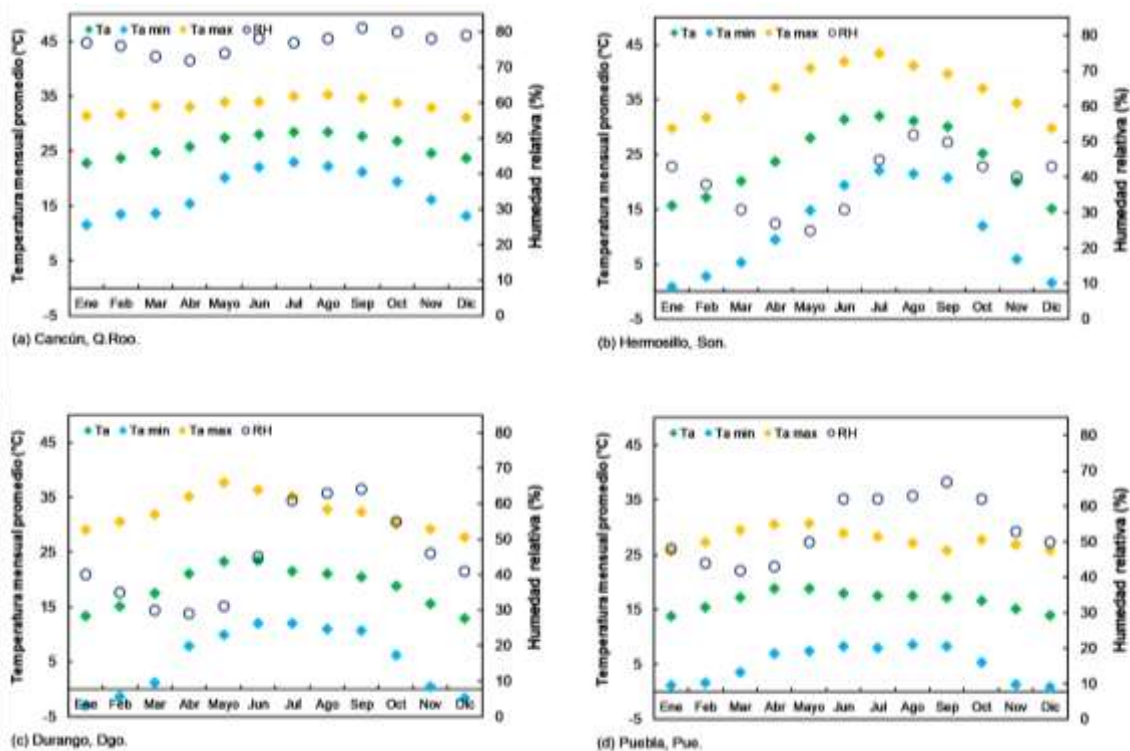


Figura 2. Temperaturas mensuales promedio y humedad relativa.

El equipamiento utilizado para mantener el confort térmico en la vivienda fue de sistemas de aire acondicionado y calefacción clase “D”; el cual corresponde a una escala media entre lo que se consideraría un equipo muy eficiente y uno poco eficiente. El equipo para enfriamiento es de tipo minisplit con un Coeficiente de Eficiencia Energética (EER: Energy Efficiency Ratio) de 1.8. Mientras que para el calentamiento de las viviendas durante los meses fríos se utiliza un sistema de calefacción tipo radiante-convectivo que utiliza gas L.P. con un COP de 2.35. También se incorporó un calentador de agua a gas con depósito de 40 L, el cual es utilizado en el 47% de las viviendas del país que cuentan con algún equipo de calentamiento de agua (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018). En este caso, se consideró que la eficiencia del calentador es del 74% (Diario Oficial de la Federación, 2021), y las cuatro personas se duchan diariamente (ocho minutos por ducha) una tras otra, es decir, en un solo periodo continuo cada día, a una temperatura media de 38 °C, con una

regadera que tiene un gasto de 7 l/min (Diario Oficial de la Federación, 1998).

El gasto energético diario (Q_r) por uso del calentador de agua de depósito a gas se determinó a partir de la ecuación (4), en donde el primer término representa el calor necesario para calentar el agua confinada desde la temperatura de la red local hasta 15 °C por arriba de la requerida para lograr la salida de la regadera a 38 °C, mientras el resto de los términos contabilizan el calor necesario para mantenerla durante la extracción de agua caliente. Es importante puntualizar que se consideró que no se requiere encender el calentador de agua en aquellos días que la temperatura interior de la vivienda es superior a 30 °C. En la Tabla 3 se muestran los datos de la temperatura promedio del agua de la red local, tomados del Sistema Meteorológico Nacional, y que corresponden a la temperatura media normal mensual en 2021 (SMN - CONAGUA, 2022), así como la fracción de días que se requiere encender el calentador de agua.

$$Q_r = \frac{M_d(h_d - h_a) + 4[(\dot{m}_s h_s - \dot{m}_a h_a)\Delta t - M_d C_p \Delta T_d]}{\eta_{FP}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde M_d es la masa de agua dentro del depósito del calentador, $\dot{m}_s$ y $\dot{m}_a$ son los flujos máscicos de salida de agua caliente y de entrada de agua fría al calentador, respectivamente; h_d , h_s y h_a son las entalpías del agua confinada, la que se extrae y la que

ingresa en el depósito una vez que se inicia la extracción, Δt es el periodo que dura cada ducha, ΔT_d es la reducción de temperatura del agua confinada durante la extracción, η es la eficiencia del calentador y FP es un factor de corrección de presión por la altitud del lugar.

Tabla 3. Temperatura del agua de la red local y fracción de días con calentador encendido para cada ciudad.

Mes	Cancún, Q.R.		Hermosillo, Son.		Durango, Dgo.		Puebla, Pue.	
	T_a (°C)	f (-)	T_a (°C)	f (-)	T_a (°C)	f (-)	T_a (°C)	f (-)
Enero	25.8	1.000	17.3	1.000	12.6	1.000	15.9	1.000
Febrero	26.5	1.000	19.0	1.000	16.8	1.000	16.5	1.000
Marzo	28.4	0.997	20.5	1.000	18.8	1.000	19.5	1.000

Abril	30.0	0.932	26.0	0.961	21.1	1.000	20.5	1.000
Mayo	31.0	0.824	28.8	0.906	23.5	0.828	20.3	1.000
Junio	30.5	0.717	33.1	0.518	23.6	0.940	18.9	1.000
Julio	31.4	0.638	32.3	0.614	21.4	1.000	18.9	1.000
Agosto	31.0	0.674	32.1	0.818	22.1	1.000	18.9	1.000
Septiembre	30.6	0.786	30.2	0.893	21.1	1.000	18.5	1.000
Octubre	29.9	0.885	26.6	1.000	19.9	1.000	18.3	1.000
Noviembre	26.3	0.997	24.8	1.000	16.1	1.000	15.5	1.000
Diciembre	27.0	1.000	19.4	1.000	15.7	1.000	15.9	1.000

2.2. Costos de la energía

En la Tabla 4 se presentan los precios promedio de la electricidad y la tarifa de electricidad doméstica correspondiente a cada ciudad (Morales, 2022), sin embargo, los precios utilizados para los cálculos fueron

los correspondientes al año 2021, de los cuales se puede consultar el detalle mensual en el portal de tarifas de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) para las cuatro ciudades estudiadas (Comisión Federal de Electricidad, 2022).

Tabla 4. Tarifa de electricidad por ciudad.

Ciudad	Tarifa	Rango de consumo (kWh) Precio promedio (\$/kWh)			
		Básico	Intermedio bajo	Intermedio alto	Excedente
Durango, Dgo. y Puebla, Pue.	1	0-75 0.882	76-140 1.073	-	141 en adelante 3.134
Cancún, Q.R.	1D	0-75* 0-175† 0.786	76-200* 176-400† 0.911	- 401-600† 1.177	201 en adelante* 601 en adelante† 3.134
Hermosillo, Son.	1F	0-75* 0-300† 0.653	76-200* 301-1200† 0.815	- 1201-2500† 1.062	201 en adelante* 2501 en adelante† 3.134

* fuera de verano, † verano.

Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2022; Morales, 2022).

A las ciudades de Durango y Puebla les corresponde la tarifa 1, la cual es implementada en lugares con temperaturas promedio anual de menos de 25 °C, con un límite de 140 kWh de consumo mensual antes de tener un consumo excedente y pagar un precio más elevado. Por otro lado, las otras dos ciudades se encuentran dentro de tarifas de electricidad 1D (Cancún, Q.R.) y 1F (Hermosillo, Son.), con límites de consumo de 1,200 kWh y 2,500 kWh al mes para evitar tener un consumo excedente. La tarifa 1 no diferencia la temporada de invierno o verano, por lo que aplican los mismos precios durante todo el año, mientras que para las tarifas 1C, 1D, 1E y 1F se tiene distinción en el rango de consumo mensual, dependiendo de si la localidad se encuentra en la temporada de verano o fuera de verano. Es importante mencionar que, de acuerdo a información de la CFE, se estima que al 26% de los usuarios domésticos se les aplican las tarifas 1C a 1F, que son las que se encuentran con mayor subsidio debido al alto requerimiento de electricidad para enfriamiento durante la época de verano (Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE, 2017).

Con respecto al gas LP, se consideró el precio promedio por cada litro consumido, reportado por los distribuidores al 28 de febrero de 2022: \$12.13, \$12.69, \$13.64 y \$12.37, para Quintana Roo, Sonora, Durango y Puebla, respectivamente (CRE Comisión Reguladora de Energía, 2022).

3. Resultados

A través de la realización de las simulaciones en las ciudades estudiadas, se obtuvo información sobre las temperaturas al interior de la vivienda sin la utilización de sistemas de climatización. Dentro de las suposiciones se establecieron cuatro escenarios de ocupación: (1) la vivienda no cuenta con equipo de climatización, (2) la vivienda se mantiene climatizada las 24 horas, (3) la vivienda se

climatiza durante su ocupación y (4) la vivienda se climatiza durante ciertos periodos. Se calculó el requerimiento energético para mantener el confort térmico y para calentar agua sanitaria en un hogar habitado por cuatro personas. Finalmente, se cuantificó el desembolso mensual y anual asociado al uso de los energéticos relacionados a la conservación del confort térmico en la vivienda y a la satisfacción de la necesidad de aseo con agua caliente.

3.1. Temperaturas en el interior de la vivienda

En la Figura 3 se muestran las temperaturas promedio horarias que se alcanzan en el interior de las viviendas. Estas temperaturas son las resultantes debidas a la interacción de la envolvente térmica de la vivienda con el clima existente en cada una de las ciudades estudiadas. Se considera que en los momentos en los que las temperaturas interiores no entren en el rango de las temperaturas de confort se deberá utilizar algún equipo de enfriamiento o calentamiento para mantener el confort térmico en el interior de la vivienda.

En la Figura 3 también se incorporó la temperatura exterior o ambiental (línea punteada) y se muestran los límites de confort máximo en amarillo (T_{c-max}) y mínimo en azul (T_{c-min}), los cuales varían de acuerdo a las condiciones climáticas prevalentes en cada localidad. Estas temperaturas fueron calculadas con las ecuaciones (1), (2) y (3) y se muestra el detalle para cada ciudad en la Tabla 2. En la ciudad de clima tropical (Cancún), se tuvo una temperatura interior máxima ($T_{int-max}$) de 32.4 °C y una temperatura interior mínima ($T_{int-min}$) de 21.6 °C. En la ciudad de clima árido cálido (Hermosillo), se observaron temperaturas interiores $T_{int-max}$ de 33.5 °C y $T_{int-min}$ de 11.6 °C, mientras que en la ciudad con clima semiárido frío (Durango) fueron $T_{int-max}$ de

31.0 °C y hasta de $T_{\text{int-min}}$ de 13.0 °C. Finalmente, en la ciudad de clima templado

(Puebla), se alcanzó una $T_{\text{int-max}}$ de 27.5 °C y una $T_{\text{int-min}}$ de 17.0 °C.

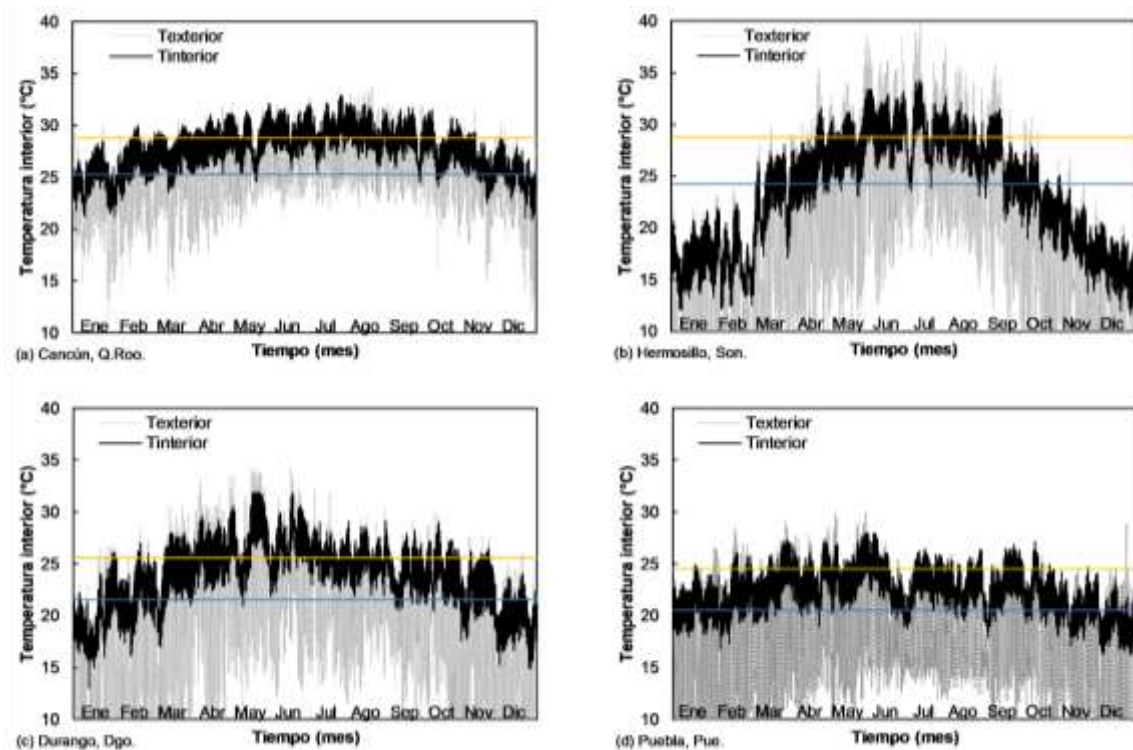


Figura 3. Temperatura ambiental de la ciudad y temperatura interior de la vivienda sin utilización de sistemas de climatización - escenario 1.

3.2. Energía

En la Figura 4, se muestra el requerimiento anual de energía para mantener el confort térmico (enfriar y calentar la vivienda), y para proporcionar agua caliente en una vivienda habitada por cuatro personas. Se presentan los resultados para los escenarios de ocupación utilizando sistemas de climatización (escenarios 2, 3 y 4) para cada localidad estudiada.

En la Figura 4, se destaca el alto uso de energía en el escenario (2), ya que es el caso cuando se climatiza la vivienda durante 24 horas, lo cual no es el patrón de uso más frecuente; sin embargo, se calculó por ser una situación acontecida durante el confinamiento inicial por la COVID-19. En los resultados también se puede observar que

sobresale el uso predominante de sistemas de enfriamiento para el clima tropical (Cancún), donde el 90% del requerimiento energético anual es para confort térmico (enfriamiento + calefacción). También se distingue el requerimiento energético para confort térmico en la ciudad con clima árido cálido (Hermosillo), el cual puede alcanzar los 6,984 kWh al año (147 kWh/m²). Mientras que en Durango y Puebla se observa una proporción similar en el requerimiento de energía para confort térmico, donde tienen un promedio de uso anual de los sistemas de calefacción del 27% y 32%, respectivamente. Sin embargo, hay diferencia en los requerimientos máximos anuales para confort térmico, ya que para Durango alcanza los 126 kWh/m² y para Puebla es solo de 85 kWh/m². Sin embargo, adicionando los requerimientos para el calentamiento de agua,

el consumo energético total anual sube hasta 114 kWh/m² para Cancún, 160 kWh/m² en Puebla, 204 kWh/m² en Durango y 204 kWh/m² en Hermosillo.

Con respecto al requerimiento energético total anual (calentamiento de agua + confort térmico), se tuvieron requerimientos de 97 kWh/m² y 95 kWh/m² en Cancún, 133 kWh/m² y 121 kWh/m² en Puebla, 163 kWh/m² y 145 kWh/m² en Durango, y 163 kWh/m² y 135 kWh/m² en Hermosillo, para los escenarios 3 y 4, respectivamente. Mientras que, los requerimientos anuales para satisfacer el confort térmico en la vivienda cuando ésta es climatizada solo durante su ocupación, se tuvieron requerimientos de 46 kWh/m² y 44 kWh/m² en Cancún, 58 kWh/m² y 46 kWh/m² en Puebla, 84 kWh/m² y 67 kWh/m² en Durango, y 106 kWh/m² y 76 kWh/m² en Hermosillo, para los escenarios 3 y 4, respectivamente,

siendo el escenario 4 donde se hace un uso moderado o ahorrador de energía.

Es importante mencionar que los requerimientos energéticos de confort térmico calculados están ligados a las temperaturas de confort (T_c) que se establecieron para cada clima. Esto explica, por ejemplo, el alto uso de energía para calefacción en el clima árido cálido (Hermosillo), lo que no está asociado a la incidencia de temperaturas extremadamente bajas sino con la prevalencia de temperaturas por debajo de los 24.32 °C (T_{c-min}), temperatura a la cual se enciende el sistema de calefacción. Mientras que, para Durango y Puebla, ciudades de clima frío y templado, se tiene un requerimiento relativamente alto de energía para enfriar los hogares, debido a que los sistemas de aire acondicionado se encienden a partir de los 25.6 °C y 24.52 °C, respectivamente (T_{c-max}).

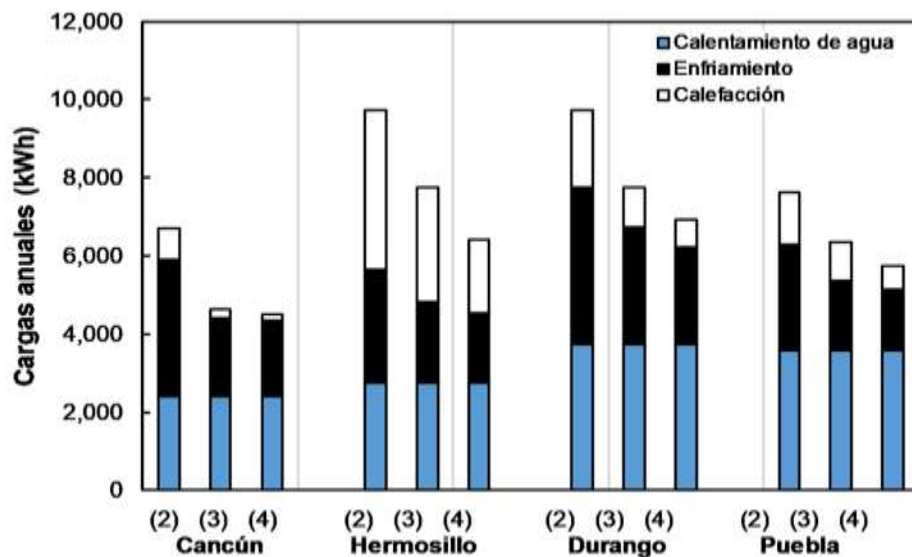


Figura 4. Requerimiento anual de energía para climatización y calentamiento de agua.

Con respecto al calentamiento de agua, se observa que en Puebla y Durango se requeriría la mayor cantidad de energía para satisfacer la necesidad de bañarse con agua caliente. Esto es consistente con el hecho de que en ambas localidades se tienen las

menores temperaturas del agua de la red local y se requiere usar el calentador prácticamente todo el año para tener una temperatura adecuada del agua de regadera. Por otro lado, la ciudad que requiere menos energía de forma anual es Cancún, ya que tiene una

temperatura consistentemente alta del agua de la red local durante todo el año.

3.3. Costos asociados a la energía.

En las Figuras 5 y 6 se muestran los desembolsos mensual y anual que tendría cada hogar para el escenario 4. Este escenario sucede cuando los sistemas de climatización se usan durante la ocupación de la vivienda, pero son apagados durante la noche; el cual se considera como un escenario de uso *moderado o ahorrador* de los sistemas de climatización. Las facturas se separaron en dos rubros, el primero es para el pago de gas que se utiliza para el sistema de calefacción y el calentamiento del agua sanitaria; mientras que el otro gasto es para el pago de electricidad para el sistema de enfriamiento y el consumo base por electrodomésticos.

En la Figura 5 se pueden observar las facturas de energía que tendrían que ser cubiertas por las familias de manera mensual. De manera general, se visualiza claramente el impacto

estacional en las facturas mensuales de gas L.P., el cual es más marcado para los climas secos (Hermosillo y Durango). También se puede observar el desembolso asociado al pago de gas L.P. en todas las ciudades de estudio, incluso para el clima tropical (Cancún), donde se utiliza predominantemente para calentar el agua. Con respecto a las facturas de electricidad, se observa que estas son mayores para las ciudades de climas templados (Durango y Puebla), lo cual está asociado al precio de la energía en la tarifa 1 de electricidad. Por último, se observa un incremento de las facturas de electricidad en Hermosillo, ciudad que cuenta con el clima con prevalencia de temperaturas muy altas durante la temporada de verano. En Cancún se observan facturas sostenidamente altas durante la mayor parte del año, pero son especialmente altas durante los meses frescos; situación que está asociada a la tarifa de electricidad de la localidad, la cual es más alta durante los meses que se encuentran fuera de verano.

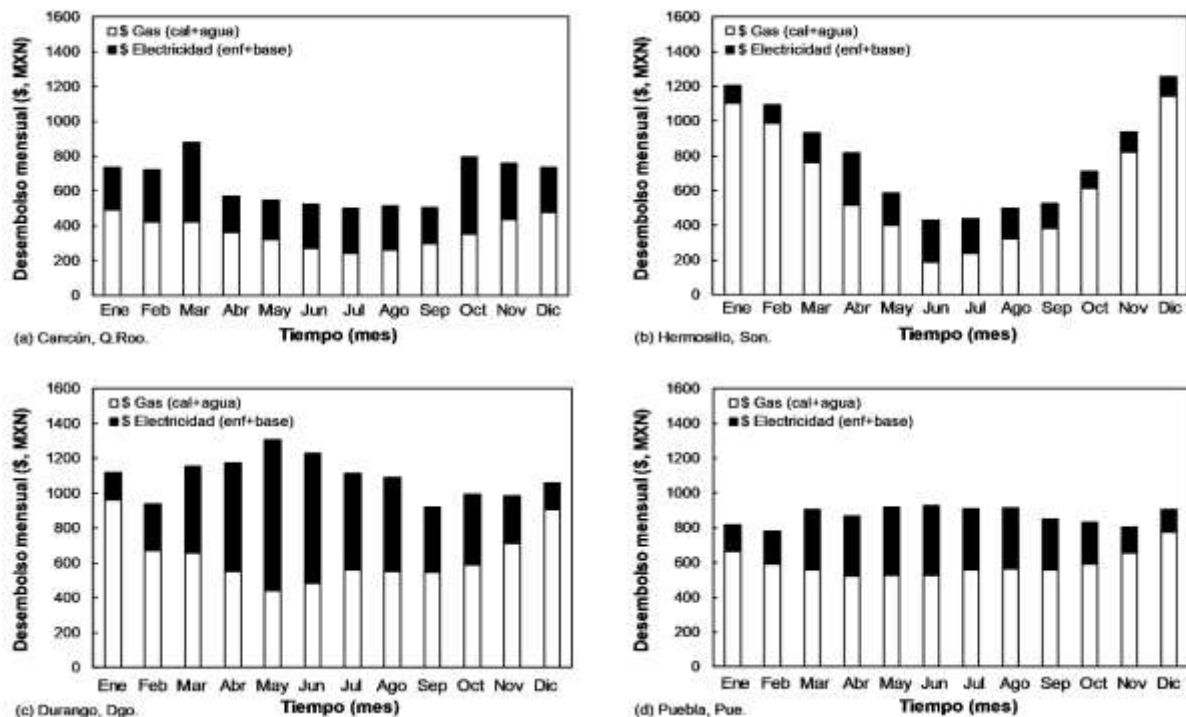


Figura 5. Desembolso mensual por climatización y uso de gas L.P. para calentamiento de agua - escenario 4.

En la Figura 6 se muestran los desembolsos anuales de energía para los escenarios (2), (3) y (4). En la Figura 6a se visualiza el desembolso que se hace para calentar el agua y para el confort térmico (calefacción y enfriamiento); mientras que en la Figura 6b se desglosó en forma de facturas anuales de energía por gas L.P. y electricidad. En la Figura 6a, para el escenario (4) se observa que, si se separa el desembolso realizado por las familias para pagar el agua caliente, en Cancún esto representa un 55% del total (calentamiento de agua + confort térmico), en

Hermosillo 60%, en Durango 57% y en Puebla 65%. Otra forma de visualizar esta información es separando el desembolso realizado por las familias para pagar por la electricidad (enfriamiento) contra el gasto por gas L.P. (agua y calefacción), con lo cual en Cancún representaría el 43% del presupuesto anual, en Hermosillo representa el 21%, en Durango 38% y en Puebla el 30%. Siendo todos los porcentajes presentados, resultados correspondientes al escenario (4), donde se modeló un uso *moderado o ahorrador* de los sistemas de climatización.

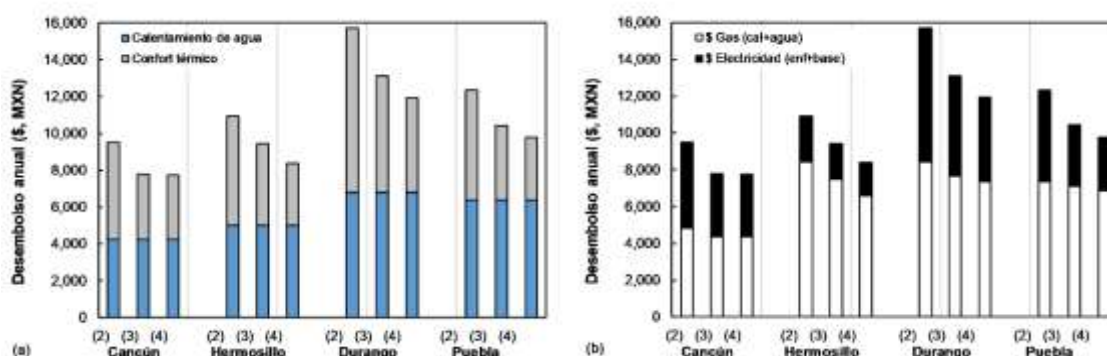


Figura 6. Desembolso anual por energía. (a) Gas y electricidad, (b) Calentamiento de agua y confort térmico.

4. Discusión

En los resultados se observaron temperaturas máximas en el interior de las viviendas superiores a los 30 °C en todas las ciudades excepto en la ciudad con clima templado subhúmedo (Puebla). El conocimiento de las temperaturas interiores máximas alcanzadas es relevante ya que estas permiten alertar sobre potenciales riesgos a la salud de los ocupantes de la vivienda. En un estudio realizado en una ciudad con clima templado húmedo (Cfb, oceánico), se encontró que, con el aumento de cada 1°C en la temperatura ambiente interior, después de los 29 °C, se podría duplicar el riesgo de muerte de sectores vulnerables como los adultos mayores de 65 años y los infantes pequeños (Buchin, Hoelscher, Meier, Nehls, & Ziegler, 2016). Sin embargo, la Organización

Mundial de la Salud recomienda observar con cautela estas cifras, ya que las personas que viven en regiones con climas templados pudieran ser más propensas a verse afectadas por las altas temperaturas y, en contraste, las personas que viven en ciudades con climas cálidos pueden tener una adaptación fisiológica debida a la exposición excesiva al calor (World Health Organization, 2018).

Por otro lado, con respecto a las temperaturas mínimas, en todas las ciudades, con excepción de la que tiene clima tropical (Cancún), se tuvieron temperaturas interiores por debajo de 18 °C, lo cual representa el límite inferior de posibles riesgos a la salud, dado que para personas de la tercera edad e infantes se deberían mantener temperaturas

entre 2 °C y 3 °C por arriba de este límite (Collins, 1986).

Con respecto a la climatización (enfriamiento y calefacción), la ciudad con mayor requerimiento energético anual es Hermosillo con 146 kWh/m², la cual tiene un clima árido cálido y presenta extremos de consumo tanto para enfriamiento como para calefacción. Cancún, con un clima tropical, necesitaría 90 kWh/m² anuales, de los cuales alrededor del 90% son dedicados al enfriamiento de los espacios interiores. Finalmente, en las ciudades con climas templados (Durango y Puebla) se requerirían 126 kWh/m² y 85 kWh/m² anuales, respectivamente. Estas tendencias se repiten para todos los escenarios estudiados.

Es importante mencionar que se observó un requerimiento energético anual sobresaliente para la ciudad de Hermosillo, lo cual está relacionado con el tipo de clima que se tiene en esta ciudad, con prevalencia de temperaturas extremas. De manera esperada, se obtuvo un requerimiento energético alto para enfriar la vivienda; sin embargo, también el requerimiento energético para calentar la vivienda fue elevado. Cabe señalar que, con la intención de considerar de mejor manera las sensaciones de las personas de acuerdo al clima que habitan, se aplicó un modelo de confort térmico adaptativo. Para ello, se tomaron en cuenta las temperaturas ambientales mensuales promedio y la amplitud de la oscilación promedio de la temperatura del aire, con el fin de identificar la amplitud de la zona de confort (ΔT_c). Esto trajo como resultado una ΔT_c de 4.0 °C para las ciudades templadas (Durango y Puebla) y de 4.5 °C para las cálidas (Hermosillo y Cancún). Estos parámetros permiten representar de mejor manera las sensaciones de confort térmico de los usuarios que habitan en distintas regiones climáticas. De esta manera, Hermosillo, al

tener un clima extremoso y una T_{c-min} alta (24.32 °C), reportó un requerimiento energético global que pudiera considerarse elevado. Sin embargo, este requerimiento elevado está asociado a la necesidad de calentar los espacios de la vivienda que se encuentren por debajo de esta temperatura.

En cuanto al requerimiento energético anual para el calentamiento de agua sanitaria, con el fin de cubrir las necesidades de una familia con cuatro integrantes, este varía desde 2,417 kWh en Cancún, hasta 3,734 kWh en Durango. Es de resaltar que en todas las localidades analizadas se necesita calentamiento de agua durante todo el año, contrario a lo que sucede con la necesidad de usar equipamiento para mantener el confort térmico, donde su uso es estacional.

Se observó que en el escenario de uso *moderado o ahorrador* se tendría un gasto mensual promedio por energéticos (electricidad y gas) de \$640 en Cancún (\$1,920 trimestral), en Hermosillo de \$652 (\$1,956 trimestral), en Durango \$978 (\$2,934 trimestral) y en Puebla de \$800 (\$2,400 trimestral). Según la ENIGH, el gasto corriente promedio mensual para el rubro de electricidad y combustibles en los hogares es de \$500 (\$1,501 trimestral) (INEGI-Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2021). Los valores obtenidos en este estudio son superiores a lo estimado por la ENIGH, recordando que existe una variación considerable en el gasto dedicado a energéticos de acuerdo al decil al que pertenezca el hogar y al clima en el cual se habite. Así, una familia en el decil I ubicada en Cancún debería desembolsar el 17% de sus ingresos para cubrir los gastos por los energéticos incluidos en este estudio, mientras que, si se ubica en Durango, la proporción aumenta al 26%.

Dados los desembolsos por electricidad y gas realizados por las familias, es de esperar que

en estos hogares se tomen medidas de privación energética para poder dar prioridad a otros gastos como la alimentación y el transporte. Es importante señalar que el porcentaje de aumento anual de energéticos como el gas L.P. y la electricidad en los últimos cinco años (2017-2022) han sido en promedio de 11.8% y 2.8%, respectivamente; en tanto que estas variaciones durante el último año (2021-2022) alcanzaron un 22% para el gas L.P. y 5% para la electricidad (Banxico, 2022). Y aunque a nivel nacional se reporta un índice de pobreza energética en el hogar de 36.7% (33% para confort térmico y 8.7% en calentamiento de agua), de manera desagregada, Puebla tiene un índice estatal de pobreza energética del 51%, Quintana Roo del 40.2%, Durango del 35% y Sonora del 26.7% (García-Ochoa & Graizbord, 2016a). Este índice está ligado al nivel de rezago social de las entidades, pero también a la imposibilidad de pagar por los energéticos requeridos para satisfacer necesidades energéticas como el confort térmico, calentamiento de agua, tener refrigerador eficiente e iluminación, por mencionar algunas. Asimismo, en un estudio realizado en Argentina se encontró que el equipo de enfriamiento se tiende a subutilizar debido a factores económicos (Flores-Larsen, Silvana, Filippín, 2021). Por otro lado, es fundamental tener en consideración que en México la electricidad en el sector doméstico se encuentra subsidiada; y, que estos índices también pueden reflejar que el acceso a algunos servicios energéticos es limitado (Santillán, Cedano, & Martínez, 2020).

5. Conclusiones

Se realizó una investigación para identificar el requerimiento energético de viviendas localizadas en diversos climas en México con la finalidad de cuantificar el gasto en el hogar por el pago de energía eléctrica y gas L.P. asociado a la conservación del confort

térmico y para el calentamiento de agua sanitaria.

De manera general, los resultados indican que en las cuatro ciudades estudiadas se tiene un gasto importante por concepto del uso de gas L.P., llegando a destinarse entre el 55% y el 66% del desembolso total de energía para el calentamiento de agua. Por otro lado, el gasto en electricidad destinada al uso de los sistemas de aire acondicionado para enfriamiento representa entre el 23% y el 44% del total erogado por concepto del mantenimiento del confort térmico y para el calentamiento de agua sanitaria.

Adicionalmente, al considerar las facturas de energía a pagar por las familias fue posible observar el impacto estacional en los pagos mensuales de gas L.P. Esta estacionalidad es más pronunciada en las ciudades con climas secos (Hermosillo y Durango), mientras que para las ciudades ubicadas en climas húmedos (Cancún y Puebla) la estacionalidad es más suavizada. Al analizar los desembolsos mensuales por concepto de electricidad se encontró que las ciudades en climas templados (Durango y Puebla) tienen facturas de electricidad más grandes que las de las ciudades con climas cálidos, lo cual está asociado a dos factores: (1) al precio alto de la energía en la tarifa de electricidad que les corresponde pagar, y (2) al elevado requerimiento energético asociado a las temperaturas bajas a las cuales se enciende el sistema de aire acondicionado.

Las limitaciones de este estudio indican que, aunque de manera cualitativa es posible identificar tendencias en los costos asociados al uso de energía para el confort y calentamiento de agua sanitaria en la vivienda construida en distintos climas, los resultados de esta investigación pudieran ser aplicables de forma cuantitativa únicamente en las ciudades que fueron objeto de este estudio. Esto está principalmente asociado a las

particularidades meteorológicas, como el comportamiento de las temperaturas promedio, mínimas y máximas, la humedad relativa, la precipitación y la radiación solar específicas de cada localidad. También se debe tomar en cuenta que en este estudio se fijaron ciertos parámetros para establecer las temperaturas de confort térmico, temperatura del agua caliente y periodos de aseo de los integrantes de las familias. Por lo que es importante tener en cuenta que existe una variabilidad significativa de los hábitos familiares y preferencias personales en cuanto a las temperaturas establecidas en los termostatos de los sistemas de enfriamiento, calefacción y para el calentamiento del agua sanitaria. Asimismo, además de las particularidades asociadas a los hábitos de cada persona, los modelos de confort térmico también están asociados a condiciones demográficas (p.ej. género, peso, edad), y a otros factores como el estado de salud y la vestimenta (Jiang, Wang, Lin, & Mumovic, 2020), lo que impacta en los resultados cuantitativos de la investigación.

No obstante, a través de esta investigación se aporta información para apoyar y clarificar la necesidad de mejorar el diseño de la envolvente de las viviendas y para reforzar la implementación de programas de energías renovables, como los enfocados en la instalación de calentadores solares; ya que del desembolso total que realizan las familias, el gasto para calentar el agua va desde el 55% en la ciudad de Cancún (clima tropical) hasta un 66% en Puebla (clima templado húmedo). Esto asumiendo que las familias cuentan con el equipamiento que les permita satisfacer todas sus necesidades energéticas.

Es importante la mejora continua en el diseño y construcción de la vivienda mexicana, la actualización de la normativa de eficiencia energética existente, así como el promover una mayor disponibilidad de equipamiento económico y eficiente para lograr satisfacer

las necesidades energéticas de las familias. Por último, a través de esta investigación se desea poner énfasis en el riesgo actual por la alta dependencia de energéticos como el gas para mantener el confort térmico en las ciudades de clima templado, igual que para el calentamiento de agua sanitaria en todas las ciudades estudiadas.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Instituto Municipal de Vivienda de Durango (INMUVI-Durango) por la información proporcionada.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno en la realización de la presente investigación.

6. Referencias

1. Global Alliance for Buildings and Construction GABC. (2020). 2020 Global status report for buildings and construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34572/GSR_ES.pdf
2. International Energy Agency IEA. (2021). Tracking Buildings 2021. <https://www.iea.org/reports/tracking-buildings-2021>
3. SENER. (2021). Balance Nacional de Energía 2020. Ciudad de México. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/707654/BALANCE_NACIONAL_ENERGIA_0403.pdf
4. SENER - CONUEE. (2018). Cuadernos de la Conuee. Número 1. Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2017 e impactos de ahorro de

- energía por políticas públicas. Ciudad de México.
<https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuadernoNo.1revision.pdf>
5. Morales-Ramírez, Dionicio, Alvarado-Lagunas, Elías, González Del Ángel, L. J. (2021). Disposición al ahorro de energía eléctrica en los hogares de México. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 36(2), 533–561.
<https://doi.org/https://doi.org/10.24201/edu.v36i2.2002>
 6. SEDATU - CONAVI. (2017). Código de Edificación de Vivienda. Ciudad de México.
<https://www.gob.mx/conavi/documentos/codigo-de-edificacion-de-vivienda-3ra-edicion-2017>
 7. Registro Único de Vivienda (RUV). (2022). Informe estratégico RUV. Ciudad de México.
<http://portal.ruv.org.mx/wp-content/uploads/2022/03/InformeEstrategicoRuvMar2022.pdf>
 8. ONU-Hábitat. (2019). Elementos de una vivienda adecuada.
<https://www.onuhabitat.org.mx/index.php/elementos-de-una-vivienda-adecuada>
 9. Berkowitz, Bill, Brownlee, T. (2022). Sección 2. Mejorar la calidad de la vivienda. Caja de Herramientas Comunitarias (Web, pp. 1–19). Kansas: Universidad de Kansas.
<https://ctb.ku.edu/es/tabla-de-contenidos/implementar/fisico-social-y-medio-ambiente/mejorar-la-calidad-de-la-vivienda/principal>
 10. INEGI -Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2021). ENIGH E 1-2020 Encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares estacional. Ciudad de México.
https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/enigh/est/2020/doc/enigh2020_est_presentacion_resultados.pdf
 11. Daniel Howdle - Cable.co.uk. (2022). The price of electricity per kWh in 230 countries.
<https://www.cable.co.uk/energy/worldwide-pricing/>
 12. Beltrán Nishizaki, E. (2020). Hacia una justicia energética en México. Un análisis del régimen tarifario del sector eléctrico colombiano y su posible implementación en la República Mexicana. *enerLAC Volumen IV. Número 2*. ISSN: 2602-8042. *Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*, 146–159. Quito, Ecuador. Retrieved from <http://enerlac.olade.org>
 13. Gopal, A. R., Leventis, G., Phadke, A., & de la Rue du Can, S. (2014). Self-financed efficiency incentives: case study of Mexico. *Energy Efficiency*, 7(5), 865–877.
<https://doi.org/10.1007/s12053-014-9263-9>
 14. García Ochoa, R., Avila-Ortega, D. I., & Cravioto, J. (2022). Energy services' access deprivation in Mexico: A geographic, climatic and social perspective. *Energy Policy*, 164(January).
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.112822>
 15. Rosas-Flores, J. A., & Gálvez, D. M. (2010). What goes up: Recent trends in Mexican residential energy use. *Energy*, 35(6), 2596–2602.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.01.015>

16. Hancevic, P. I., & Lopez-Aguilar, J. A. (2019). Energy efficiency programs in the context of increasing block tariffs: The case of residential electricity in Mexico. *Energy Policy*, 131(January), 320–331.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.015>
17. Rosas-Flores, J. A., & Rosas-Flores, D. (2020). Potential energy savings and mitigation of emissions by insulation for residential buildings in Mexico. *Energy and Buildings*, 209.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109698>
18. Oropeza-Pérez, I. (2016). Comparative economic assessment of the energy performance of air-conditioning within the Mexican residential sector. *Energy Reports*, 2, 147–154.
<https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.06.002>
19. Santillán, O. S., Cedano, K. G., & Martínez, M. (2020). Analysis of energy poverty in 7 Latin American countries using multidimensional energy poverty index. *Energies*, 13(7).
<https://doi.org/10.3390/en13071608>
20. García-Ochoa, R., & Graizbord, B. (2016a). Caracterización espacial de la pobreza energética en México. Un análisis a escala subnacional. *Economía Sociedad y Territorio*, 289.
<https://doi.org/10.22136/est002016465>
21. Rosas, J., Sheinbaum, C., & Morillón, D. (2010). The structure of household energy consumption and related CO2 emissions by income group in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 14(2), 127–133.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2010.04.002>
22. García Ochoa, R., & Graizbord B. (2016b). Privation of energy services in Mexican households: An alternative measure of energy poverty. *Energy Research and Social Science*, 18, 36–49.
<https://doi.org/10.1016/j.erss.2016.04.014>
23. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2018). Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares ENCEVI: Presentación de Resultados. Ciudad de México.
<https://www.inegi.org.mx/programas/encevi/2018/>
24. Collins, K. J. (1986). Low indoor temperatures and morbidity in the elderly. *Age and Ageing*, 15(4), 212–220.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1093/ageing/15.4.212>
25. Banxico. (2022). Índices de Precios de Energéticos Seleccionados.
<https://www.banxico.org.mx/TablasWeb/informes-trimestrales/octubre-diciembre-2021/96ACC9C5-5A33-4DB2-9288-09069198B565.html>
26. Flores-Larsen, Silvana, Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231(January 2021), 110576.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576>
27. Reyes, A. (2021). Revealing the contribution of informal settlements to climate change mitigation in latin america: A case study of Isidro Fabela, Mexico City. *Sustainability*, 13(21).
<https://doi.org/10.3390/su132112108>

28. U.S. Department of Energy's (DOE) y National Renewable Energy Laboratory (NREL). EnergyPlus. Retrieved May 10, 2023, from <https://energyplus.net/>
29. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). Promedio de ocupantes en viviendas particulares habitadas. Ciudad de México. <https://www.inegi.org.mx/temas/vivienda/>
30. Urban, B., & Gomez, C. (2013). A case for thermostat user models. In BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association (pp. 1483–1490). Chambéry, France. https://www.aivc.org/sites/default/files/p_2337.pdf
31. Lucero-Álvarez, J., Rodríguez-Muñoz, N., & Martín-Domínguez, I. (2016). The Effects of Roof and Wall Insulation on the Energy Costs of Low Income Housing in Mexico. *Sustainability*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/su8070590>
32. Climate-Data.org. (2022). Climate data for cities worldwide. from <https://en.climate-data.org/>
33. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). Climatología. Geografía y Medio Ambiente. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
34. ANSI/ASHRAE Standard 55–2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2013.
35. Alliance for an Energy Efficient Economy AEEE. (2020). Adaptive Thermal Comfort in Sustainable Cooling Solutions. Retrieved May 15, 2023, from <https://aeee.in/sharing-posts/adaptive-thermal-comfort-in-sustainable-cooling-solutions/>
36. Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563–572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
37. Barrios, Guillermo, Elías, Pablo, Huelsz, Guadalupe, Rojas, J. (2010). Selección de los materiales de muros y techos para mejorar el confort térmico en edificaciones no climatizadas. I. Marincic Lovriha (Ed.), *Estudios Sobre Arquitectura y Urbanismo del Desierto* (Vol. III, p. 104). Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
38. Diario Oficial de la Federación. NOM-003-ENER-2021, Eficiencia térmica de calentadores de agua para uso doméstico y comercial. Límites, métodos de prueba y etiquetado. (2021). México. https://dof.gob.mx/2021/SENER/SENER_150921.pdf
39. Diario Oficial de la Federación. NOM-008-CNA-1998, Regaderas Empleadas en el Aseo Corporal - Especificaciones y Métodos de Prueba. (1998). México. <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/n8.pdf>
40. SMN - CONAGUA. (2022). Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>

41. Morales, L. (2022). Tarifas domésticas CFE 2022: ¿Cómo saber en cuál estoy? <https://tarifasdeluz.mx/cfe-tarifas>
42. Comisión Federal de Electricidad. (2022). Esquema tarifario vigente. Hogar. <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>
43. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía CONUEE. (2017). Costos y beneficios de la norma oficial mexicana para envolvente de edificaciones residenciales (NOM-020-ENER). Ciudad de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/234755/Impacto_NOM-020-junio-2017-FINAL.pdf
44. CRE Comisión Reguladora de Energía. (2022). Precios al público del gas LP reportados por los distribuidores. <https://www.gob.mx/cre/documentos/precios-al-publico-de-gas-lp-reportados-por-los-distribuidores>
45. World Health Organization. (2018). Chapter 5. High indoor temperatures. WHO Housing and Health Guidelines. Geneva, Switzerland. Retrieved May 10, 2023, from <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK535285/>
46. Jiang, Y., Wang, Z., Lin, B., & Mumovic, D. (2020). Development of a health data-driven model for a thermal comfort study. Building and Environment, 177(December 2019).



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

The use of Arduino as a didactic tool: An approach in the detection of adulterated mezcal

El uso de Arduino como herramienta didáctica: Un enfoque en la detección de mezcal adulterado

Sifuentes-Gallardo, C.^a, Ortega-Sígala, J.J.^a, Guzmán-Fernández, M.^a, Zambrano, M.^a, Berumen-Torres, J.^a, Rodríguez-Tenorio, D.^a, Rodríguez-González, B.^a, Cardoso-Pérez, M.^a, Cruz-Domínguez, O.^b, Wassim, S.^c, Durán-Muñoz, H.^{a*}

^a Universidad Autónoma de Zacatecas, Jardín Juárez 147, Zacatecas Centro, 98000.

^b Universidad Politécnica de Zacatecas, Plan de Pardillo, 99059 Fresnillo, México.

^c High Agronomic Institute of Chott Mariem, University of Sousse, 4042, Tunisia.

clausifuen@uaz.edu.mx; maxguzman1997@gmail.com; misaelzambrano1997@gmail.com;

javier.berumen@fisica.uaz.edu.mx; rtenorio00@hotmail.com; brodriguez@upz.edu.mx;

mcardoso_63p@yahoo.com.mx; ocruz@upz.edu.mx; wessaadaoui@gmail.com; *hectorduranm@hotmail.com

Technological innovation: Development of a spectrophotometer based on Arduino, equipped with an automation system.

Industrial application area: Identification of alcohol samples adulterated.

Received: december 26th, 2022

Accepted: march 19th, 2023

Resumen

El mezcal es una bebida alcohólica y es adulterada con frecuencia, causando problemas de salud en la población. Por lo tanto, la adulteración de bebidas alcohólicas es una práctica ilegal. Adicionalmente, los equipos para detectar bebidas adulteradas son cada vez más caros, lo que los hace inaccesibles para la mayoría de los laboratorios universitarios interesados en analizar bebidas alcohólicas adulteradas. Tratando de solucionar el problema de identificar mezcal adulterado y evitando el alto costo de equipo de laboratorio, el objetivo de este trabajo es implementar un espectrofotómetro casero a través de una metodología sencilla, para posteriormente identificar muestras de mezcal adulterado. Este trabajo trata de incentivar a los docentes sin conocimientos profundos en electrónica y programación, a desarrollar sus propios equipos de laboratorio, evitando pagar los altos costos de los equipos comerciales. El espectrofotómetro casero basado en Arduino es portátil y el grado de detección es comparable al de los equipos comerciales. Además, se explica

en detalle el código de programación para la interfaz de control de usuario. Como resultado de este trabajo se encontró que el grado de detección del espectrofotómetro propuesto es comparable con equipos comerciales. Además, el costo total fue de 100 dólares, siendo sumamente económico en comparación con el alto costo de los equipos comerciales. Finalmente, la respuesta del espectrofotómetro basado en Arduino es adecuada para identificar muestras de mezcal adulteradas.

Palabras clave: Arduino, espectrofotometría, electrónica de aprendizaje y equipos de laboratorio.

Abstract

Mezcal is an alcoholic beverage and is frequently adulterated, causing health problems in the population. Therefore, adulteration of alcoholic beverages is an illegal practice. In addition, equipment to detect adulterated beverages is becoming more expensive, making it inaccessible to most university laboratories interested in testing adulterated alcoholic beverages. In an attempt to solve the problem of identifying adulterated mezcal and avoiding the high cost of laboratory equipment, the objective of this work is to implement a homemade spectrophotometer through a simple methodology, to later identify samples of adulterated mezcal. This work tries to encourage teachers without deep knowledge in electronics and programming, to develop their own laboratory equipment, avoiding paying the high costs of commercial equipment. The Arduino-based homemade spectrophotometer is portable and the degree of detection is comparable to that of commercial equipment. In addition, the programming code for the user control interface is explained in detail. As a result of this work, it was found that the degree of detection of the proposed spectrophotometer is comparable with commercial equipment. Furthermore, the total cost was \$100, which is extremely inexpensive compared to the high cost of commercial equipment. Finally, the response of the Arduino-based spectrophotometer is adequate to identify adulterated mezcal samples.

Keywords: Arduino, Spectrophotometry, Learning Electronics and Lab equipment.

1 Introduction

Mezcal is socially considered as an elixir [1] and the Official Mexican Norm considers mezcal as an alcoholic beverage composed of 100% agave, which is obtained by distillation of juices fermented [2]. Unfortunately, alcoholic beverages are commonly adulterated by diluting with water, ethanol, ethyl alcohol or methanol. Normally, alcoholic adulteration is performed for economic reasons, and it can cause health problems, especially when alcoholic beverages are adulterated with methanol [3]. Therefore, the adulteration of alcoholic

beverages is an illegal and clandestine practice [4].

The recognition of adulteration of alcoholic beverages can be done using several techniques, most of which are expensive, time-consuming for sample preparation or use large amounts of solvents [5-6]. Some of these techniques are high-performance liquid chromatography, nuclear magnetic resonance, gas chromatography, fluorescence spectrometry and UV-Vis spectrometry [7]. In particular, this last technique is considered for several applications. For example, the characterization of materials, determination

of absorbance in thin films [8], detection of defects in wood [9], detection of glucose in salivary fluid [10] and for the teaching of chemistry [11].

The physical phenomenon of spectrophotometry consists of measuring the degree of absorbance of light in a specific wavelength range. This requires three basic components, a light source, a monochromator and a detector. The light source and detector define the wavelength limits. The monochromator separates the light produced by the source into different wavelength ranges. Subsequently, a sample is placed between the monochromator and the detector, which is illuminated with a specific wavelength. The light not absorbed by the substances present in the sample, can be quantified by the detector [12]. However, the high-cost of spectrophotometry equipment is the main problem. For example, the Cary 60 UV-Vis spectrophotometer costs around \$ 30,000 and the DR-1900 spectrophotometer costs between \$ 2,000 and \$ 8,000 [13]. Consequently, this equipment is inaccessible due to their high cost for the vast majority of educational institutions around the world, either for research or teaching activities [14, 16].

However, in the literature, the manufacture of a spectrophotometer with simple components, such as cardboard, diffraction gratings of digital discs (DVD), cell phones or digital cameras has been reported [11, 16]. Also, a spectrophotometer based on LEGO pieces has even been successfully developed [17]. However, the vast majority of these home-made equipment do not have the following two elements: (1) an automation system to carry out complex measurements and (2) a graphical control interface. However, the spectrophotometer proposed in this work does have both elements.

Trying to solve the problem of (1) recognizing adulterated mezcal and (2) avoiding the high cost of lab equipment. The aim of this work is to develop a homemade spectrophotometer considering an easy methodology, in order to solves the two previous problems. Meanwhile, the importance of this work is to encourage teachers, without deep knowledge in electronics and programming, to develop their own homemade spectrophotometer, avoiding high payments, and to develop laboratory practices with students. This spectrophotometer is designed to recognize Mezcal adulteration and to develop laboratory practices with students.

2 Materials and methods

A simple methodology for designing a low-cost spectrophotometer based on Arduino is presented in the first section. Later, the spectrophotometer diagram is shown in Figure 1. Subsequently, the programming code of the microcontroller-Atmega328P is explained step by step. This microcontroller is used in the Arduino data acquisition board due to its simple programming procedure.

The Atmega328P has the function of controlling the electronic components (stepper motor, servos, etc.) and also saving the data obtained by the optical measurement system. The next section discusses the programming of the control interface. The next section shows the spectrophotometer calibration using a spectrophotometer VE-5100uv from VELAB. Finally, the preparation of the cuvettes with different concentrations of mezcal and ethyl alcohol is explained.

2.1 Electronic components of the spectrophotometer

The spectrophotometer is composed of these three electronic setups: (1) A data acquisition system using Arduino, and which consists of

an Atmega328P microcontroller (Figure 1-b) with an FTDI-FT232, the electronic component responsible for communication between the microcontroller and the computer (Figure 1- c). (2) A light detection system with a photoresistor (Figure 1-l) and an LM234 signal amplifier (Figure 1-d). (3)

An optical stimulation system, which is composed of: A high-power lamp (Figure 1-a), a biconvex lens (Figure 1-f), a light diffractor (Figure 1-g) which rotates by a 28BYJ-48 stepper motor (Figure 1-k), and which is controlled by the ULN2003 controller (Figure 1-j).

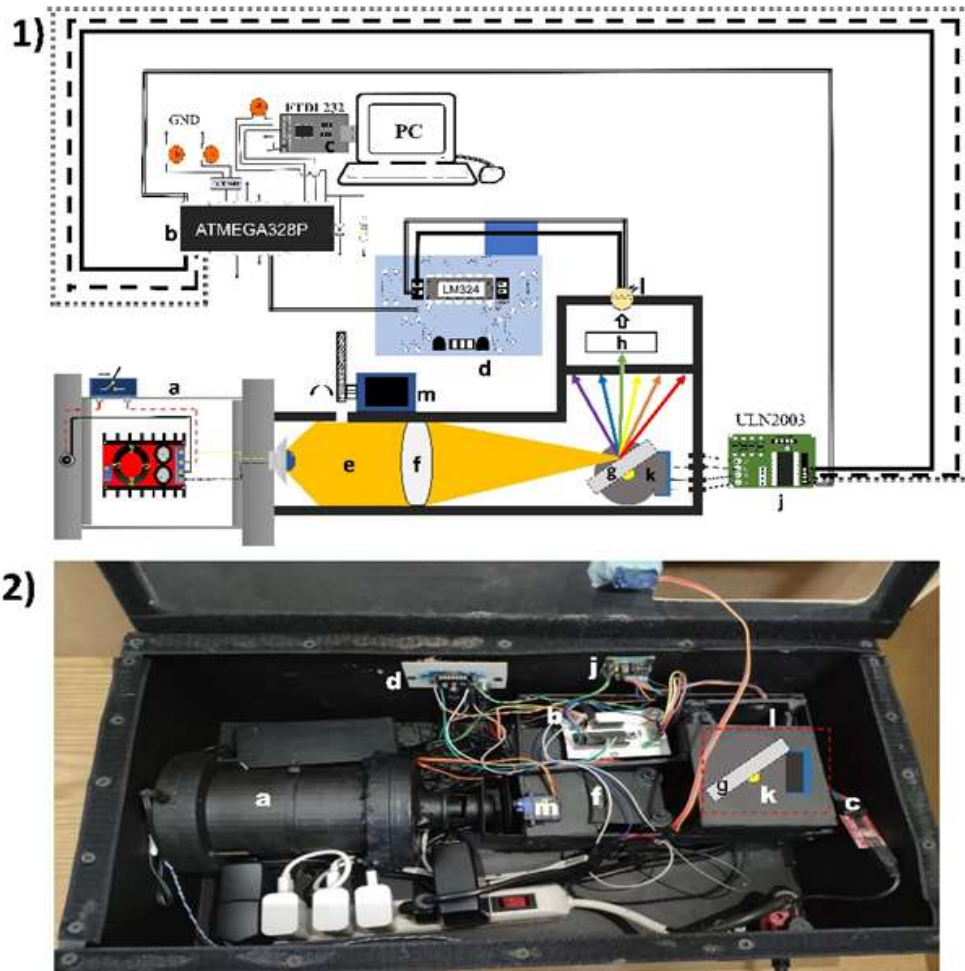


Figure 1. 1) Spectrophotometer diagram. 2) Components of the spectrophotometer. a) High power lamp, b) Atmega328P microcontroller, c) FTDI-FT232, d) LM234 signal amplifier, e) Light beam generated by the lamp, f) Biconvex lens, g) Light diffractor, l) Photoresistor, j) ULN2003 controller, k) 28BYJ-48 stepper motor, m) Servomotor.

2.2 Electronic components of the spectrophotometer

In the Arduino -based spectrophotometer, a 50W, 12V-30V Led lamp was used. It provides the light for stimulation. The lamp

has a 2-amp switch, a 4-inch 12V cooling fan and a converter to boost the DC-DC Boost 150W voltage to 12-35V 6A. The structure of the lamp was made with a 3D printer (Figure 2).

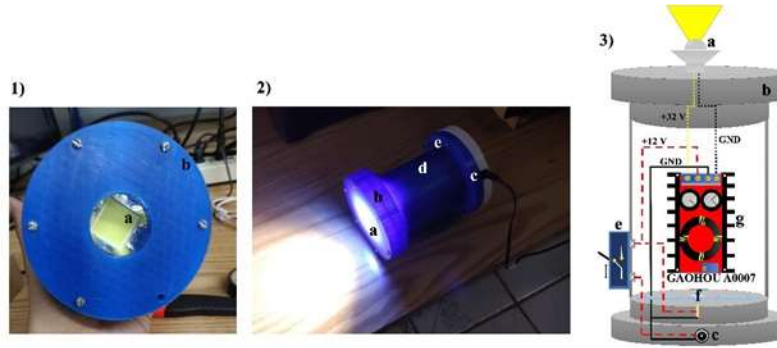


Figure 2. 1) Front view of the lamp. 2) Full view of the lamp. 3) Internal electronic diagram of the lamp. a) Led, b) Front of the lamp, c) Jack connector for power supply, d) Structure of the lamp, e) Switch, f) Fan and g) GAOHOU A0007 DC-DC Boost 150W to 12-35V 6A converter.

2.3 Focusing system and light diffraction

Normally, the light spectrum of a lamp is scattered, so it must be focused to increase its intensity. Therefore, a biconvex lens (Figure 3-f) was used to focus the light spectrum. The distance selected for the light source and the lens was 12 cm. Afterwards, the light beam is diffracted using a DVD fragment (Figure 3-h), as reported in the literature [12], this diffractor is appropriate. The distance

between the lens and the diffractor is 7 cm. The diffractor is placed on the 28BYJ-48 Unipolar stepper motor (Figure 3-m), and depending on where the diffractor is placed, a certain wavelength will be produced. The stepper motor uses a 5V supply voltage with a ULN2003 controller (Figure 3-n). An electromechanical system (Micro Servo 9g SG90) was implemented to obstruct the light beam of the lamp (Figure 3-b).

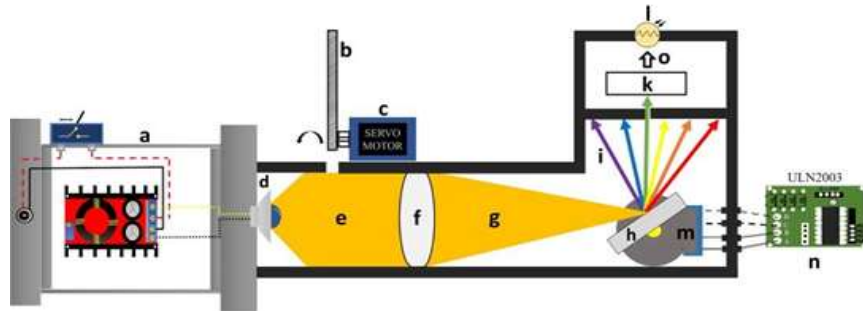


Figure 3. Focusing and light diffraction system. a) Lamp, b) Interruption bar, c) SG90 servo motor, d) LED, e) Stray light beam, f) Biconvex lens, g) Focused light beam, h) Diffractor, i) Light beam with certain wavelength, k) Thin film, o) Transmitted light beam, l) Photoresist, m) 28BYJ-48 stepper motor, and n) ULN2003 stepper motor driver.

2.4 Light detection system

The diffracted light beam with a specific wavelength is transmitted through the cuvette and will then be detected by a photoresist. Then, an electric signal is generated that depends on the detected wavelength. Subsequently, it is necessary to set the signal reading limits between 0V and 5V. An inverting amplifier was used and the value of

the input resistance (R_i) was calculated by using (1).

$$\frac{V_o}{V_i} = - \frac{R_f}{R_i} \quad (\text{Eq. 1})$$

Where V_o is the output voltage (volts), V_i is the input voltage, and R_i is the input resistance (ohms). The photoresistor response

was calibrated as follows: first, its response is measured with and without thin film, obtaining a value of R_i . Then, the gain and R_i values are substituted and the value of R_f is obtained. For example, if the thin film has a high transmittance, the energy captured by the photoresistor will be high. If the cuvette has low transmittance, the energy captured by the photoresistor will be lower. The LM324 integrated circuit, which has 4 operational amplifiers inside it was used for the light

detection system. This circuit is cheap and easy to get. The electronic diagram of the detection system is shown in Figure 4. For the detection system, a photoresistor was used (Figure 4-d), because it is easy to acquire in the market, it is low cost compared to other types of light detectors and has an adequate luminescent response. Figure 4 shows the electrical connection between the photoresistor and the signal amplification board in spectrophotometry equipment.

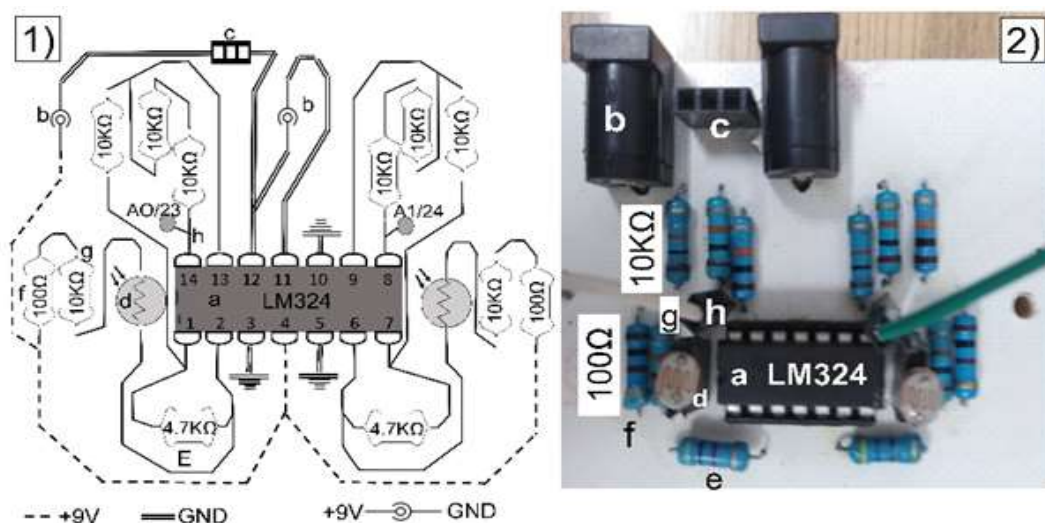


Figure 4. a) Electronic diagram. b) Experimental setup. a) LM234, b) Jack connector for power supply, c) Connectors, d) Photoresistor, e) 4.7 KΩ resistor, f) 100 Ω resistor, g) 10 KΩ resistor and h) Conditioned output signal Ao and Ai, 3) Connection diagram of the photoresistor with the signal amplification board. a) LM234, i) Diffracted light beam, k) Thin film, o) Transmittance light beam, l) Photoresist and p) Signal amplification board.

2.5 Data acquisition and processing

To reduce the cost of the spectrophotometer, the data acquisition board can only be replaced by the Atmega328P microcontroller, which can be programmed with the Arduino IDE. For data acquisition it was necessary to build an Arduino-based data acquisition board with the Atmega328P microcontroller (Figure 5-e). This is due to its simple way of programming and its low cost. The components used to assemble the data acquisition board are as follows:

(1) The FTDI232 electronic component (Figure 5-a) helps the communication between the microcontroller and the

computer, (2) 0.1μF ceramic capacitor (Figure 5-b). (3) Two 22pF ceramic capacitors, necessary in the crystal connection (Figure 5-c). (4) 16MHz crystal oscillator, necessary for the operation of the microcontroller (Figure 5-d). (5) Two-terminal push-button, it has the function of restarting the microcontroller (Figure 5-f). (6) 1000 Ω resistors (Figure 5-g).

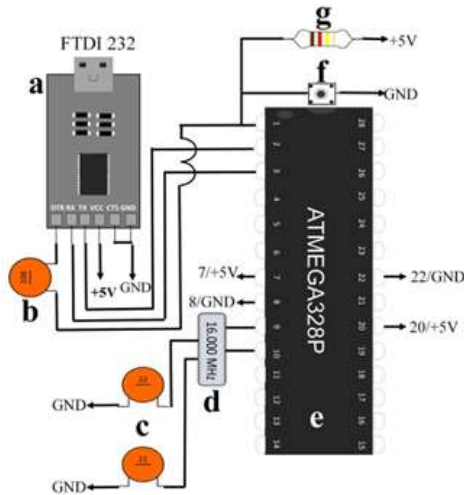


Figure 5. Low-cost and easy-to-assemble data acquisition board.

2.6 Programming the Atmega328P Microcontroller

For programming the ATmega328P microcontroller, the Arduino IDE software was used, due to its simple programming logic. In the microcontroller, the control of a stepper motor, a servo motor, and the voltage reading of the photoresistor were considered.

Figure 6 presents the programming code and consists of four parts: (a) Declaration and initiation of variables where libraries are included (Figure 6-a). (b) Establishment of the serial transmission speed and pin assignment to the variables (Figure 6-b). (c) Acquisition of voltage values by peripheral ADC and conversion of voltage values (Figure 6-c). (d) Send voltage values, SG90 servo motors ON / OFF movement conditions and stepper motor motion conditions (Figure 6-d).

```

a) #include <Stepper.h> // Library Stepper Motor
    #include <Servo.h> // Library servomotor
    #define STEPS 900 // Define steps
    Stepper stepper(STEPS, 8, 9, 10, 11); // Pins Stepper Motor
    int dato; // Serial Data
    int signal1 = A0; // V1 Variable Pin A0 - V2 Variable Pin A1
    int voltadc = 0; // Analog Pin Information
    float voltaparente = 0; // conversion V1 to digital - conversion V2 to digital
    float voltenvio; // Value V2 + 500. - Variable Value V1 + 200.
    int angulo = 0, angulo1 = 90; // Angle 90° - Angle 0°
    Servo motor1; // Objetc servo1

b) void setup() { Serial.begin(9600); // Serial baudrate.
    motor1.attach(5); // Output Pin 5 - PWM Servo Motor Light.
    pinMode(signal1, INPUT); // Input Pin A0 - V1 Voltage.
    stepper.setSpeed(15); // RPM of Stepper Motor

c) void loop() { voltadc = analogRead(signal1); // Voltadc de Analog Pin A0 Inf
    voltaparente = voltadc * (5.0 / 1023.0); // Conversion V1 to digital
    voltenvio = voltaparente + 200; // Value V1 + 200.
    dato = Serial.read(); // Save Serial Data

d) if (dato == 'M') { Serial.println(voltenvio, 2); } // Condition For Voltage Data. Send Value V1
    + 200. // Send Value V2 + 500.
    if (dato == 'H') { motor1.write(angulo); } // Condition For ON servo luz
    if (dato == 'L') { motor1.write(angulo1); } // Condition For OFF servo luz
    if (dato == '1') { stepper.step(25); } // Condition to Increase Degree
    if (dato == '2') { stepper.step(1685); } // Condition for return to start
  }

```

Figure 6. Programming Code for the Atmega328P microcontroller using Arduino.

2.7 Programming the Spectrophotometer Control Interface in Visual Studio

One of the most widely used programming languages is based on Visual Basic, due to its wide variety of applications [18, 19, 20]. Therefore, a simple and friendly control interface for the spectrophotometry equipment was designed. This interface is programmed in Visual Studio, which is based on Visual Basic (Figure 7), and has the following four functions: a) Automatic selector to choose the communication port between the spectrophotometer and the computer. This interface is programmed in Visual Studio, which is based on Visual Basic (Figure 7), and has the following four functions: a) Automatic selector to choose the communication port between the spectrophotometer and the computer. c) The lamp shutter prevents the passage of the light beam. d) Optionally, a stepper servo motor can be included to introduce the sample into the equipment.

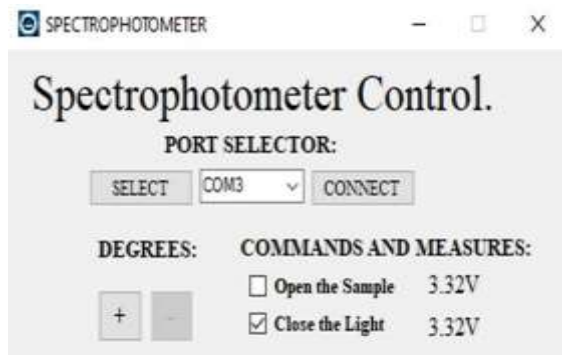


Figure 7. Spectrophotometer control interface, designed in Visual Studio.

The control interface is designed in a simple way, so it can be replicated by any person without deep knowledge in electronics and programming. The interface programming code is shown in Figure 8 and consists of the following parts: a) Libraries necessary to

design. b) Declare variables: V1, is to store the voltage referred to the photoresistor. INFO, a variable that allows collecting and classifying the SerialPort. Count, a variable that works as a counter to store the number of times the user "Clicks" on the "+" button. ENABLED_PORTS, allows showing the COMS available on the computer and finally readPort, a variable that searches and stores the ports available on the PC. c) "SEARCH" function of the "SELECT" button, which is executed when the button is "Clicked", searching for the available ports on the computer. d) "CONNECT" function, which is executed each time the button is "Clicked", making the connection between the microcontroller and the computer. e) "Plus_Dreeges" function of the "+" button, which is executed every time the button is "Clicked", making the increase of degrees, turning the stepper motor in a certain direction.

f) "Less_Dreeges" function of the "-" button, making the increase in degrees, turning in the opposite direction to the previous function. g) "Open_Sample" function, to write a letter "H" or "L". h) Function called "Timer_Measurements", which runs every 1000 ms, and writes to the serial port "M", capturing in a Label called "Label_V1", the value of V1. i) Function called "Open_light", which is executed every time the CheckBox changes state, to write a letter "W" or "B". j) Function "SerialPort1_DataReceived". This function is executed every time the microcontroller sends information through the serial port. The "System.IO.Ports" library was also added. k) In this part of the code the information is classified using the SerialPort, in this way the values from the microcontroller can be identified.

- a) `using System; // This Library It allows you create a project.
using System.Windows.Forms; // Library to work with every element in the form.
using System.IO.Ports; // Add this library to detect the IO ports available.`
- b) `String [] ENABLED_PORTS; // Array that allow to store the "COM" available.
string readPort; // Variable that allows store ports available.
double INFO = 0, V1 = 0, accountant = 0; // Variable that store some values`
- c) `Private void SEARCH_Click(object sender, EventArgs e){ CBPORT.Items.Clear();
ENABLED_PORTS = SerialPort.GetPortNames(); // Get the ports available.
foreach (string SIMPLE_PORT in ENABLED_PORTS) {
CBPORT.Items.Add(SIMPLE_PORT); }`
- d) `Private void CONNECT_Click(object sender, EventArgs e){
try{ serialPort1.Open(); MessageBox.Show("Successful Connection. Welcome");
Timer_Measurements.Start(); }`
- e) `Private void Plus_Degrees_Click(object sender, EventArgs e) { serialPort1.Write("1");
accountant += 1; if (accountant == 15) { Less_Degrees.Enabled = true;
Plus_Degrees.Enabled = false; } }`
- f) `Private void Less_Degrees_Click(object sender, EventArgs e) { serialPort1.Write("2");
accountant = 0; Less_Degrees.Enabled = false; Plus_Degrees.Enabled = true; } //Write
in the serialPort: "2"`
- g) `Private void Open_Sample_CheckedChanged(object sender, EventArgs e){
if (Open_Sample.Checked == true) { Open_Sample.Text = "Close the Sample";
serialPort1.Write("H"); }`
- h) `serialPort1.Write("M");
label_V1.Text = V1.ToString("N2")+"V";`
- i) `Private void Open_light_Checked Changed(object sender, EventArgs e){
if (Open_light.Checked == true) { Open_light.Text = "Close the Light";
serialPort1.Write("W"); }`
- j) `Private void SerialPort1_DataReceived(object sender, SerialDataReceivedEventArgs
e){ readPort = serialPort1.ReadLine(); //`
- k) `if (INFO < 250){ V1 = INFO - 200; } // differentiate the values "V1"
if (INFO > 499){ V2 = INFO - 500; } }`

Figure 8. Visual Studio programming code for the spectrophotometer user interface.

2.8 Cost of spectrophotometry equipment

Table 1 shows the components of each module, as well as the cost of each

component and its total cost. The cost of the proposed equipment is extremely low.

Table 1. Cost of spectrophotometry equipment.

Components	Cost [Dollars]
Resistance: 1M Ω and 330 Ω ; LED; Ceramic capacitor 0.1uF and 22pF; 16 Mhz crystal oscillator; FTDI FT 232; Atmega 328P microcontroller; Phenolic plate; USB-Mini B cable.	\$ 5.00
LED 50W; Switch: Power DC Jack connector; 4-inch, 12V fan; Converter DC-DC Boost 150W 10-32V; Structure Lamp.	\$ 15.00
Biconvex lens; 28BYJ-478 unipolar stepper motor; ULN2003 driver; SG90 Servo motor; 5V-1A power supply.	\$ 30.00
SG90 Servo Motor; MDF sample holder; CILM34; Resistance 10K Ω , 4.7 K Ω and 100 Ω ; Photoresist; 14-pin socket base.	\$ 50.00
Total Cost	\$ 100.00

2.9 Preparation of the cuvettes

Four cuvettes with different concentrations of mezcal and ethyl alcohol were prepared. The first cuvette contains 100% mezcal - 0% ethyl alcohol, the second cuvette contains 75% mezcal - 25% ethyl alcohol, the third cuvette 25% mezcal - 75% ethyl alcohol and the fourth cuvette 0% mezcal - 100% ethyl alcohol.

Subsequently, the transmittance of each cuvette was determined using a spectrophotometer VE-5100uv from VELAB. For each transmittance spectrum, its numerical adjustment was made. Then, the transmittance of each cuvette was determined using an Arduino-based homemade spectrophotometer. Finally, each numerical

fitting was compared with the values obtained with the Arduino-based spectrophotometer.

3 Results y Discussions

The response of the homemade spectrophotometer was calibrated by several correction cycles using a commercial spectrophotometer (VE-5100uv of VELAB). These consisted of comparing the transmittance spectrum obtained by the spectrophotometer VE-5100uv from VELAB and the transmittance spectrum obtained by the homemade spectrophotometer. These cycles were carried out until an absolute error of less than 5% was obtained. The cuvettes with different concentrations of artisan mezcal and ethyl alcohol were placed in the spectrophotometer (Figure 9).

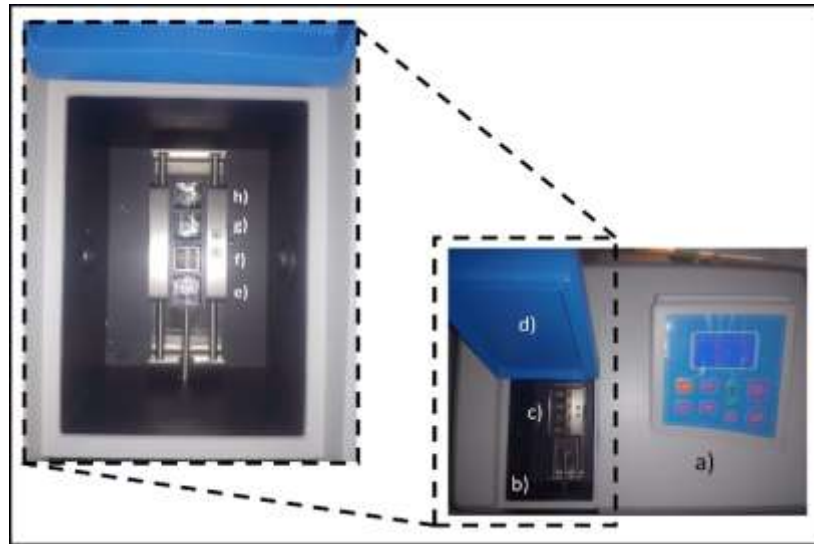


Figure 9. a) Spectrophotometer VE-5100uv of VELAB, b) Measuring chamber, c) Cuvette support, d) Spectrophotometer cover, e) Cuvette with a concentration of 100% mezcal and 0% ethyl alcohol, f) Cuvette with a concentration of 75% mezcal and 25% ethyl alcohol, g) Cuvette with a concentration of 25% mezcal and 75% ethyl alcohol, h) Cuvette with a concentration of 0% mezcal and 100% ethyl alcohol.

Figure 10 shows the transmittance spectra for each concentration. The spectrum that presents the highest transmittance is associated with a concentration of 100% ethyl alcohol, then the spectrum associated with a concentration of 75% ethyl alcohol and 25% mezcal, then the spectrum associated with a

concentration of 25% ethyl alcohol and 75% mezcal, and finally 0% ethyl alcohol and 100% mezcal. Therefore, as ethyl alcohol is added to a mezcal sample, its transmittance will increase and the quality of the mezcal will decrease.

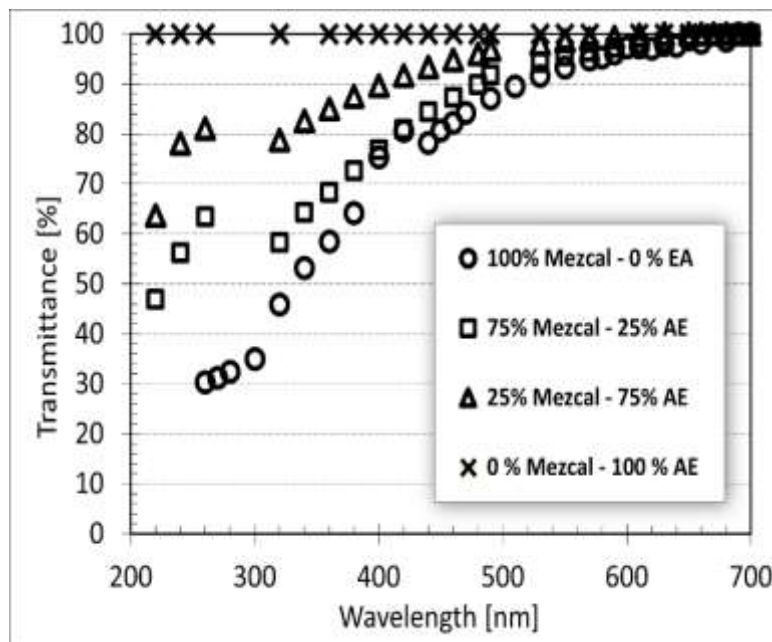


Figure 10. Transmittance response of each cuvette with different mezcal-ethyl alcohol concentrations.

For each transmittance spectrum a numerical fitting was made (Figure 11). For a concentration of 25% Mezcal - 75% ethyl alcohol, the equation obtained is: $\text{Transmittance} = 26.329 \ln(\text{Wavelength}) - 69.327$ with a $R^2 = 0.9072$. For a concentration of 75% Mezcal - 25% ethyl alcohol, the

equation obtained is: $\text{Transmittance} = 46.982 \ln(\text{Wavelength}) - 204.1$ with a $R^2 = 0.9538$. For a concentration of 100% Mezcal-0% ethyl alcohol, the equation obtained is: $\text{Transmittance} = 74.783 \ln(\text{Wavelength}) - 381.95$ with a $R^2 = 0.9476$.

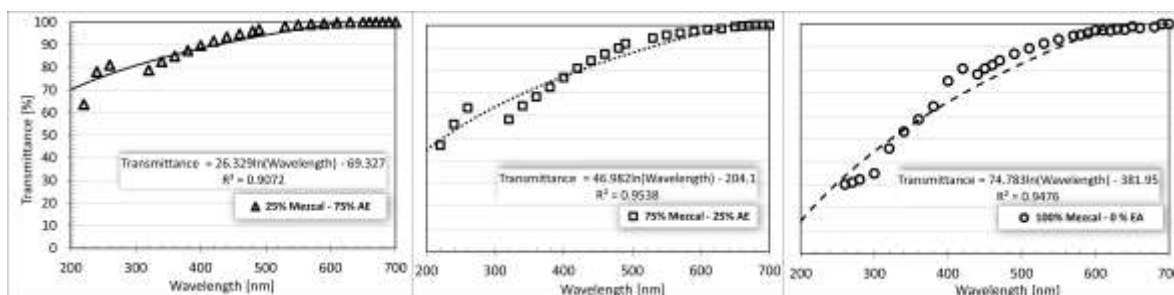


Figure 11. Numerical fitting made to each transmittance spectrum.

A comparison between the luminescent response of the commercial spectrophotometer (VE-5100uv of VELAB) and the Arduino-based homemade spectrophotometer is shown in Figure 12. The luminescent comparison between both

devices is carried out for the different concentrations. Figure 12 shows close results between both devices, making the Arduino-based spectrophotometer an ideal option to identify possible adulterations in Mezcal.

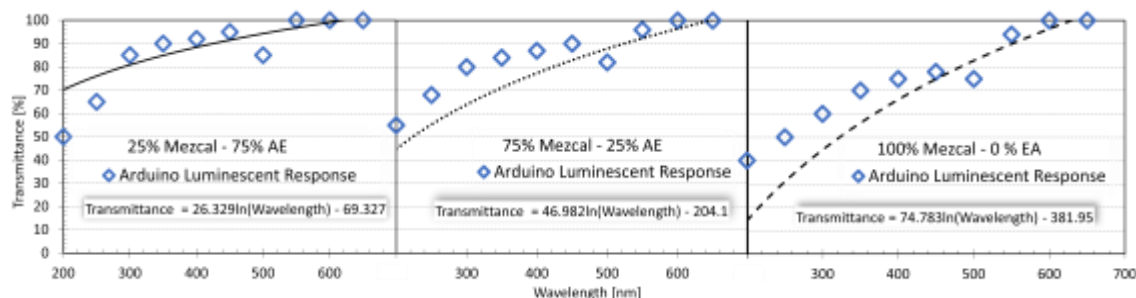


Figure 12. Comparison between the luminescent response of the commercial spectrophotometer (VE-5100uv of VELAB) and the Arduino-based homemade spectrophotometer.

4 Conclusions

The contribution of this work focuses on showing a friendly methodology to develop a homemade spectrophotometer based on Arduino for laboratory practices. Trying to encourage teachers, students or researchers, without deep knowledge in electronics and programming, to develop their own lab equipment, avoiding high costs. Also, in this work, our research group showed a simple and step-by-step methodology to implement a

low-cost spectrophotometry equipment based on Arduino. In addition, this paper discusses in detail the automation process, the programming of the control interface and the Atmega328P microcontroller. The calibration of the equipment was carried out using a commercial spectrophotometer (VE-5100uv of VELAB). The luminescent response of the Arduino-based homemade spectrophotometer is adequate compared to the response of commercial equipment.

Additionally, with the electronic elements presented in this work, it's possible to develop complex laboratory equipment. Finally, the homemade arduino-based spectrophotometer made it possible to identify adulterated mezcal samples.

5 References

- Gaytán, M. (2019). "Extending authenticity: Going corporate in a craft market", *Poetics*, <https://doi.org/10.1016/j.poetic.2019.101380>
- Quintero Arenas, M., Meza-Márquez, O., Velázquez-Hernández, J., Gallardo-Velázquez, T. & Osorio-Revilla, G. (2020). "Quantification of adulterants in mezcal by means of FT-MIR and FT-NIR spectroscopy coupled to multivariate analysis". *Journal of Food*, 18(1), <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1740327>
- Barroso, J., Díez-Buitrago, B., Sa, L., Möller, M., Briz, N., & Pavlov, V. (2018). "Specific bioanalytical optical and photoelectrochemical assays for detection of methanol in alcoholic beverages". *Biosensors and Bioelectronics*, 101(1), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2017.10.0221>
- Sisco, E., & Dake, J. (2016). "Detection of low molecular weight adulterants in beverages by direct analysis in real time mass spectrometry". *Analytical Methods*, 8(14), 2971. <https://doi.org/10.1039/C6AY00292G>
- Lachenmeier, D. W. (2016). "Advances in the detection of the adulteration of alcoholic beverages including unrecorded alcohol". In G. Downey (Ed.), *Advances in food authenticity testing* (pp. 565–584). Woodhead Publishing.
- Solís-Núñez, J. (2008). "Propuesta de instrumentación de un sistema de control para una torre de destilación en la producción del mezcal". Tesis. Instituto Politécnico Nacional.
- González-Gutiérrez, J., Pérez-Isidoro, R. and Ruiz-Suárez, J. (2017). "A technique based on droplet evaporation to recognize alcoholic drinks". *Review of Scientific Instruments* 88, 074101, <https://doi.org/10.1063/1.4991818>
- Huibers, P. and Shah, P. (1997). "Multispectral determination of soap film thickness", *Langmuir*, 13, 5995–8, <https://doi.org/10.1021/la960738n>
- Sandak, J., Sandak, A., Zitek, A., Hintestoisser, B. and Picchi, G. (2020). "Development of Low-Cost Portable Spectrometers for Detection of Wood Defects", *Sensors*, 20, <https://doi.org/10.3390/s20020545J>
- Domínguez, R., Orozco, M., Chávez, G. and Márquez-Lucero A. (2017). "The Evaluation of a Low-Cost Colorimeter for Glucose Detection in Salivary Samples", *Sensors*, 17, <https://doi.org/10.3390/s17112495J>
- Taha, S., Rafat, G., Aboshosha, F. and Mansour, R. (2017). "Simple Homemade Spectrophotometer", *Journal of Analytical Chemistry*, 72, <https://doi.org/10.1134/S1061934817020113>
- Lema, M., Aljinovic, E. and Lozano, M. (2006). "Using a homemade spectrophotometer in teaching biosciences", *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 30, 06-110, <https://doi.org/10.1002/bmb.2002.494030020032>
- Widiatmoko, E., Budiman, M., Mikrajuddin, A. and Khairurrijal, A. (2011). "A simple spectrophotometer using common

materials and a digital camera”, *Physics Education*, 46,

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/46/3/014>

14. González-Morales, D., Valencia, A., Díaz-Núñez, A., Fuentes-Estrada, M., López-Santos, O. and García-Beltrán, O. (2020). “Development of a Low-Cost UV-Vis Spectrophotometer and Its Application for the Detection of Mercuric Ions Assisted by Chemosensors”, *Sensors*, 20, <https://doi.org/10.3390/s20030906>

15. Daniel, R., Todt, M. and Floyd, H. (2012). “A Low-Cost Quantitative Absorption Spectrophotometer”, *Journal of chemical education chemistry*, 74, 1432-1435. <https://doi.org/10.1021/ed200829d>

16. Quagliano, J. and Marks, C. (2013). “Spectroscopy with Secondary Students: Designing and Using a Custom-Built Spectrometer”. *Journal of Chemical Education*. 90, 1409–1410, <https://doi.org/10.1021/ed3007499>

17. Arbah, Y., Dnane, M. and Ahraoui, T. (2015). “Effect of substrate temperature on structural and optical properties of spray deposited ZnO thin films”. *Materials Science-Poland*, 33, 491-496, <https://doi.org/10.1515/msp-2015-0062>

18. Guzmán-Fernández, M., Zambrano de la Torre, M., Ortega-Sigala, J., Guzmán-Valdivia, C., Galvan-Tejeda, I., Cruz-Domínguez, O., Ortiz-Hernández, A., Fraire-Hernández, M., Sifuentes-Gallardo, C. and Durán-Muñoz, H. (2012). “Arduino: a Novel Solution to the Problem of High-Cost Experimental Equipment in Higher Education”, *Exp Tech*, 45, <https://doi.org/10.1007/s40799-021-00449-1>

19. Durán-Muñoz, H., Hernández-Ortiz, M., Sifuentes-Gallardo, C., Galván-Tejeda, I.,

Sánchez-Zeferino, R. and Castaño-Meneses, V. (2018). “Comparative study of kinetic parameters induced by different excitation sources: using a novel and user-friendly glow curve deconvolution spreadsheet”, *J Mater Sci: Mater Electron*, 29, <https://doi.org/10.1007/s10854-018-9226-6>

20. Poppe, L., Eliason, H. and Hastings, M. (2004). “A Visual Basic Program to Generate Sediment Grain-Size Statistics and to Extrapolate Particle Distributions”, *Computers & Geosciences*, 30, 791–795, <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.005>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Vibraciones transversales para determinar el módulo dinámico e índice material en multimaterial de madera-malla-adhesivo en *Fagus crenata*

Transverse vibrations to determine the dynamic modulus and material index in wood-mesh-adhesive multimaterial in *Fagus crenata*

Sotomayor-Castellanos, J.R.*, Macedo-Alquicira, I.

Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera; Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Ciudad. Universitaria, C.P. 58180, Morelia, Michoacán.

*madera999@yahoo.com; macedoisarael@gmail.com

Innovación tecnológica: Mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de la madera.

Área de aplicación industrial: Fabricación de componentes para las industrias del mueble, automotriz, embalaje y de la construcción.

Recibido: 09 agosto 2022

Aceptado: 26 marzo 2023

Abstract

Wood used in the furniture and construction industries is a heterogeneous, hygroscopic, anisotropic and biodegradable substance. These natural properties limit its use as an architectural and engineering material and condition the rational use of timber species with mechanical characteristics that do not meet the design criteria stipulated in the regulations. The hypothesis of this research proposes that the transformation of *Fagus crenata* solid wood into a multi-material wood-mesh-adhesive increases its dynamic modulus and its material index. In addition, this technological improvement decreases its natural variability. The objective of the research was to determine the density, frequency, dynamic modulus and quality index in a statistically representative sample of *F. crenata* specimens and to contrast them with the same parameters, but determined in specimens of the multi-material made of the same species. Transverse vibration tests were carried out on small specimens of *F. crenata* and their moisture content, densities, frequencies, dynamic moduli and quality indexes were determined. The main results are: a decrease in the coefficient of variation in the density of the multi-material by 24,1% with respect to that of solid wood. Density is not a good predictor of dynamic modulus ($R^2 = 0,21$), but frequency is (R^2

= 0,94). The density of the multi-material increases 4,3% compared to that of solid wood. The dynamic modulus of the multi-material increases 8,5% with respect to that of solid wood. The multi-material reduces the variability of the dynamic modulus -54,7%. The magnitude of the material index of the multi-material increases 4,0% with respect to that of solid wood. These results are restricted by the experimentation of homogeneous and statistically representative samples of *F. crenata* wood and wood-mesh-adhesive multi-material and are valid for the particular conditions of the methodology used in this research.

Keywords: moisture content, density, frequency, *Fagus crenata*.

Resumen

La madera empleada en las industrias del mueble y de la construcción es una sustancia heterogénea, higroscópica, anisotrópica y biodegradable. Estas propiedades naturales limitan su empleo como material de arquitectura e ingeniería y condicionan el aprovechamiento racional de especies maderables con características mecánicas que no satisfacen los criterios de diseño estipulados en la normatividad. La hipótesis de esta investigación propone que la transformación de madera sólida de *Fagus crenata* en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, esta mejora tecnológica disminuye su variabilidad natural. El objetivo de la investigación fue determinar la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico e índice de calidad en una muestra estadísticamente representativa de probetas de *F. crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie. Se realizaron pruebas de vibraciones transversales en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y se determinó su contenido de humedad, densidades, frecuencias, módulos dinámicos e índices de calidad. Los principales resultados son: una disminución del coeficiente de variación en la densidad del multimaterial en 24,1% respecto al de la madera sólida. La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico ($R^2 = 0,21$), pero si la frecuencia ($R^2 = 0,94$). La densidad del multimaterial aumenta 4,3% respecto al de la madera sólida. El módulo dinámico del multimaterial aumenta 8,5% respecto al de la madera sólida. El multimaterial reduce la variabilidad del módulo dinámico -54,7%. La magnitud del índice material del multimaterial aumenta 4,0% respecto al de la madera sólida. Estos resultados están restringidos por la experimentación de muestras homogéneas y estadísticamente representativas de la madera de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo y son válidos para las condiciones particulares de la metodología empleada en esta investigación.

Palabras clave: contenido de humedad, densidad, frecuencia, *Fagus crenata*.

1. Introducción

Las piezas de madera con aplicaciones comerciales tienen dimensiones y formas limitadas por la geometría del árbol y cuentan

con una estructura anatómica porosa y ordenada en capas de crecimiento alrededor de su eje principal [1,2]. Como resultado, la madera es heterogénea, higroscópica,

anisotrópica y biodegradable. Estas propiedades limitan su empleo como material de arquitectura e ingeniería y condicionan el aprovechamiento racional de especies maderables con características mecánicas que no satisfacen los criterios de diseño estipulados en la normatividad [3]. Para competir con otras materias primas, la madera como insumo y/o producto industrial debe ser un material lo más homogéneo e isotrópico posible, resistente a la humedad y al deterioro, así como garantizar la precisión en sus parámetros mecánicos [4-7].

Estos argumentos implican la caracterización de la madera especie por especie y está sujeta a las condiciones de ensayo, así como reportar datos derivados de un tamaño de muestra estadísticamente representativa. Una vez que se cuente con esta información, es posible proponer tendencias sobre el comportamiento general para una especie en específico y/o por agrupamiento de varias de ellas que denoten una tendencia similar [8-9].

Para transitar de la percepción de la madera como una materia prima hacia su apreciación como un material de ingeniería, se han desarrollado tres vertientes tecnológicas. La primera es la modificación de la madera sólida empleando técnicas de secado, protección, densificado, plastificado, así como tratamientos térmicos [10-14]. De esta manera, se mejoran sus características tecnológicas naturales y se amplía el uso potencial de especies de baja apreciación en el mercado.

La segunda orientación es la elaboración de materiales compuestos de madera que reconstituyen la geometría y la estructura natural de la madera a partir de fibras y/o astillas [15], placas [16] y láminas [17-18], las cuales son combinadas con nanomateriales [19-20], resinas [21], plásticos reforzados [22], polímeros reforzados con fibra de carbono [23-25],

concreto [26-27] y/o resinas [28-29]. Estas tecnologías aumentan las propiedades de resistencia mecánica y de servicio de la madera y sus derivados.

El tercer enfoque es reforzar piezas de madera sólida y/o laminada con metales [30-31], cementos [32-33], fibras naturales [34] y/o sintéticas [35-37], y consolidarlos con resinas y/o adhesivos [29, 38] y/o componentes mecánicos [39-45]. Así, al combinar las propiedades físico-mecánicas de cada componente, se logra incrementar su resistencia mecánica y, al incorporar sustancias protectoras, decrece su biodeterioro y se mejora su estabilización dimensional. Como corolario, existen amplias posibilidades para el diseño mecánico de compuestos, laminados y multimateriales que tienen propiedades similares a la madera sin disminución de sus propiedades estéticas, ambientales y sustentables [46-48].

Los parámetros técnicos de la madera están especificados para una especie y se le asocia una densidad, un contenido de humedad y una dirección de anisotropía. Igualmente, cada parámetro se tabula acompañado de un valor medio, su desviación estándar y un coeficiente de variación. De tal forma que el ingeniero y el arquitecto pueden calcular y diseñar proyectos con geometrías y formas que diversifican el uso de la madera aserrada transformándola en material de ingeniería [49-52] y arquitectura [36, 53-55].

Las características requeridas por la normatividad para el uso de materiales de madera son determinadas con tres perspectivas. La primera son las normas para piezas de madera con dimensiones de empleo [56-57]; la segunda perspectiva es el estudio de probetas de pequeñas dimensiones con procedimientos igualmente normalizados [58-60]; el tercer enfoque es la experimentación con protocolos especiales

para cada caso de estudio [61-62]. Por otra parte, esta caracterización mecánica se realiza en condiciones de carga estática [63-64] y/o dinámica [65-67]. Es en esta segunda modalidad que los métodos no destructivos encuentran aplicación.

Las vibraciones mecánicas permiten medir la frecuencia natural de una probeta de madera. A partir de la frecuencia, de su masa y de su geometría, se puede determinar el módulo dinámico sin modificar la estructura física de una pieza de madera [62, 68-70]. Este parámetro es necesario en el cálculo ingenieril y en el diseño arquitectural. Igualmente, se utiliza para la clasificación mecánica entre especies. Sin embargo, el módulo dinámico no puede por sí solo posicionar a una especie de madera como un material idóneo para una función estructural y/o de servicio. Así, se hace necesario introducir el índice material de la madera [71-73]. Este parámetro permite ponderar el módulo dinámico por la densidad y de esta forma homogeneizar el indicador como criterio de diseño.

Otro enfoque para el estudio de las características mecánicas de la madera y los compuestos de madera es el método del elemento finito [25, 74-75] y sus aplicaciones en la manufactura de compuestos de madera [76]. Esta visión prospecta un gran potencial para el diseño estructural informatizado, así como para las propuestas de madera flexible [12] y súper material [77].

La madera de *Fagus crenata* Blume es ampliamente utilizada en la fabricación de muebles, en la industria de la construcción y otros productos de madera de valor agregado [78-79]. Sus módulos de elasticidad determinados en condiciones estáticas divulgados en la bibliografía son: $E_R = 882 \text{ MN m}^{-2}$, $E_T = 588 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_L = 11760 \text{ MN m}^{-2}$; los módulos de rigidez son: $G_{LR} = 980 \text{ MN m}^{-2}$, $G_{LT} = 637 \text{ MN m}^{-2}$ y $G_{RT} = 196 \text{ MN}$

m^{-2} para una densidad de $740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ y un contenido de humedad de 8% [78]. Los módulos dinámicos por ultrasonido (us) son: $E_{us R} = 2644 \text{ MN m}^{-2}$, $E_{us T} = 1949 \text{ MN m}^{-2}$ y $E_{us L} = 13992 \text{ MN m}^{-2}$ para una densidad de 629 kg m^{-3} y un contenido de humedad de 11% [79]. Los subíndices indican la dirección radial (R), tangencial (T) y longitudinal (L) de la madera. No se detectó información acerca del módulo dinámico determinado por vibraciones transversales. Igualmente, y dada la novedad en la configuración del multimaterial madera-malla-adhesivo, no se localizó información sobre su caracterización para la especie en estudio.

Información técnica sobre multimateriales a base de madera está documentada en [50-51, 80]. La caracterización de adhesivos a base de poliuretano y su interacción con madera sólida y con compuesto de madera están reportados en la bibliografía [28-29, 81-82].

La hipótesis de la investigación propone que la transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo aumenta su módulo dinámico y su índice material. Para verificar esta hipótesis el objetivo de la investigación fue determinar la densidad aparente al momento del ensayo, la frecuencia y los dos parámetros referidos en una muestra estadísticamente representativa de probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y contrastarlos con los mismos parámetros, pero determinados en probetas del multimaterial elaborado con la misma especie.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Conceptualmente, el multimaterial es una membrana, representada por la malla de acero galvanizada, arropada y/o protegida por dos elementos aislantes y/o protectores de un biomaterial y ambos unidos por un adhesivo *ex profeso*. Esta membrana puede ser

remplazada por uno o varios elementos metálicos, plásticos, biológicos y de fibras naturales y/o sintéticas, los cuales puedan almacenar, disipar y/o transmitir información codificada, por ejemplo, un material aislante de sonido y/o temperatura, un material sensible al movimiento, así como circuitos electrónicos. El adhesivo puede ser sustituido por otro tipo de pegamentos naturales y/o polímeros sintéticos que sean apropiados de acuerdo a las funciones para las cuales se diseñe el multimaterial [80].

Se prepararon dos grupos de probetas a partir de un mismo lote de madera de duramen de la especie *F. crenata*. El primer grupo consistió en 36 probetas de madera sólida con dimensiones de 0,01 m × 0,03 m × 0,15 m orientadas en las direcciones radial (espesor), tangencial (ancho) y longitudinal (largo) respectivamente; la madera no contenía defectos de crecimiento. Para el segundo grupo se elaboraron 36 probetas de multimaterial compuesto de dos elementos de madera acomodados ortogonalmente, más

una malla de acero con espesor de 0,92 mm localizada entre las dos maderas; los tres componentes fueron ensamblados con un adhesivo de poliuretano aplicando 200 kg m^{-2} de presión y una temperatura de 90°C durante 90 minutos hasta que se consolida el multimaterial.

Las dimensiones del multimaterial fueron: espesor 0,02 m (dos piezas de madera sólida de 0,01 m), ancho 0,03 m y largo 0,15 m. El espesor y el ancho coinciden con las direcciones radial y tangencial. Los dos componentes de madera están colocados con una rotación de 90° respecto a la dirección longitudinal, lo que resulta en un laminado de dos capas cruzadas perpendicularmente (Figura 1). Todas las probetas se almacenaron en una cámara de acondicionamiento con temperatura de 20°C ($\pm 2^\circ\text{C}$) y humedad relativa del aire de 65% ($\pm 1^\circ\text{C}$) hasta que alcanzaron su contenido de humedad en equilibrio de 10% para la madera sólida y de 8% para el multimaterial.

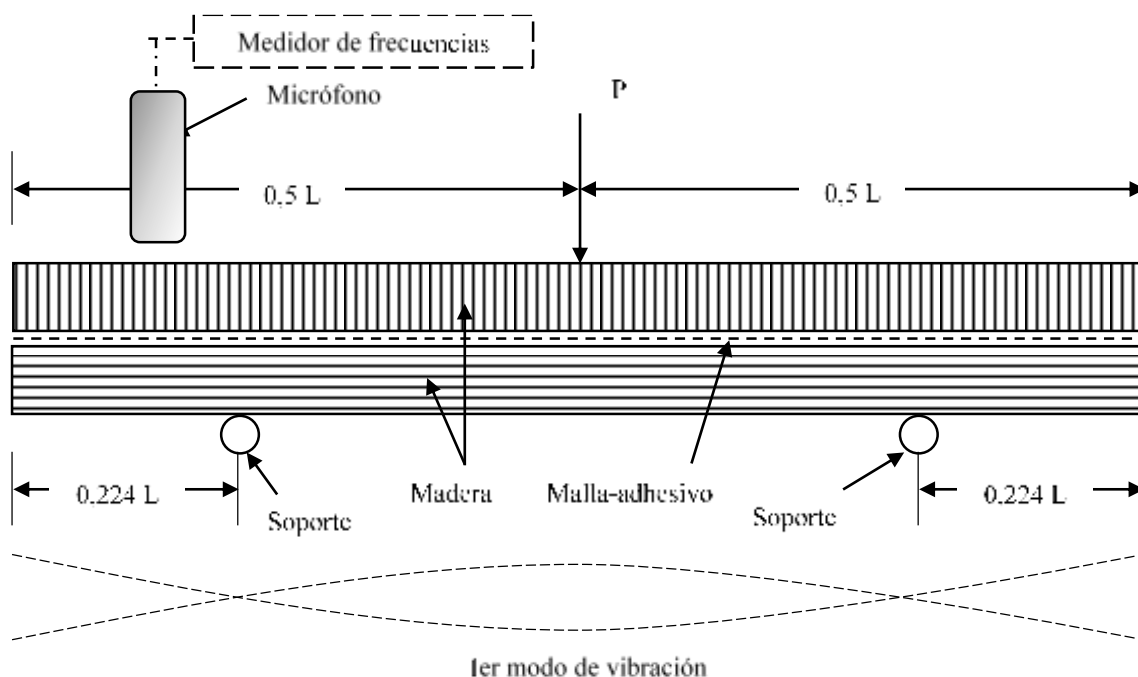


Figura 1. Configuración de las pruebas de vibraciones transversales. Probeta de multimaterial.

El contenido de humedad (CH) de las probetas se determinó con la diferencia entre el peso al momento del ensayo y el peso de la probeta en estado seco, adaptando la norma ISO 13061-1:2014 [58]. La densidad de la madera (ρ_{CH}), correspondiente a un contenido de humedad (CH) (8% en madera sólida y 10% en multimaterial), se calculó con el cociente del peso de la madera y el volumen acondicionados de esta al momento del ensayo, adaptando la norma ISO 13061-2:2014 [59].

2.2. Métodos

Las pruebas de vibraciones transversales consistieron en medir la frecuencia natural de vibración perpendicular a la dirección longitudinal de la probeta [70]. Con tal propósito, se utilizó el medidor de frecuencia *Grindosonic*®. El movimiento de las probetas se inició con un impacto elástico empleando un bastón flexible de 30 g de peso (Figura 2). Las vibraciones fueron registradas con un micrófono y las frecuencias naturales en el primer modo de vibración se leyeron directamente en el aparato con una precisión de 1 Hz. Se realizaron tres impactos y su promedio se consideró como frecuencia.



Figura 2. Pruebas de vibraciones transversales. Probeta de madera sólida.

La cara superior del multimaterial se alineó en la dirección tangencial de la madera mientras que la cara inferior se orientó en la dirección longitudinal. En cada prueba se realizaron tres impactos en el lado superior de la probeta y su promedio se consideró como la frecuencia en la posición A. Una vez terminada la prueba en la posición A, se giró la probeta 180° alrededor de su eje longitudinal y se repitió la experiencia. A esta medición se le consideró como la frecuencia en la posición B. De esta forma, se midieron dos frecuencias por probeta.

Los ensayos dinámicos no destructivos consistieron en el estudio de la probeta modelada como una barra continua, de sección transversal rectangular, con geometría uniforme y estructuralmente homogénea, sometida a vibración transversal sobre apoyos simples e idealizando la madera como un material elástico. Así, el análisis modal se realizó a partir de la ecuación de movimiento (1) [83] en vibraciones transversales de una barra equivalente a la probeta presentada en las Figuras 1 y 2.

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + m_1 \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - \left(m_1 r^2 + \frac{EI m_1}{K' AG} \right) \frac{\partial^4 y}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{m_1^2 r^2}{K' AG} \frac{\partial^4 y}{\partial t^4} = 0 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad de la madera (N m^{-2})

I = Momento de inercia de la sección transversal de la probeta (m^4)

m_l = Masa por unidad de longitud de la probeta (kg m^{-1})

A = Área de la sección transversal de la probeta (m^2)

G = Módulo de rigidez de la madera (N m^{-2})

y = Desplazamiento en la dirección transversal de la probeta (m)

x = Distancia en la dirección longitudinal de la probeta (m)

t = Tiempo (s)

K' = Factor de forma en cortante. (0,833 para probetas prismáticas)

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2), con: $r = \sqrt{I/A}$

En la ecuación (1), el primer término de la izquierda está ligado a la rigidez de la probeta, el segundo a la inercia del movimiento, el tercer término representa el efecto de la inercia de rotación de la sección transversal de la probeta y el cuarto significa el efecto del esfuerzo cortante interno. Una solución numérica de la ecuación (1) para el caso de una probeta de sección rectangular, apoyada sobre soportes rígidos de tipo simple-simple, ha sido aplicada en estudios con madera por [62]. Con esta ecuación (2) se calculó el módulo dinámico:

$$E_{vt} = \frac{4 \pi^2 L^4 f^2 \rho_{CH}}{m^4 r^2} \times \left[1 + \frac{r^2}{L_{vt}^2} K \right] \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

E_{vt} = Módulo dinámico (N m^{-2})

L = Longitud de la probeta (m)

L_{vt} = Distancia entre apoyos (m)

f = Frecuencia natural (Hz)

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3})

r = Radio de giro de la sección transversal de la probeta (m^2)

m, K = Constantes adimensionales (12,65; 49,48)

El índice material se calculó con la ecuación (3) [72]:

$$I_{vt} = \frac{E_{vt}}{\rho_{CH}} \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

I_{vt} = Índice material ($\text{m}^2 \text{s}^{-2}$)

E_{vt} = Módulo dinámico (N m^{-2})

ρ_{CH} = Densidad (kg m^{-3})

2.3. Diseño experimental

Se preparó un diseño completamente al azar y balanceado. La unidad experimental consistió en dos grupos de probetas. Uno de madera sólida y otro de multimaterial. Las variables de respuesta fueron la densidad, la frecuencia, el módulo dinámico (Ecuación 2) y el índice material (Ecuación 3). La elaboración del multimaterial se considera el tratamiento. Para las ocho muestras (cuatro variables $\times$ dos grupos) se calcularon su media (μ), su desviación estándar (σ) y su coeficiente de variación ($CV = \sigma/\mu$). Para verificar la uniformidad de las mediciones entre las frecuencias medidas en las posiciones A y B, se realizó una prueba t de diferencias de medias suponiendo varianzas iguales con la hipótesis nula $H_0: \mu_{fA} = \mu_{fB}$ donde los subíndices se refieren a las frecuencias medidas en las posiciones A y B. Para cada par de muestras independientes (multimaterial versus madera sólida) se realizaron igualmente pruebas t de diferencias

de medias con la hipótesis nula $H_0: \mu_{ms} = \mu_{MM}$ donde los subíndices ms se refieren a datos de la madera sólida y MM a los del multimaterial. Las pruebas estadísticas se realizaron para un nivel de confianza de 95%. Así, el criterio de demarcación fue aceptar diferencias significativas para valores de $P_{(\alpha =$

$0,05) < 0,05$. Se calcularon correlaciones lineales ($y = ax + b$) de los módulos dinámicos como variable dependiente de la densidad y de la frecuencia. Finalmente, se compararon los resultados de esta investigación con los reportados en la bibliografía (Tabla 1).

Tabla 1. Densidad, módulo dinámico e índice material de maderas mexicanas [84].

No.	Especie	ρ_{CH} ($kg\ m^{-3}$)	E_{vt} ($MN\ m^{-2}$)	I_{vt} ($m^2\ s^{-2}$)
1	<i>Abies religiosa</i>	462	7178	15,5
2	<i>Acacia farnesiana</i>	901	13965	15,5
3	<i>Acosmium panamense</i>	1005	16045	16,0
4	<i>Albizia plurijuga</i>	844	13993	16,6
5	<i>Alnus acuminata</i>	541	11436	21,1
6	<i>Andira inermis</i>	658	8843	13,4
7	<i>Caesalpinia platyloba</i>	825	13681	16,6
8	<i>Cedrela odorata</i>	529	8051	15,2
9	<i>Cordia elaeagnoides</i>	878	13536	15,4
10	<i>Cupressus lindleyi</i>	486	8034	16,5
11	<i>Dalbergia granadillo</i>	1147	20236	17,6
12	<i>Dalbergia paloescrito</i>	833	11569	13,9
13	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	467	6224	13,3
14	<i>Fagus mexicana</i>	642	10178	15,9
15	<i>Fraxinus americana</i>	631	10901	17,3
16	<i>Fraxinus uhdei</i>	603	10250	17,0
17	<i>Guazuma ulmifolia</i>	730	8765	12,0
18	<i>Gyrocarpus americanus</i>	395	5340	13,5
19	<i>Juglans pyriformis</i>	728	12187	16,7
20	<i>Lysiloma acapulcensis</i>	893	13269	14,9
21	<i>Pinus douglasiana</i>	538	13828	25,7
22	<i>Pinus pseudostrobus</i>	516	14120	27,4
23	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	866	14077	16,3
24	<i>Psidium sartorianum</i>	789	8906	11,3
25	<i>Quercus scytophylla</i>	852	13922	16,3
26	<i>Quercus spp.</i>	791	14972	18,9
27	<i>Spathodea campanulata</i>	344	3133	9,1
28	<i>Swietenia humilis</i>	757	9098	12,0
29	<i>Swietenia macrophylla</i>	531	8548	16,1
30	<i>Tabebuia chrysantha</i>	1096	17131	15,6
31	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>	598	8342	13,9
32	<i>Tabebuia rosea</i>	621	10660	17,2
33	<i>Tilia mexicana</i>	442	8610	19,5

ρ_{CH} = Densidad; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$.

Para calificar la intensidad de las correlaciones se utilizaron los siguientes valores del coeficiente de determinación: correlación muy alta: $1 \geq R^2 \geq 0,9$; correlación alta: $0,9 > R^2 \geq 0,7$; correlación media: $0,7 > R^2 \geq 0,4$; correlación baja: $0,4 > R^2 \geq 0,2$; y correlación nula: $R^2 < 0,2$. No obstante que el número de probetas

observadas por cada especie fue de 36, cantidad suficiente para considerar en el análisis estadístico la teoría de las grandes muestras, se calculó *a posteriori* el tamaño de la muestra necesario para validar las pruebas estadísticas para un error aceptable del 0,05. El número de probetas se calculó con la ecuación (4) [85].

$$n = 2 \sigma^2 / e^2 \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

n = Tamaño de la muestra

σ = Desviación estándar

e = Error de estimación aceptable (0,05).

3. Resultados y discusión

Para las frecuencias medidas al girar las probetas del multimaterial, la prueba de diferencias de medias resultó con un valor de $P_{(\alpha=0,05)} = 0,961$ lo que indica que no existen diferencias estadísticamente significativas entre las frecuencias medidas en cada una de las dos caras de las probetas.

Este resultado se puede explicar con los argumentos siguientes: las dos láminas de las probetas están colocadas ortogonalmente en relación con las direcciones longitudinal y tangencial de la madera, de tal forma que, durante un ciclo de movimiento, la lámina inferior está solicitada en tensión en la dirección longitudinal, mientras que la lámina superior trabaja en la dirección tangencial, sin embargo, durante un semi-ciclo del primer modo de vibración las distribuciones de los esfuerzos de flexión son principalmente de tensión en la lámina inferior y de compresión en la lámina superior y al completar un ciclo el estado de esfuerzo es opuesto.

Respecto al eje neutro de las probetas, es ahí donde los esfuerzos y deformaciones son máximos y se concentran en la capa formada por la malla y el adhesivo [83]. De tal forma,

en cada ciclo la sollicitación oscila y la frecuencia es simétrica, independientemente de la posición de la probeta. En consecuencia, para el cálculo subsecuente del módulo dinámico y del índice material derivado, se considera el promedio de las dos frecuencias medidas como uno solo y correspondiente a cada probeta.

La caracterización del comportamiento mecánico de la madera con vibraciones transversales es de carácter no destructivo y utiliza la hipótesis fundamental en mecánica de la madera propuesta por [86] acerca de que la madera y los productos fabricados con ella pueden almacenar y disipar energía. Por ejemplo, la propiedad de la madera de almacenar energía es manifestada por la velocidad a la cual una onda mecánica viaja a través de ella.

En contraste, la capacidad de la madera para atenuar una onda mecánica denota su capacidad para disipar energía. Este autor propuso así la hipótesis de que estas propiedades era para almacenar y disipar energía están controladas por los mismos mecanismos que determinan su comportamiento mecánico en condiciones estáticas. Es decir, la estructura molecular y anatómica del material es la base del comportamiento mecánico de la madera. Como consecuencia, es posible relacionar estadísticamente estas propiedades utilizando

métodos de análisis numéricos como las correlaciones estadísticas.

3.1. Tamaño de la muestra

El número de 36 probetas observadas para cada variable de respuesta fue suficiente para considerar la teoría de las grandes muestras

en el análisis. Los tamaños de la muestra calculados con la ecuación (4) indican que el número de unidades observadas satisface también el número de observaciones para las ocho muestras (Tabla 2). Es decir, las mediciones fueron realizadas en muestras homogéneas y representativas.

Tabla 2. Tamaño de las muestras.

Especies	e	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	-	n	n	n	n
Madera sólida	0,05	2	9	35	33
Multimaterial	0,05	1	1	7	6

e = Error de estimación aceptable; ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material; n = Tamaño de la muestra.

El número de mediciones necesarias para satisfacer el error aceptable de la densidad y de la frecuencia requieren pocas probetas en comparación con las del módulo dinámico y del índice material. Este fenómeno es más intenso en la madera sólida que en el multimaterial. Se distinguen dos casos límite para la madera sólida: el módulo dinámico y el índice material. Estos dos parámetros son calculados con las ecuaciones (2) y (3) a partir de las mediciones directas de la densidad y de la frecuencia. En cambio, el módulo dinámico y el índice material son variables derivadas donde la densidad y la frecuencia están implícitas.

3.2. Densidades

La prueba de diferencia de medias indica desigualdades estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} < 0,001$) entre las densidades. Así, la densidad del multimaterial aumenta 4,3% respecto a la de la madera sólida. Esta diferencia puede explicarse por el peso adicional del pegamento y de la malla en el multimaterial.

En contraparte, el coeficiente de variación de la densidad del multimaterial disminuye 24,1% respecto al coeficiente de la madera sólida. Este resultado indica que el multimaterial reduce la variabilidad natural de la madera de *F. crenata* (Tabla 3).

Tabla 3. Densidad, frecuencia, módulo dinámico e índice material de madera sólida y multimaterial.

	ρ_{CH}	f	E_{vt}	I_{vt}
	(kg m ⁻³)	(Hz)	(MN m ⁻²)	(m ² s ⁻²)
Madera sólida de <i>Fagus crenata</i>				
μ	637	1934	13,573	21,31
σ	22	147	2,003	3,07
CV (%)	(3,5)	(7,6)	(14,8)	(14,4)
Multimaterial				
μ	664	2019	14,725	22,16
σ	17	60	984	1,31
CV (%)	(2,6)	(3,0)	(6,7)	(5,9)

ρ_{CH} = Densidad; f = Frecuencia; E_{vt} = Módulo dinámico; I_{vt} = Índice material $\times 10^6$; μ = Media; σ = Desviación estándar; CV = Coeficiente de variación en por ciento.

Las correlaciones entre la densidad y el módulo dinámico (Figura 3) indican un coeficiente de determinación del multimaterial cinco veces mayor que el correspondiente a la madera sólida; y los coeficientes de determinación califican el

multimaterial con una correlación baja y nula para la madera sólida de *F. crenata*. Es decir, en el contexto de la presente investigación, la densidad no es un buen predictor del módulo dinámico.

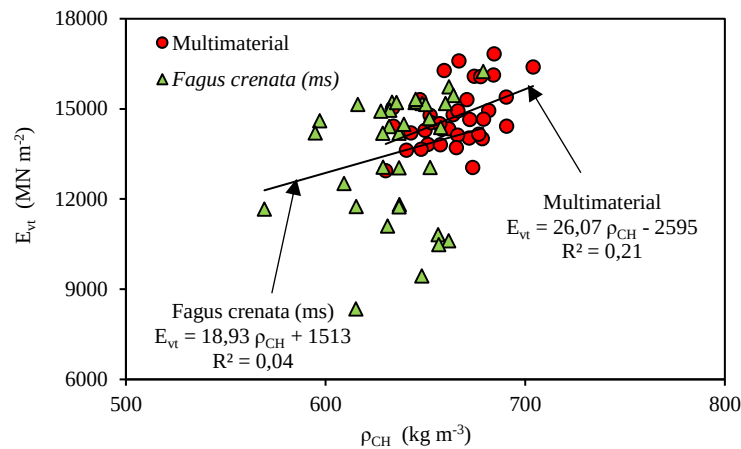


Figura 3. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

El módulo dinámico empleando frecuencias de vibraciones transversales con un aparato similar al de la presente investigación fue determinado por [70]. Estos autores reportan para las maderas *Azalia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$) coeficientes de variación en la densidad de 4,7%, 8,9%, 7,7% y 10,2% respectivamente y para los módulos dinámicos de 10,6%, 9,7%, 14,9% y 15,4%. Estos valores son mayores a los de la densidad y del módulo dinámico de *F. crenata* ($\rho_{CH} = 637 \text{ kg m}^{-3}$) presentados en la Tabla 3. La diferencia puede ser atribuible a la variabilidad entre especies, pero las magnitudes de variación son aceptables en ciencias de la madera.

3.3. Frecuencias

Entre las frecuencias de la madera sólida y del multimaterial, la prueba de medias indica

diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,002$). Así, la frecuencia del multimaterial aumenta 4,4% respecto a la de la madera sólida. Este resultado se explica por las diferencias en dimensiones y masas entre las probetas de madera sólida y del multimaterial.

La frecuencia es un buen predictor del módulo dinámico. El coeficiente de determinación entre estos dos parámetros de la madera sólida califica la correlación como muy alta y para el multimaterial califica como alta (Figura 4). El rango de la frecuencia para la madera sólida es de 535 Hz (Tabla 3). En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 253 Hz; es decir, 50,7% menor, porcentaje que indica que el multimaterial reduce la variabilidad de la frecuencia y se expresa en la disminución de 61,1% del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida.

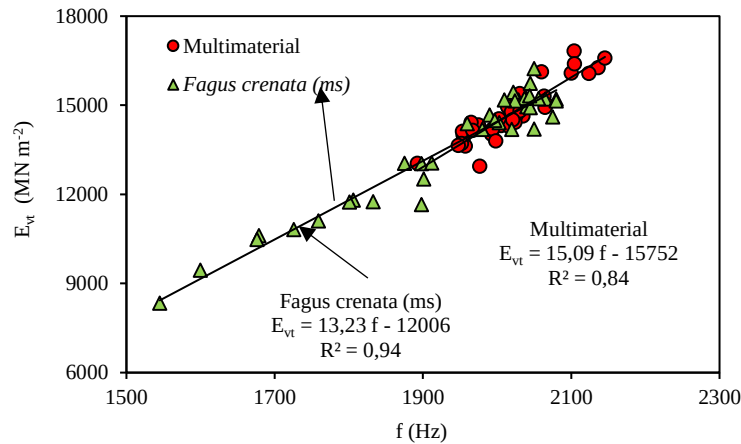


Figura 4. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la frecuencia (f) de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y el multimaterial.

3.4. Módulos dinámicos

La prueba de diferencias de medias entre los módulos dinámicos indica diferencias estadísticamente significativas ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,003$). Así, el módulo dinámico del multimaterial aumenta 8,5% respecto a la de la madera sólida. Este resultado puede explicarse por el efecto del tratamiento de elaboración del multimaterial en el cual se adiciona la rigidez de la malla y su combinación con el adhesivo ligado mecánicamente con la madera de *F. crenata* [28].

El rango del módulo dinámico para la madera sólida es de 7896 MN m^{-2} . En cambio, el rango correspondiente al multimaterial es de 3886 MN m^{-2} , es decir, 50,7% menor. Este porcentaje indica que el multimaterial reduce la variabilidad del módulo dinámico y se expresa en la disminución de -54,7% del coeficiente de variación del multimaterial respecto al de la madera sólida. Este resultado coincide con el de la reducción en la variabilidad de la frecuencia. Así, si disminuye la variación en las mediciones de la frecuencia, se reduce la variación en el módulo dinámico.

La calidad de un sistema de clasificación de resistencia está determinada principalmente

por dos factores: la capacidad de los parámetros medidos para predecir el módulo dinámico y el error de medición de los parámetros predictores. El primero se puede cuantificar mediante análisis de regresión con el coeficiente de determinación (R^2) y el segundo mediante el coeficiente de variación (CV) que representa el error de medición.

Si el análisis de regresión se basa en mediciones realizadas en las mismas condiciones y el mismo aparato, el efecto del error de medición y el coeficiente de variación ya está incluido directamente en el valor R^2 . De lo contrario, si las mediciones se realizan en condiciones de laboratorio diferentes, el efecto del error de medición debe considerarse por separado, al evaluar la efectividad de un determinado sistema de clasificación de resistencia [87]. Este argumento permite proponer que, si dos variables indican una correlación fuerte, la precisión de sus mediciones o cálculo son aceptables. Al mismo tiempo, el incremento o disminución del coeficiente de variación es un indicador del aumento o de la disminución de la variabilidad de los parámetros determinados.

El coeficiente de variación representa la calidad de las mediciones. Sin embargo, este estadístico no explica de manera explícita el

origen de la variabilidad, en este caso, si se trata del error introducido por el instrumento de medición, por el operador y/o por la variabilidad natural atribuible a las características mecánicas de los dos tipos de probetas en estudio. Este argumento indica que la variabilidad natural de los parámetros medidos en la madera sólida de *F. crenata*, disminuye al ser trasformada en multimaterial.

Los valores medios del módulo dinámico de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan cerca de la

tendencia que indica la correlación densidad-módulo dinámico (Figura 5) calculada a partir de los datos de [84]. Asimismo, los módulos dinámicos se sitúan por encima del promedio para maderas mexicanas y son del mismo orden que los reportados por [70] para especies con densidades mayores a las de *F. crenata* y del multimaterial: *Afzelia* sp ($\rho_{CH} = 754 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 12500 \text{ MN m}^{-2}$), *Intsia* sp ($\rho_{CH} = 834 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 17500 \text{ MN m}^{-2}$), *Astronium* sp ($\rho_{CH} = 817 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 16400 \text{ MN m}^{-2}$) y *Millettia* sp ($\rho_{CH} = 835 \text{ kg m}^{-3}$, $E_{vt} = 15800 \text{ MN m}^{-2}$).

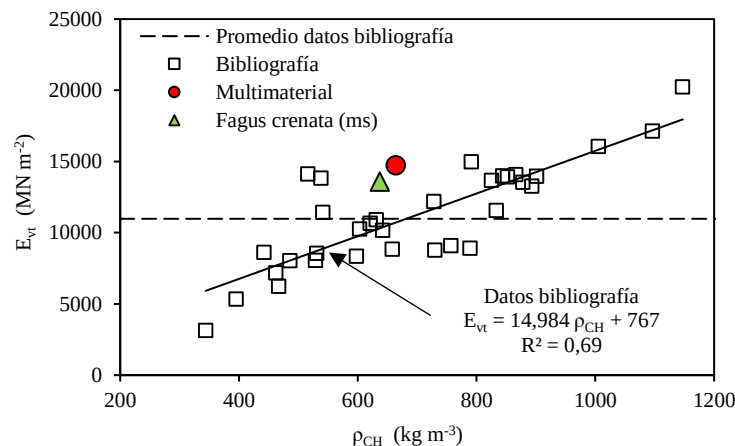


Figura 5. Correlaciones del módulo dinámico (E_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

Para asegurar la integridad estructural de la madera y en consecuencia su funcionamiento como elemento resistente, la industria de la construcción requiere que las especies con potencial para su incorporación en el proceso constructivo estén caracterizadas mecánicamente [88]. La determinación del módulo de elasticidad, determinado por métodos no destructivos, proporciona al ingeniero y/o constructor con madera uno de los parámetros necesarios al cálculo estructural. El módulo de elasticidad derivado de pruebas de vibraciones transversales produce información que puede ser utilizada como índice comparativo de la calidad de una especie en particular y como parámetro de

ingeniería necesario al análisis estructural probabilístico y sísmico [89-90].

3.5. Índices materiales

Para los índices materiales la prueba de comparación de medias indica que no hay diferencia significativa ($P_{(\alpha=0,05)} = 0,131$) entre los índices materiales de *F. crenata* y los del multimaterial (Tabla 3). Sin embargo, la magnitud del índice material del multimaterial aumenta 4,0% respecto a la de la madera sólida. Este parámetro se calcula con la Ecuación (3) de tal forma que, si el módulo dinámico y la densidad se incrementan en el multimaterial, su índice material lo hace proporcionalmente. De

manera análoga a la densidad, frecuencia y módulo dinámico, el coeficiente de variación disminuye -59,0% por el efecto de transformar la madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo.

Los valores medios del índice material de la madera sólida de *F. crenata* y del multimaterial se posicionan en la nube (Figura 6) formada por los datos de [84]. Las magnitudes del índice material de la madera sólida y del multimaterial son mayores a los

reportados por [84] para maderas mexicanas con densidad similar a la de *F. crenata*: *Tabebuia rosea* $I_{vt} = 17,2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$, *Fraxinus americana* $I_{vt} = 17,3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ y *Fagus mexicana* $I_{vt} = 15,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ (Tabla 1). Además, los resultados para *F. crenata* y el multimaterial madera-malla-adhesivo (Tabla 3) son del mismo orden que los reportados como módulo específico por [70] para *Afzelia* sp ($I_{vt} = 16,6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Intsia* sp ($I_{vt} = 21,0 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$), *Astronium* sp ($I_{vt} = 20,1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$) y *Millettia* sp ($I_{vt} = 18,9 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$).

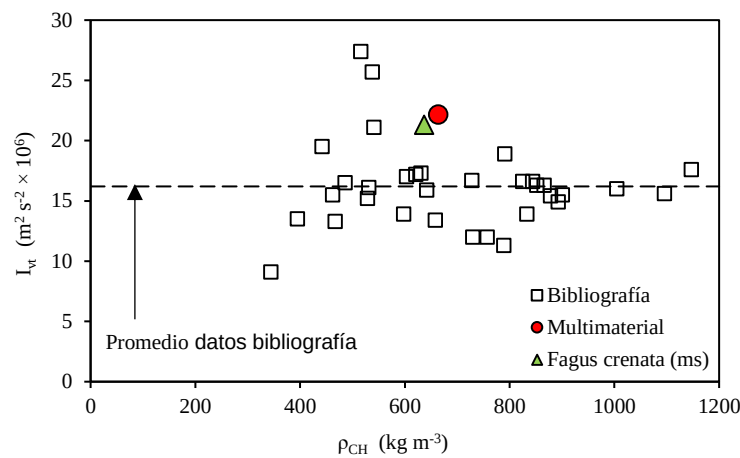


Figura 6. Dispersión del índice material (I_{vt}) en función de la densidad (ρ_{CH}) de datos de la bibliografía. Se indican también los valores promedio de la madera sólida (*Fagus crenata* ms) y del multimaterial de la presente investigación.

En la industria de la construcción, la madera sólida funciona como elemento estructural con el objetivo técnico de minimizar peso y optimizar las propiedades de resistencia. El índice material de la madera interpreta su capacidad elástica ponderada por su densidad. Una de las aplicaciones básicas de este indicador es como referencia para la selección de materiales en el proceso de diseño.

Considerando que el índice material es particular a cada especie, el multimaterial formado por madera de *F. crenata*, malla galvanizada y adhesivo a base de poliuretano muestra un alto valor comparativo con la madera sólida de otras especies. De tal forma, que exhibe un potencial de calidad para su

empleo en construcción y arquitectura con madera. Por ejemplo, el índice material de la madera, derivado de pruebas dinámicas, es útil en el cálculo estructural de componentes cuya función es de aislamiento acústico o disipación de energía, y en el diseño de estructuras expuestas a eventos excepcionales como son los sismos.

Así, para componentes constructivos con restricciones de dimensiones específicas y sometidos a movimientos, o situaciones donde es necesario maximizar la disipación de energía, un alto índice material ofrece ventajas comparativas frente a otro material para su funcionamiento en pisos, muros y techos, y en componentes como las vigas, viguetas y columnas, así como en tableros y/o

placas para revestimiento donde es necesario maximizar la rigidez, pero minimizar la transmisión de sonido y la masa.

De tal forma, el multimaterial madera-malla-adhesivo se posiciona en la tendencia del desarrollo de materiales ecológicos y sustentables derivados y/o compuestos de madera con aplicaciones futuras para materiales de electrónica verde, dispositivos biológicos para aplicaciones energéticas y de almacenamiento, así como de transmisión de información [12, 17, 14, 91-95].

En el mismo contexto, el multimaterial se contrasta favorablemente respecto a la madera sólida de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales reportados por [73] como se observa en la Figura 7. En esta figura, los módulos elásticos de las maderas angiospermas y gimnospermas, así como los materiales compuestos, tanto comerciales como de los autores citados, son determinados en condiciones estáticas. En cambio, los módulos dinámicos de la madera sólida de *F. crenata* y del material son determinados por vibraciones transversales.

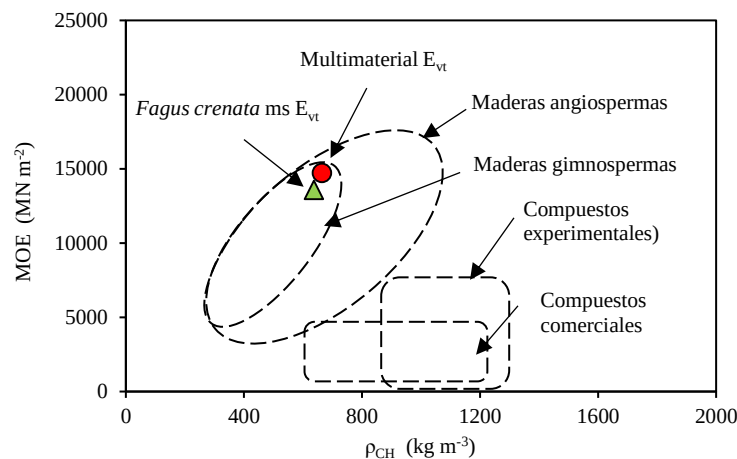


Figura 7. Posicionamiento del multimaterial madera-malla-adhesivo respecto a la madera sólida (ms) de *F. crenata*, maderas angiospermas y gimnospermas, compuestos comerciales y compuestos experimentales. Fuente: elaboración propia y datos de [73].

El empleo de índices materiales que son particulares a componentes trabajando en compresión y flexión puede servir para identificar especies de madera empleadas en proyectos de construcción que, de otro modo, no cumplirían los criterios mínimos para un análisis estructural. Este enfoque sirve para situar en su justa dimensión el empleo para una función, objetivo y restricciones específicas de la especie *F. crenata* y, en el caso de esta investigación, del multimaterial. Así, la selección de una especie de madera empleando índices materiales como criterio de preferencia puede ser útil para especificar los valores mínimos admisibles para el

análisis estructural, así como utilizarse para reglamentos de edificación con madera [96].

La aplicación del multimaterial se amplía hacia la ingeniería, la arquitectura y las ciencias de materiales, como un material flexible en sus características termo-físicas, mecano-acústicas y medio-ambientales [47]. De esta manera, el desarrollo de multimateriales puede contribuir al reciclaje de madera y subproductos de la transformación primaria de árboles, a la valoración de especies con baja apreciación tecnológica para usos estructurales y al

aprovechamiento de biomasa forestal como arbustos y matorrales [54-55].

4. Conclusiones

Las pruebas de vibraciones transversales son eficientes para determinar el módulo dinámico en probetas de pequeñas dimensiones de *F. crenata* y del multimaterial madera-malla-adhesivo. El tamaño de la muestra de 36 probetas es suficiente para determinar el módulo dinámico. Las magnitudes de la densidad, del módulo dinámico y del índice material son similares a los reportados en la bibliografía para maderas con densidades semejantes. La densidad no es un buen predictor del módulo dinámico; en cambio, la frecuencia sí lo es.

La transformación de madera sólida en un multimaterial madera-malla-adhesivo incrementa su módulo dinámico y su índice material. Además, disminuye la variabilidad natural de la madera de *F. crenata*. Asimismo, la densidad del multimaterial aumenta respecto a la de la madera sólida.

La prospectiva de los resultados permite proponer la utilización del multimaterial en elementos estructurales de diferentes formas, secciones y longitudes. Sus posibles usos industriales son:

- La industria de la Arquitectura,
- La industria de la construcción,
- La industria de la restauración de bienes inmuebles,
- La industria de muebles y utensilios,
- La industria de diseño y productos de madera,
- La industria automotriz y naval,
- La industria del embalaje y transporte.

La madera puede ser sustituida por otra especie y/o por una clase de compuestos de madera tales como tableros de partículas, de fibras y de astillas. Su orientación y acomodo pueden ser modificados para mejorar sus

propiedades de anisotropía a conveniencia. Adicionalmente, se puede aumentar el número de piezas de madera y mallas y conformar un material multicapas. La madera como componente del multimaterial puede a su vez ser modificada con procesos de impregnación, densificado y plastificado para mejorar su resistencia al biodeterioro, al fuego, así como para disminuir su higroscopía, heterogeneidad y variabilidad natural.

5. Agradecimientos

La investigación estuvo patrocinada por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México. La madera de *Fagús crenata* fue donada por el Instituto de Tecnología de la Madera de la Universidad Prefectoral de Akita, Japón.

6. Referencias

- [1] Richter, C. (2015). *Wood Characteristics. Description, Causes, Prevention, Impact on Use and Technological Adaptation*. Heidelberg: Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-07422-1>
- [2] Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U. (...) y Scherman, O. (2017). The wood from the trees: The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333-359.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- [3] Jacob, M., Harrington, J., y Robinson, B. (2018). *The Structural Use of Timber Handbook for Eurocode 5: Part 1-1*. Dublin: COFORD. Recuperado de <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/TimberHandbook5Part130418.pdf>

- [4] American Institute of Timber Construction. (2012). *Timber Construction Manual*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- [5] Borgström, E. (Ed.). (2016a). *Design of timber structures. Structural aspects of timber construction. Volumen 1*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-1-2016.pdf>
- [6] Borgström, E. (Ed.). (2016b). *Design of timber structures. Rules and formulas according to Eurocode 5 (Volume 2)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-2-2016.pdf>
- [7] Borgström, E. (Ed.). (2016c). *Design of timber structures. Examples. (Volume 3)*. Stockholm: Swedish Forest Industries Federation. Recuperado de <https://www.swedishwood.com/siteassets/5-publikationer/pdf/design-of-timber-structures-3-2016.pdf>
- [8] Sotomayor Castellanos, J. R., y Correa Jurado, S. (2016). Retención de sales de boro en la madera y su efecto en el módulo de elasticidad dinámico. *Revista Científica*. 24(1): 1-19. <https://doi.org/10.14483/10.14483/udistrital.jour.RC.2016.24.a9>
- [9] Fink, G., Honfi, D., Kohler, J., y Dietsch, P. (Eds.). (2018). *Basis of Design Principles for Timber Structures. A state-of-the-art report by COST Action FP1402 / WG 1*. Germany: Shaker Verlag Aachen. Recuperado de <https://www.cost.eu/wp-content/uploads/2018/11/Basis-of-Design-Principles-for-Timber-Structures.pdf>
- [10] Sandberg, D., Haller, P., y Navi, P. (2013). Thermo-hydro and thermo-hydro-mechanical wood processing: An opportunity for future environmentally friendly wood products, *Wood Material Science & Engineering*, 8(1), 64-88. <http://dx.doi.org/10.1080/17480272.2012.751935>
- [11] Ormondroyd, G. A., Spear, M., y Curling, S. F. (2015). Modified wood: Review of efficacy and service life testing. *Constructions Materials, Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Paper 1400072. <http://dx.doi.org/10.1680/coma.14.00072>
- [12] Song, J., Chen, C., Wang, C., Kuang, Y., Li, Y., Jiang, F., (...) y Hu, L. (2017). Super flexible Wood. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9(28), 23520-23527. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b06529>
- [13] Hill, C. A. S. (2006). *Wood Modification, Chemical, Thermal and Other Processes*. West Sussex: John Wiley & Sons.
- [14] Sandberg, D., Kutnar, A., y Mantanis, G. (2017). Wood modification technologies - a review. *iForest*, 10, 895-908. <http://dx.doi.org/10.3832/ifor2380-010>
- [15] Niederwestberg, J., Zhou, J., y Chui, Y.H. (2018). Mechanical Properties of Innovative, Multi-Layer Composite Laminated Panels. *Buildings*, 8, 142. <https://doi.org/10.3390/buildings8100142>
- [16] Jorda, J., Kain, G., Barbu, M. C., Haupt, M., y Krišt'ák, L. (2020). Investigation of 3D-Moldability of Flax Fiber Reinforced Beech Plywood. *Polymers*, 12, 2852. <https://doi.org/10.3390/polym12122852>
- [17] Icimoto, F. H., Calil Neto, C., Ferro, F. S., Borges de Macedo, L., Christoforo, A. L., Lahr, F. A. R., y Calil Júnior, C. (2016). Influence of Lamellar Thickness on Strength

and Stiffness of Glued Laminated Timber Beams of *Pinus oocarpa*. *International Journal of Materials Engineering*, 6(2), 51-55.

<https://doi.org/10.5923/j.ijme.20160602.05>

[18] Corigliano, P., Crupi, V., Epasto, G., Guglielmino, E., Maugeri, N., y Marin, A. (2017). Experimental and theoretical analyses of Iroko wood laminates. *Composites Part B*, 112, 251-264.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.12.049>

[19] Merk, V., Chanana, M., Gierlinger, N., Hirt, A. M., y Burgert, I. (2014). Hybrid Wood Materials with Magnetic Anisotropy Dictated by the Hierarchical Cell Structure. *ACS Applied Materterials & Interfaces*, 6, 9760-9767.
<http://dx.doi.org/10.1021/am5021793>

[20] Marzi, T. (2015). Nanostructured materials for protection and reinforcement of timber structures: A review and future challenges. *Construction and Building Materials*, 97, 119-130.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016>

[21] Wei, J., Rao, F., Zhang, Y., Yu, W., Hse, C., y Shupe, T. (2019). Laminating wood fiber mats into a densified material with high performance. *Materials Letters*, 253, 358-361.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.06.097>

[22] Raftery, G. M., y Rodd, P. D. (2015). FRP reinforcement of low-grade glulam timber bonded with wood adhesive. *Construction and Building Materials*, 91, 116-125.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.026>

[23] Borri, A., Corradi, M., y Grazini, A. (2005). A method for flexural reinforcement

of old wood beams with CFRP materials. *Composites: Part B*, 36, 143-153.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.04.013>

[24] Corradi, M., Righetti, L., y Borri, A. (2015). Bond Strength of Composite CFRP Reinforcing Bars in Timber. *Materials*, 8, 4034-4049.
<http://dx.doi.org/10.3390/ma8074034>

[25] Reis, J. P., De Moura, M. F. S. F., Silva, F. G. A., y Dourado, N. (2018). Dimensional optimization of carbon-epoxy bars for reinforcement of wood beams. *Composites Part B*, 139, 163-170.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.046>

[26] Byeon, J. W., Cho, Y. J., Lee, J. R., y Park, H. M. (2016). Static Bending Strength Performance of Domestic Wood-Concrete Hybrid Laminated Materials. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 44(1), 48-56.
<http://dx.doi.org/10.5658/WOOD.2016.44.1.48>

[27] De Lima, A. J. M., Iwakiri, S., y Trianoski, R. (2020). Determination of the physical and mechanical properties of wood-cement boards produced with *Pinus* spp and pozzolans waste. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 22(4), 527-536.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000411>

[28] Clauß, S., Gabriel, J., Karbach, A., Matner, M., y Niemz, P. (2011). Influence of the adhesive formulation on the mechanical properties and bonding performance of polyurethane prepolymers. *Holzforschung*, 65, 835-844.
<http://dx.doi.org/10.1515/HF.2011.095>

[29] Gáborik, J., Gaff, M., Ruman, D., Záborský, V., Kašíčková, V., y Sikora, A.

(2016). Adhesive as a factor affecting the properties of laminated Wood. *BioResources*, 11(4), 10565-10574. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.11.4.10565-10574>

[30] Jasieńko, J., y Nowak, T. P. (2014). Solid timber beams strengthened with steel plates – Experimental studies. *Construction and Building Materials*, 63, 81-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.020>

[31] Cañola, H. D., Echavarría, C., y Echavarría, B. (2018). Glulam beams reinforced with punched metal plates. *DYNA*, 85(204), 127-133. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67847>

[32] Jorge, F. C., Pereira, C., y Ferreira, J. M. F. (2004). Wood-cement composites: a review. *Holz Roh Werkst*, 62, 370-377. <http://dx.doi.org/10.1007/s00107-004-0501-2>

[33] Na, B., Wang, Z., Wang, H., y Lu, X. (2014). Wood-cement compatibility review. *Wood Research*, 59(5), 813-626. <http://www.woodresearch.sk/wr/201405/10.pdf>

[34] Saba, N., Jawaid, M., Alothman, O. Y., y Paridah. M. T. (2016). A review on dynamic mechanical properties of natural fibre reinforced polymer composites. *Construction and Building Materials*, 106, 149-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.075>

[35] Qi, Y., Xiong, W., Liu, W., Fang, H., y Lu, W. (2015). Experimental Study of the Flexural and Compression Performance of an Innovative Pultruded Glass-Fiber-Reinforced Polymer-Wood Composite Profile. *PLoS ONE*, 10(10), e0140893.

<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0140893>

[36] Nadir, Y., Nagarajan, P., Ameen, M., y Arif, M. (2016). Flexural stiffness and strength enhancement of horizontally glued laminated wood beams with GFRP and CFRP composite sheets. *Construction and Building Materials*, 112, 547-555. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.133>

[37] Kusnindar., Dewi, S. M., Soehardjono, A., y Wisnumurti. (2018). Performance of glue laminated timber beams composed of sengon wood (*Albizia falcatara*) and coconut wood (*Cocos nucifera*) with nylon-threads reinforcement. *MATEC Web of Conferences*, 195, 02029. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819502029>

[38] Stoeckel, F., Konnerth, J., y Gindl-Altmutter, W. (2013). Mechanical properties of adhesives for bonding wood - A review. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 45, 32-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.03.013>

[39] Campilho, R. D. S. G., De Moura, M. F. S. F., Barreto, A. M. J. P., Morais, J. J. L., y Domingues, J. J. M. S. (2010). Experimental and numerical evaluation of composite repairs on wood beams damaged by cross-graining. *Construction and Building Materials*, 24, 531-537. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.006>

[40] Dietsch, P., y Brandner, R. (2015). Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – A state-of-the-art report. *Construction and Building Materials*, 97, 78-89. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>

- [41] Steiger, R., Serrano, E., Stepinac, M., Rajčić, V., O'Neill, C., McPolin, D., y Widmann, R. (2015). Strengthening of timber structures with glued-in rods. *Construction and Building Materials*, 97, 90-105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.097>
- [42] Rangavar, H. (2017). Wood-Cement Board Reinforced with Steel Nets and Woven Hemp Yarns: Physical and Mechanical Properties. *Drvna Industrija*, 68(2), 121-128. <http://dx.doi.org/10.5552/drind.2017.1631>
- [43] Toğay, A., Döngel, N., Söğütü, C., Ergin, E., Uzel, M., y Güneş, S. (2017). Determination of the Modulus of Elasticity of Wooden Construction Elements Reinforced with Fiberglass Wire Mesh and Aluminum Wire Mesh. *Bioresources*, 12(2), 2466-2478. <http://dx.doi.org/10.15376/BIORES.12.2.2466-2478>
- [44] Karampour, H., Bismire, A., Bourges, M., Bailleres, H., Gilbert, B. P., Gunalan, S., (...) y Guan, H. (2018). Experimental investigation on the structural performance of timber-filled tubular steel stub columns. *2018 World Conference on Timber Engineering*, Seoul, Republic of Korea. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/327838307_experimental_investigation_on_the_structural_performance_of_timber-filled_tubular_steel_stub
- [45] Qiao, Q., Yang, Z., y Mou, B. (2020). Experimental study on axial compressive behavior of CFRP confined square timber filled steel tube stub columns. *Structures*, 24, 823-834. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.02.007>
- [46] Milner, H. R. (2009). Sustainability of engineered wood products in construction. En J. M. Khatib (Ed.). *Sustainability of Construction Materials* (pp. 184-212). Cambridge: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. <https://doi.org/10.1533/9781845695842.184>
- [47] Asdrubali, F., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., y Grazieschi, G. (2017). A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*, 114, 307-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.033>
- [48] Caruso, M. C., Menna, C., Asprone, D., Prota, A., y Manfredi, G. (2017). Methodology for Life-Cycle Sustainability Assessment of Building Structures. *ACI Structural Journal*, 114(2), 323-336. <http://dx.doi.org/10.14359/51689426>
- [49] Li, R., Natsuki, T., y Ni, Q. Q. (2015). A novel dynamic stress analysis in bimaterial composite with defect using ultrasonic wave propagation. *Composite Structures*, 132, 255-264. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.04.046>
- [50] Kohl, D., Link, P., y Böhm, S. (2016). Wood as a Technical Material for Structural Vehicle Components. *Procedia CIRP*, 40, 557-561. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.133>
- [51] Kohl, D., Long, T. H. N., y Böhm, S. (2017). Wood-Based Multi-Material Systems for Technical Applications – Compatibility of Wood from Emerging and Developing Countries. *Procedia Manufacturing*, 8, 611-618. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.02.078>
- [52] Kohl, D., Von Boyneburgk, C., Feldmann, M., Heim, H. P., y Böhm, S. (2018). Characterization of wood-based multi-material systems under dynamic impact

stress. *Wood Material Science & Engineering*, 15(3), 130-139. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1501605>

[53] Żmijewski, T., y Wojtowicz-Jankowska, D. (2017). Timber - Material of the Future - Examples of Small Wooden Architectural Structures. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 245(8), 082019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082019>

[54] Papadopoulos, A. N. (2020a). Advances in Wood Composites. *Polymers*, 12, 1-8. <https://doi.org/10.3390/polym12010048>

[55] Papadopoulos, A. N. (2020b). Advances in Wood Composites II. *Polymers*, 20, 1-4. <https://doi.org/10.3390/polym12071552>

[56] American National Standards Institute [ANSI]. (2018). ANSI 405-2018: *Standard for Adhesives for Use in Structural Glued Laminated Timber*. Washington: American National Standards Institute.

[57] American National Standards Institute [ANSI]. (2020). ANSI 117-2020: *Standard Specification for Structural Glued Laminated Timber of Softwood Species*. Washington: American National Standards Institute.

[58] International Organization for Standardization [ISO]. (2014a). ISO 13061-1:2014. *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical*. Geneva: International Organization for Standardization.

[59] International Organization for Standardization [ISO]. (2014b). ISO 13061-2:2014. *Physical and mechanical properties of wood. Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests*. Geneva:

International Organization for Standardization.

[60] International Organization for Standardization [ISO]. (2020). ISO 16978:2003. *Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*. Geneva: International Organization for Standardization.

[61] Kielmann, B. C., Militz, H., y Mai, C. (2013). Strength Changes in Ash, Beech and Maple Wood Modified with a N-Methylol Melamine Compound and a Metal-Complex Dye. *Wood Research*, 58(3), 343-350. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/201303/02.pdf>

[62] Faydi, Y., Brancheriau, L., Pot, G., y Collet, R. (2017). Prediction of Oak Wood Mechanical Properties Based on the Statistical Exploitation of Vibrational Response. *BioResources*, 12(3), 5913-5927. <https://doi.org/10.15376/biores.12.3.5913-5927>

[63] Bardak, T. (2019). Effects of Different Advanced Engineering on Deformation Behaviour of Wood Structural Materials. *Bioresources*, 14(1), 180-192. <http://dx.doi.org/10.15376/biores.14.1.180-192>

[64] Wang, B., Bachtar, E. V., Yan, L., Kasal, B., y Fiore, V. (2019). Flax, Basalt, E-Glass FRP and Their Hybrid FRP Strengthened Wood Beams: An Experimental Study. *Polymers*, 11(8), 1255-1270. <http://dx.doi.org/10.3390/polym11081255>

[65] Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. F., Zhou, L., y Feng, D. (2016). Measurement of Dynamic Viscoelasticity of Full-Zise Wood Composites Panels Using a Vibration Testing Method. *BioResources*, 11(2), 4593-4604.

Recuperado de
https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_11/BioRes_11_2_4593_Guan_ZHZF_Meas_Dynamic_Viscoelasticity_Wood_Comp_Vibration_Method_9199.pdf

[66] Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., y Crews, K. (2016). A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. *Construction and Building Materials*, 102, 963-976. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.195>

[67] De Cicco, D., y Taheri, F. (2018). Use of a Simple Non-Destructive Technique for Evaluation of the Elastic and Vibration Properties of Fiber-Reinforced and 3D Fiber-Metal Laminate Composites. *Fibers*, 6(1), 14-37. <http://dx.doi.org/10.3390/fib6010014>

[68] Alfredsen, G., y Larnøy, E. (2006). Dynamic MOE testing of wood: the influence of wood protecting agents and moisture content on ultrasonic pulse and resonant vibration. *Wood Research*, 51(1), 11-20. Recuperado de <http://www.woodresearch.sk/wr/200601/02.pdf>

[69] Ghosh, S. C., Miltz, H., y Mai, C. (2008). Decay resistance of treated wood with functionalized commercial silicones. *BioResources*, 3(4), 1303-1314. Recuperado de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_03/BioRes_03_4_1303_Ghosh_MM_Decay_Resis_Treated_Wood_Silicones_313.pdf

[70] Baar, J., Tippner, J., y Gryc, V. (2016). Wood anatomy and acoustic properties of selected tropical hardwoods. *IAWA Journal*, 37(1), 69-83. <https://doi.org/10.1163/22941932-20160121>

[71] Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. London: Butterworth-Heinemann.

[72] Král, P., Klímek, P., Mishra, P. K., Wimmer, R., y Děcký, D. (2015). Specific modulus and density profile as characterization criteria of prefabricated wood composite materials. *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 63(2), 433-438. <http://dx.doi.org/10.11118/actaun201563020433>

[73] Dias, B. Z., y De Alvarez, C. E. (2017). Mechanical properties: wood lumber versus plastic lumber and thermoplastic composites. *Ambiente Construído*, 17(2), 201-219. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212017000200153>

[74] Konopka, D., Gebhardt, C., y Kaliske, M. (2017). Numerical modelling of wooden structures. *Journal of Cultural Heritage*, 27S, S93-S102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.09.008>

[75] Darzi, S., Karampoura, H., Gilbert, B. P., y Bailleres, H. (2018). Numerical study on the flexural capacity of ultra-light composite timber sandwich panels. *Composites Part B: Engineering*, 155, 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.022>

[76] Singh, N., Rana, A., y Badhotiya, G. K. (2021). Manufacturing processes for the development of engineered wood – A mini-review. *Materials Today: Proceedings*, 1-4. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.612>

[77] Song, J., Chen, C., Zhu, S., Zhu, M., Dai, J., Ray, U., (...) y Hu, L. (2018). Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature*, 554, 224-239. <https://doi.org/10.1038/nature25476>

- [78] Naruse, K. (2003). Estimation of shear moduli of wood by quasi-simple shear tests. *Journal of Wood Science*, 49(6), 479-484. <http://dx.doi.org/10.1007/s10086-003-0515-0>
- [79] Sotomayor Castellanos, J. R., Macedo Alquicira, I., y Chávez García, H. L. (2020). Variabilidad en las densidades, las velocidades del ultrasonido y los módulos dinámicos en tres maderas mexicanas y tres maderas japonesas. *Ingeniería y Desarrollo*, 38(2), 282-299. <https://doi.org/10.14482/inde.38.2.624.15>
- [80] Macedo Alquicira, I., Sotomayor Castellanos, J. R., y Castro Sánchez, F. J. (2019). Laminated wood and multimaterial wood – adhesive meshas replacements of solid wood in restoration of historical buildings, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 711-718. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-711-2019>
- [81] Yelle D. J., y Stirgus, A. M. (2016). Influence of Anatomical, Physical, and Mechanical Properties of Diffuse-Porous Hardwoods on Moisture Durability of Bonded Assemblies. General Technical Report FPL-GTR-244. Madison: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. <https://doi.org/10.2737/FPL-GTR-244>
- [82] Pizzi, A., Papadopoulos, A. N., y Policardi, F. (2020). Wood Composites and Their Polymer Binders. *Polymers*, 12, 1115. <https://doi.org/10.3390/polym12051115>
- [83] Weaver, W. Jr., Timoshenko, S. y Young, D. H. (1990). *Vibration problems in engineering*. New York: Wiley.
- [84] Sotomayor Castellanos, J. R. (2019). Módulos de elasticidad e índices de calidad de maderas mexicanas. Síntesis de datos del Laboratorio de Mecánica de la Madera. *Investigación e Ingeniería de la Madera*, 15(1), 3-64. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/335665376_Modulos_de_elasticidad_e_indices_de_calidad_de_maderas_mexicanas_Sintesis_de_datos_del_Laboratorio_de_Mecanica_de_la_Madera
- [85] Gutiérrez Pulido, H. y De La Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hill.
- [86] Jayne, B. A. (1959). Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9(11), 413-416.
- [87] Hanhijärvi, A., Ranta-Maunus, A., y Turk, G. (2005). *Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Report of the Combigrade-project, phase 1*. Espoo, Finland: VTT Publications 568.
- [88] Joint Committee on Structural Safety. (2006). *Probabilistic model code. Part 3.5-Timber*. Joint Committee on Structural Safety.
- [89] Dietsch, P. y Köhler, J. (2010). *Assessment of Timber Structures. Modelling of the Performance of Timber Structures*. European Science Foundation. Herzogenrath: Shaker Verlag.
- [90] Sousa, H. S., Sørensen J. D., Kirkegaard, P. H., Branco, J. M., y Lourenço, P. B. (2013). On the use of NDT data for reliability-based assessment of existing timber structures. *Engineering Structures*, 56, 298-311. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.014>
- [91] Kües, U. (Ed.). (2007). *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts*. Göttingen:

Universitätsverlag Göttingen.
<https://doi.org/10.17875/gup2007-262>

[92] Zhu, H., Luo, W., Ciesielski, P. N. Fang, Z., Zhu, J. Y., Henriksson, G., (...) y Hu, L. (2016). Wood-Derived Materials for Green Electronics, Biological Devices, and Energy Applications. *Chemical Reviews*, 116, 9305-9374.

<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00225>

[93] Mitchell G., Gaspar F., Mateus A., Mahendra V., y Sousa D. (2018). Advanced Materials from Forests. En L. Martínez, O. Kharissova, B. Kharisov (Eds). *Handbook of Ecomaterials*. Cham: Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_189-1

[94] Sun, W., Shen, H., y Cao, J. (2016). Modification of wood by glutaraldehyde and poly (vinyl alcohol). *Materials and Design*, 96, 392-400.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.044>

[95] Labans, E., Kalnins, K., y Bisagni, C. (2019). Flexural behavior of sandwich panels with cellular wood, plywood stiffener/foam and thermoplastic composite core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 21(2), 784-805.
<https://doi.org/10.1177/1099636217699587>

[96] Sotomayor Castellanos, J. R. (2018). Índices materiales en flexión estática de maderas mexicanas con potencial para uso en la construcción. *Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo*, 6(2), 45-52. Recuperado de <http://www.revistas-conacyt.unam.mx/revistasomim/index.php/MTyD/article/view/131/85>



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Estudio exploratorio de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) como actividad productiva del valle de Mexicali, México

Exploratory study of alfalfa (*Medicago sativa* L.) as a productive activity in the Mexicali valley, Mexico

Michel-López, C.Y.^{a*}, Caballero-Julián, S.^a, Flores-Garivay, R.^a, Lara-Rivera, A.L.^b, Morales-Hernández, J.C.^c, Zambrano-Reyes, C.^d

^a Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), Carretera a Delta s/n Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. CP. 21705.

^b Facultad de Ciencias Biológicas, Universidad Autónoma de Nuevo León, Av. Universidad S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, Nuevo León, CP. 66450.

^c Centro Universitario de la Costa, Departamento de Ciencias Exactas. Av. Universidad de Guadalajara No. 203, Delegación Ixtapa, Puerto Vallarta, Jalisco, México. CP. 48280.

^d Distrito de Desarrollo Rural 002, Río Colorado, Sonora, México CP. 21100.

michelc@uabc.edu.mx*; sara_caju@hotmail.com; rodrigo.flores.garivay@uabc.edu.mx; alarar@uanl.edu.mx; julio.morales@academicos.udg.mx; carlos.zambranor@bc.agricultura.gob.mx

Innovación tecnológica: Identificación de variedades de importancia agrícola y su impacto en la producción pecuaria y biotecnológica.

Área de aplicación industrial: Uso y manejo de los sistemas productivos de alfalfa en las regiones áridas.

Recibido: 09 enero 2023

Aceptado: 29 marzo 2023

Abstract

Currently, the regional production of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in the Mexicali Valley stands as one of the main agricultural and economic activities. Considered the queen of forage crops, alfalfa production in the Baja California area has crossed borders, positioning itself as one of the main export products. However, information about the productive aspects is limited. Therefore, the main objective of the study was to carry out an analysis of the productive activity of alfalfa production systems in the Mexicali Valley based on semi-structured surveys. The study was carried out in the agricultural area of the Mexicali Valley, where 13 production units distributed among six communal farms were visited; producers were personally surveyed. The analyzes revealed that the CUF-101 variety has remained the main one throughout all production units; the availability of

water is the main limitation faced by farmers and they highlighted the importance of water for their development and production in the state. Therefore, the production units of the alfalfa systems need to be reassessed, analyzed and explored for a better development and use of the resource in Baja California.

keywords: alfalfa producers; surveys; forage; research; production.

Resumen

Actualmente la producción regional de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Mexicali se posiciona como una de las principales actividades agrícolas y económicas. Considerada la reina de los forrajes, la producción de alfalfa en la zona de Baja California ha sobrepasado las fronteras posicionándose como uno de los principales productos de exportación. Sin embargo, la información acerca de los aspectos productivos es limitada. Por lo anterior, el objetivo del estudio fue realizar un análisis de la actividad productiva que manejan los sistemas de producción de alfalfa en el Valle de Mexicali con base en encuestas semiestructuradas. El estudio se llevó a cabo en la zona agrícola del Valle de Mexicali, donde se visitaron 13 unidades de producción distribuidas entre seis ejidos; los productores fueron encuestados de manera personal y los datos fueron analizados utilizando estadística descriptiva. Los análisis revelaron que la variedad CUF-101 se ha mantenido como la principal a lo largo de todas las unidades de producción; la disponibilidad de agua es la principal limitante a la que se enfrentan los productores y resaltaron la importancia de la misma para su desarrollo y producción en el estado. Por consiguiente, las unidades de producción de los sistemas de alfalfa requieren ser revalorados, analizados y explorados para un mejor desarrollo y aprovechamiento del recurso en Baja California.

Palabras clave: Productores de alfalfa, Encuestas, Forraje, Investigación, Producción.

I. Introducción

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) conocida como la reina de los forrajes, es una de las leguminosas forrajeras perennes más importantes a nivel mundial debido a su calidad nutricional y su capacidad para mejorar la fertilidad del suelo ⁽¹⁾. Es la más utilizada para la cría de ganado bovino lechero en regiones áridas, semiáridas y subtropicales de México y el mundo ⁽²⁾. Es una especie de alto rendimiento que puede regenerar rápidamente tallos nuevos después de cosechada, esto a su vez permite que pueda ser cosechada en múltiples ocasiones durante su temporada de crecimiento ⁽³⁾.

La mayor superficie sembrada y cosechada de alfalfa se encuentra en los estados de Jalisco, Hidalgo, Guanajuato y en cuarto lugar por producción nacional está Baja California con 15.006 toneladas por hectárea al término de cosecha en el 2022; y en menor proporción los estados de Coahuila, Durango, Estado de México, Puebla y Tlaxcala ⁽⁴⁾. Así mismo, en el Valle de Mexicali la alfalfa es el tercer cultivo de mayor importancia, por superficie establecida, junto con el trigo y el algodón. En el año 2020, se reportó para el Valle de Mexicali una producción de 536 mil 838 toneladas de forraje verde en una superficie de 35 mil 708 hectáreas sembradas durante todo el año. El Valle es una de las zonas

agrícolas más importantes del noroeste de México, y la alfalfa es el tercer cultivo de mayor importancia para Mexicali debido a la superficie establecida, y que, en conjunto con el trigo y el algodón, destaca como el principal cultivo forrajero perenne de exportación de la región ^(5,6).

El cultivo de alfalfa ha desempeñado un papel importante en la producción animal debido a su alto contenido de proteína y minerales, así como gran palatabilidad y alta digestibilidad en un gran número de especies animales ⁽⁷⁾. Sin embargo, su uso en los sistemas de producción ha sufrido cambios debido a las variaciones climáticas. Adicionalmente, existen estudios que han demostrado que la sequía, la alta salinidad y el suministro de agua, son los principales factores que afectan el crecimiento y rendimiento de la alfalfa en las regiones áridas y semiáridas ^(8,9). A su vez, estudios recientes realizados en diferentes ambientes agroclimáticos han permitido identificar a las variedades que mejor se adaptan a climas y suelos específicos, además se tiene demostrado que los factores genéticos y ambientales contribuyen al rendimiento del cultivo ⁽¹⁰⁾. Sin embargo, en México y particularmente en el Valle de Mexicali, existe poca información sobre los parámetros productivos de las variedades de alfalfa que se comercializan, por lo anterior, el objetivo principal del estudio fue realizar un análisis de la actividad productiva que manejan los sistemas de producción de alfalfa en el Valle de Mexicali.

II. Materiales y equipos

2.1 Zona de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la región del Valle de Mexicali que se localiza en el extremo noroeste de México, en la región deltaica del río Colorado, al margen derecho del afluente; ubicado entre los paralelos 32° 43' 7.2" y 31° 38' 52.3" de latitud norte y 115° 48' 54.2" y 114° 43' 8.9"

de longitud oeste ⁽¹¹⁾. Presenta una superficie de aproximadamente 3,709.0 km² y se encuentra enclavado en una amplia cuenca de origen tectónico formada por sedimentos producto del material depositado por el Río Colorado y de los abanicos aluviales de la Sierra Cucapah ⁽¹²⁾.

El Valle de Mexicali es una zona árida con un clima extremo cuya temperatura varía entre 2 °C en invierno y 47 °C en verano, con lluvias muy escasas que responden a una precipitación media anual de 60 milímetros cúbicos ⁽¹³⁾. Tiene la peculiaridad de ser un área agrícola de riego, fuertemente intervenida por la acción humana y cuya cubierta vegetal original ha sido removida. La vegetación original corresponde al matorral desértico sonorense. Las áreas agrícolas donde se siembra algodón, alfalfa, gramíneas para forraje y grano representan el principal uso de la tierra ⁽¹⁴⁾.

2.2 Datos de campo

La investigación se basó en un enfoque mixto (cuantitativo y cualitativo) con alcance descriptivo y de temporalidad transversal, bajo las premisas de un método hipotético-deductivo ⁽¹⁵⁾. La información obtenida en el presente estudio se obtuvo a partir de la aplicación de encuestas a productores de alfalfa del Valle de Mexicali y fue analizada mediante estadística descriptiva en porcentaje. Las encuestas semiestructuradas fueron diseñadas para obtener información acerca de las prácticas actuales del cultivo y que serán necesarias para el establecimiento de objetivos particulares en pro de programas de fitomejoramiento de la alfalfa producida en el Valle, con la finalidad de poder guiar a los productores en la selección y manejo de las variedades para el mejoramiento de sus predios. Las unidades de producción seleccionadas para realizar las encuestas se encuentran localizadas dentro de los

principales ejidos productores de alfalfa del Valle de Mexicali (Figura 1).

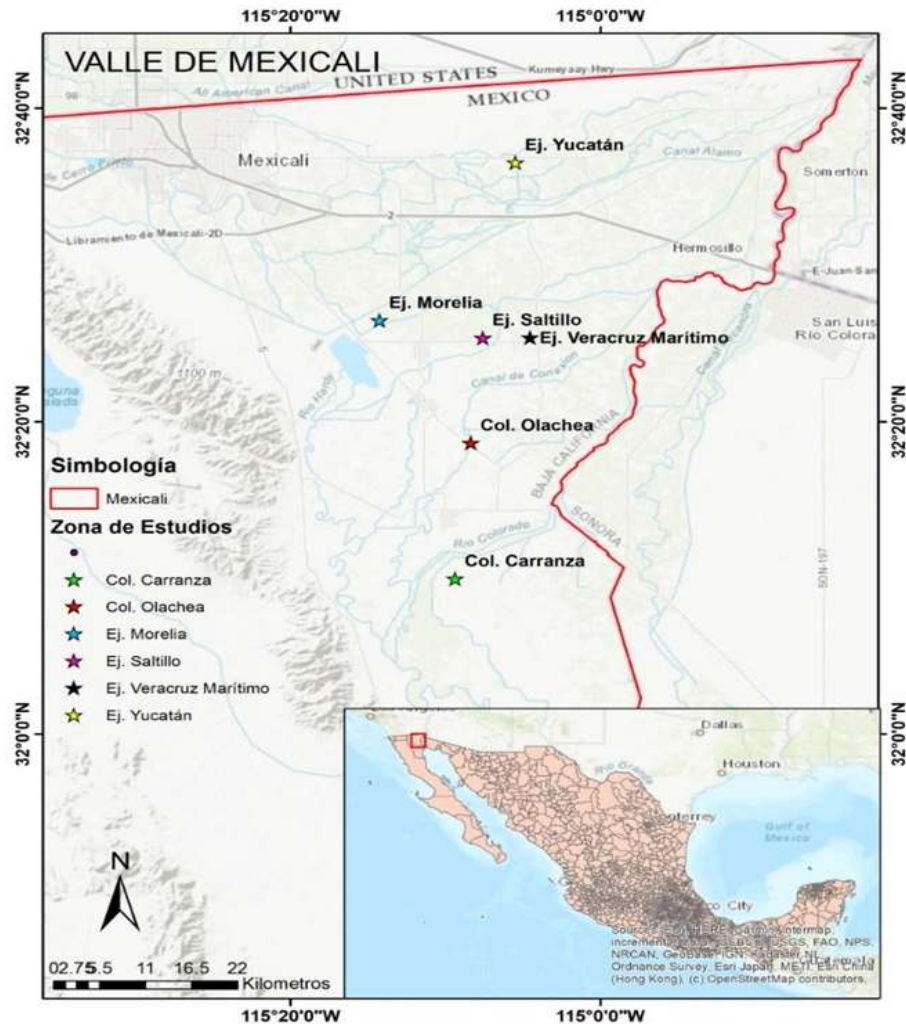


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio en el Valle de Mexicali, Baja California, México.

Las encuestas se realizaron de manera presencial durante los meses de agosto a octubre del 2018. La información fue proporcionada por los propios productores, mayordomos, agricultores y gerentes, encargados del cultivo y manejo de los datos en cada unidad productiva; posteriormente para el análisis de los datos fue aplicando estadística descriptiva; los datos se guardaron en hoja de cálculo y se graficaron en diagramas de pastel, para deducir la información porcentual.

La encuesta aplicada constó de 60 reactivos, mismos que fueron clasificados de la siguiente manera: I) datos de identificación del predio, II) características edáficas del predio, III) datos sobre las variedades de alfalfa, IV) datos sobre características de producción por variedad, y V) datos sobre preferencias para las nuevas variedades de alfalfa.

III. Resultados y discusión

3.1 Identificación de las unidades de producción

Las prácticas de manejo agrícola son un punto crítico para el cultivo de alfalfa y otras especies debido a que pueden tener grandes efectos positivos o negativos como la acumulación de enfermedades o un incremento en la abundancia de la biota benéfica del suelo ⁽¹⁶⁾. La producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) representa el 57.1% de la producción nacional de forraje en México ⁽¹⁷⁾. Por su parte, la superficie cultivada en el Valle de Mexicali varía en gran medida entre las 12 y 2000 hectáreas, con una media de aproximadamente 500 Ha, por unidad de producción.

Con respecto al equipamiento, los productores cuentan con una variedad importante de maquinaria agrícola, siendo las sembradoras, los tractores y las cortadoras distribuidas entre todos ellos. Adicionalmente, algunos productores tienen empacadoras, fertilizadoras, barbechadoras, rastrillos, sembradoras arados y discos para el manejo productivo del cultivo. La siembra se realiza en el mes de septiembre mayormente y se llega a extender en algunos casos hasta febrero. La cantidad de semilla que se siembra varía entre 20 y 50 kilogramos por hectárea con una media de 40 kg/ha. El 63% de los encuestados no cuentan con ningún tipo de seguro agrario (Tabla 1).

Tabla 1. Identificación y superficie cultivada de las unidades de producción de alfalfa muestreadas en el Valle de Mexicali

Unidad de producción	Ejido (s)	Ubicación municipal	Superficie del predio (ha)	Superficie cultivada (ha)	Antigüedad del predio (años)	Seguro agrario
Agrícola el Pinacate	Olacheo, Carranza, Chapultepec, Triángulo, Buenfil, Pátzcuaro	Mexicali	1700	850	23	Si
Corrales Magaña	Ejido Guerrero, Xalapa, Morelia	Mexicali	300	300	30	Si
Lote 145	Ejido Carranza	Mexicali	180	60	NE	No
Rancho Zavala	Ejido Carranza	Mexicali	12	12	18	No
BH Asociados	Ejido Saltillo	Mexicali	1000	820	13	NE
Rancho JC	Colonia Zacatecas y Ejido Sombrerete	Mexicali	500	100	34	No
Rancho Ruano	Ejido Saltillo	Mexicali	500	500	20	Si
Machados Produce	Ejido Veracruz marítimo	Mexicali	210	210	18	Si
Corrales Valdivia	Ejido Saltillo	Mexicali	2000	2000	18	No
Perker sociedad	Colonia Carranza	Mexicali	200	100	40	No
22 de noviembre	Ejido Yucatán	Mexicali	1000	280	40	No
Agrícola Firomaza	Ejido Yucatán	Mexicali	2000	350	30	Si

NE: no especificado.

3.2 Características edáficas de la producción de alfalfa

La alfalfa es un cultivo forrajero de producción mundial que, debido a su alto rendimiento y su larga temporada de crecimiento, es una especie altamente demandante de agua debido a sus altas necesidades hídricas al tomar en cuenta su larga temporada de crecimiento; su demanda de consumo hídrico oscila entre 1.200 y 1.800 mm aproximadamente al año, lo que lo hace dependiente de la disponibilidad de agua de riego y el mayor consumidor potencial de agua ^(17,27), en comparación con otros cultivos como el trigo y el algodón. Requiere de suelos con pH neutro, de textura media a liviana, con buen drenaje, profundidad y alta disponibilidad de fósforo para poder expresar todo su potencial productivo ⁽¹⁾.

En este sentido, encontramos dentro de los aspectos edáficos que todos los productores conocen el tipo de suelo de sus predios, aunque no especificaron si han hecho análisis de los mismos, solo el (23%) indicó que en el pasado llevaron a cabo un análisis de agua con entes externos. Así mismo, el tipo de suelo predominante entre las zonas de estudio es el arenoso, seguido por el arcilloso, y en menor medida expresaron tener suelos francos, limosos y mixtos. No obstante, la mayor parte de los productores manifestó que no existen problemas de salinidad en sus predios (58%). Adicionalmente, a pesar de que solo el 41% de los productores desconoce los principales nutrientes que poseen sus predios, los que indicaron tener conocimiento manifestaron que el nitrógeno, el fósforo y el potasio son los que se encuentran en mayor abundancia (Tabla 2).

Tabla 2. Características edáficas y requerimientos del suelo en las unidades de producción.

Unidad de producción	Tipo de suelo	Salinidad	Principales nutrientes	Fertilidad del suelo (escala 1 al 10)	Procedencia del agua para riego	Sistema de Irrigación	Abono orgánico incorporado	Agua por ciclo de cultivo (L/Ha)
Agrícola el Pinacate	AR, BLARC	No	N, P	7	Pozo, canal, Río Colorado, particulares		No	90 a 100
Corrales Magaña	BL, MIX, ARC	Si	NE	8	Río Colorado		No	175
Lote 145	BL, LIM	Si	NE	5	Presa		No	125
Rancho Zavala	MIX	No	N	8	Presa		Sí, estiércol	117
BH Asociados	TN, SAL, LIM, FRA-ARC	Si	N, P	9	Presa		Composta	110
Rancho JC	MIX, AR, BL	Si	NE	9	Pozo	Gravedad	No	130
Rancho Ruano	FRA-ARC, ARC, LIM, ARC	Si	Calcio	8	Río Colorado		Sí, estiércol, nutripellet	120
Machados Produce	AR	No	N, P, K	8	Río Colorado		No	127
Corrales Valdivia	AR y ARC	No	N, P	8	Río Colorado		Sí, composta	130
Perker sociedad	TN, MIX, BL, FRA	No	NE	8	Río Colorado		No	117

22 de noviembre	AR	No	NE	7	Río Colorado, Pozo	No	200
Agrícola	LIMARC,	No	N, P, K	9	Río Colorado	Sí, Gallinaza	120
Firomaza	FRA-ARN-						

AR, ARC, BL, LIM, TN, SAL, MIX, FRA, FRA-ARC, FRA-AR: Arenoso, Arcilloso, Blanco, Limoso, Tierra Negra, Salitroso, Franco, Mixto, Franco Arcilloso, Franco Arenoso.

N, P, K: Nitrógeno, Fósforo, Potasio.

NE: No especificado.

Por otro lado, las prácticas agrícolas convencionales se caracterizan por el uso intensivo de fertilizantes sintéticos y biocidas para optimizar el mayor rendimiento de los cultivos. Sin embargo, se ha demostrado que la aplicación excesiva de fertilizantes que contienen N causa efectos adversos en las comunidades bióticas, impactando de manera negativa en la calidad del suelo y agua ⁽¹⁸⁾. No obstante, la mayoría de los encuestados opinan que sus predios son muy fértiles (en una escala del 7 a 10). En este sentido, se ha demostrado de forma particular, que la capacidad de fijación de nitrógeno de las especies de alfalfa, reduce significativamente la aplicación de nitrógeno en el campo, lo que a su vez contribuye a un aumento drástico en la mejora de la calidad de los suelos. Así mismo, dentro de los sistemas forrajeros, además de los fertilizantes químicos, los aportes de N de los excrementos de animales de pastoreo, la aplicación de efluentes y la fijación biológica de nitrógeno asociada con las leguminosas contribuyen a los aportes de N en suelo ⁽¹⁹⁾. No obstante, se considera que la escasez de agua y la salinidad (Na^+) de los suelos, son los principales factores que limitan la supervivencia y el crecimiento de las plantas ⁽¹⁾.

En este mismo sentido, el agua se menciona como el principal factor limitante en la producción de los cultivos presentes en las regiones áridas y semiáridas del Valle de Mexicali, lo cual viene a impactar de manera directa en la producción de alimentos y fibra en el caso particular de la alfalfa ⁽⁹⁾. La disponibilidad de agua se menciona como la

problemática principal en el cultivo de alfalfa en Mexicali. En este sentido, todos los productores manifestaron tener dificultades con el abastecimiento de agua. El 50% de los cultivos utilizan agua de canal para riego, el 29% la obtienen de presa y el 21% de pozos. El 100% de los predios se riegan por gravedad. El consumo de agua por hectárea por ciclo de cultivo varía entre las diferentes unidades de producción de 100 a 200 mm con una media de 128 L/Ha.

Por su parte, el Valle de Mexicali constituye una extensa región agrícola bajo riego; cerca de 208 mil hectáreas tienen derecho de uso de agua para riego agrícola ⁽²⁰⁾. Sin embargo, estudios realizados por algunos autores ⁽²¹⁾, señalan que la estimación de la demanda económica del agua para riego ha incrementado de manera considerable en las zonas productivas del estado de Baja California, incluyendo el Valle de Mexicali.

Esta información coincide con reportes recientes de autores ⁽²²⁾, en donde se especifica que este tipo de sistemas de riego en las regiones productivas del Valle de Mexicali, San Luis, Imperial y Yuma, han sido implementados a través de los años. Sin embargo, se ha demostrado que estos sistemas tienen desventajas considerables en las regiones productivas debido a que se presentan pérdidas de agua por evapotranspiración, salinización de suelos y pérdida de aguas residuales, sin embargo, se continúa practicando por tradición. Por lo tanto, existe la creciente necesidad de gestionar adecuadamente los recursos hídricos y desarrollar formas sostenibles para

que la agricultura alcance las demandas de una población en constante crecimiento sobre todo en las regiones áridas y semiáridas del mundo ⁽²³⁾.

Por otro lado, aunado a los problemas de agua, a nivel mundial se ha identificado que la salinización del suelo es una de las mayores preocupaciones que afectan la producción de cultivos ⁽²³⁾, sin embargo, la mayor parte de los productores manifestó que no existen problemas de salinidad en sus predios (58%). No obstante, emplean diferentes estrategias como la preparación de los suelos, sobre riego, siembra en surco, mejorados de suelo, reguladores de crecimiento vegetal y la rotación de cultivos. Así mismo, dentro de las características que los propios productores han identificado en los predios como síntomas asociados al cultivo estresado por condiciones de compactación y salinidad de suelo encontramos, baja altura (33.3%), marchitez (41.6%), y en menor porcentaje el amarillamiento, agrietamiento, falta de germinación y deformación de la raíz (33.3%); sin embargo, no se encontró una relación aparente entre el abonado aplicado y la fertilidad de los predios, así mismo parece no existir una relación entre el origen del agua de riego y el concepto de fertilidad de suelo entre los productores.

Por su parte, la rotación de cultivos ha sido durante mucho tiempo la base de la práctica agrícola debido a que favorece el control de malezas, enfermedades y plagas de insectos en cultivos como la alfalfa provocado por el llamado “efecto de rotación” que mejora el rendimiento ⁽²⁴⁾. En este mismo orden encontramos que en algunas unidades de producción (33.3%) no aplican suplementos para la mejora de sus cultivos, sin embargo, la mayoría de los productores rotan cultivos (66.6%), como estrategia implementada para mejorar el rendimiento de sus predios, siendo el trigo, la avena y el algodón los más usados para este fin. De esta manera, las rotaciones

de cultivos entre cereales anuales y forrajes perennes ayudan a mejorar el medio ambiente reduciendo la erosión del suelo, incrementando el contenido de materia orgánica y disminuyendo la pérdida de nitratos ⁽²⁵⁾.

Como especie perenne, la alfalfa está sujeta a numerosos patógenos del suelo que se acumulan con el tiempo. Estos antagonistas pueden causar fuertes descensos en la productividad, lo que indica una retroalimentación negativa suelo-planta preocupante para la producción de alfalfa ⁽¹⁶⁾. En este sentido, los productores manifestaron que se enfrentan a dos principales enfermedades producidas por hongos como *Fusarium spp* (33.3%) y el causante de la pudrición texana (*Phymatotrichopsis omnívora*) (25%), el resto no manifestó tener problemas con ellos (41.7%). No obstante, existe información que indica que la infección por hongos es una de las principales amenazas para la producción de alfalfa; sin embargo, durante muchos años, se han desarrollado e implementado variedades de alfalfa resistentes a especies de *Fusarium spp*, que han demostrado resistencia a las enfermedades producidas por dichos hongos ⁽²⁶⁾.

Por último, en el caso de las plagas encontramos el pulgón negro (*Toxoptera aurantii*), pulgón verde (*Schizaphis graminum*) y gusano soldado (*Spodoptera exigua*), los cuales tienen un impacto negativo en la mayoría de los predios reflejado en la disminución del rendimiento, falta de homogeneidad para el corte y en algunos casos la pérdida del cultivo (16.6%). No obstante, se ha demostrado que la capacidad que tiene la alfalfa de múltiples cortes, favorece la reducción de poblaciones de malas hierbas y proporciona una cobertura del suelo favorable para insectos, roedores y hongos que consumen semillas de malas hierbas ⁽²⁴⁾. Sin embargo, el principal

problema de producción al que se enfrentan los productores de alfalfa es la disponibilidad de agua, seguido de la temperatura como principal factor climatológico que determina el potencial del cultivo (100%), y que recientemente se ha demostrado que un aumento de la temperatura puede reducir su producción en regiones como las del Valle de Mexicali ⁽²⁷⁾.

3.3 Variedades de alfalfa

Con respecto a las variedades utilizadas en las unidades de producción se encontró que la alfalfa (*Medicago sativa* L.) variedad comercial CUF-101 ⁽²⁸⁾, es la variedad predominantemente cultivada y preferida por los productores del valle de Mexicali que durante 40 años la han cosechado. La variedad fue desarrollada tras varios años de selección por la Universidad de Davis, California y por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. El 80% del germoplasma de CUF-101 proviene de la variedad “UC Cargo” ⁽²⁹⁾.

Inicialmente CUF-101 fue desarrollada para combatir la plaga del pulgón azul de la alfalfa (*Acyrtosiphon kondoi*), posteriormente se demostró su resistencia múltiple a insectos y plagas. De acuerdo con los encuestados del género masculino de entre 25 y 59 años de edad, la razón por la cual mencionan elegir esta variedad es por su resistencia a las condiciones climáticas, como las que se presentan en el Valle de Mexicali y su característica más valorada es su tamaño y alto rendimiento. Aunado a ello, se ha demostrado la capacidad y potencial que tienen diversas variedades de alfalfa genéticamente mejoradas, quienes presentan resistencia a la pudrición de la raíz, no obstante, podrían mejorarse aún más mediante técnicas de mejoramiento genético adicional ⁽²⁶⁾, sin embargo, ninguno de los productores menciona utilizar semillas genéticamente mejoradas (Tabla 3).

Tabla 3. Variedad y siembra de alfalfa cultivada en el valle de Mexicali.

Unidad de producción	Variedad (es) sembradas en el último año	Conocimiento de variabilidad genética	Siembra de variedad (Años)	Mes de siembra	Origen de la semilla	Densidad de siembra (kg/Ha)	Agroquímicos (Uso)
Agrícola el Pinacate	CUF-101	No	23	Septiembre	Comprada	35 a 40	Si
Corrales Magaña	CUF-101	No	30	Octubre	Comprada	40	Si
Lote 145	CUF-101	No	20	Septiembre	Propia	40	Si
Rancho Zavala	CUF-101	No	12	Octubre	Comprada	45	Si
BH Asociados (Valdivia)	CUF-101	No	13	Septiembre a Enero	Comprada	50	Si
Rancho JC	CUF-101	No	12	Septiembre a Octubre	Propia y Comprada	40	Si
Rancho Ruano	CUF-101	90% no certificada	20	Septiembre a Noviembre	Comprada	45.4	Si
Machados Produce	CUF-101	No	20	Septiembre a Octubre	Comprada	40	Si
Corrales Valdivia	CUF-101	No	18	Septiembre a Octubre	Comprada	40 a 50	Si
Perker sociedad	CUF-101	No	40	Octubre a Noviembre	Propia	35 a 37	Si

22 de noviembre	CUF-101	No	20	Octubre	Comprada	40	Si
Agrícola Firomaza	CUF-101	No	20	Octubre a Febrero	Comprada	20	Si

3.4 Características de producción y comercialización de la alfalfa

En cuanto al manejo agronómico, los productores enfatizan en observar cómo característica principal la altura de planta que varía desde 30 cm a 1 metro, destacando considerablemente la altura promedio de 80 cm (41.6%) como la preferida por la mayoría de los productores, y lo cual se ve reflejado en un manejo adecuado del cultivo al momento de corte. Así mismo, ellos consideran que una buena variedad como la CUF-101, debe presentar características como vigor, buen rendimiento, con resistencia a estrés hídrico, a plagas, que soporte temperaturas extremas, y proporcione mayor follaje.

En este mismo sentido, el valor nutricional de la alfalfa es una característica importante dado su uso como forraje con gran valor económico. Es reconocido como un cultivo forrajero importante en donde la cosecha, el almacenamiento y la venta del mismo son componentes integrales de las industrias láctea y ganadera en países como Brasil, Argentina, Estados Unidos y México ⁽³⁰⁾. Es así que la alfalfa es considerada el componente básico de los programas de alimentación de ganado lechero, seguido de bovinos, equinos, ovinos, entre otros. Su importancia económica radica en su gran potencial de producción de biomasa superior

a las 80 T/Ha verde y unas 20 T/Ha de materia seca ⁽³¹⁾. En este sentido, los productores manifiestan que, si obtienen mayor follaje, obtendrán mayor corte y por ende mayor número de pacas, traducido a mayores ingresos por la venta de sus productos.

En México, los establos lecheros especializados y de gran escala aportan el 50% del suministro nacional de leche ⁽³²⁾. Se encuentran ubicadas en su mayoría en ambientes áridos y semiáridos del norte y centro de México, donde la escasez de agua limita la producción de alfalfa para ensilaje y otros cultivos ⁽³³⁾. En el Valle de Mexicali, la mayor parte de la producción de alfalfa cultivada se destina al consumo regional (67%). Los principales compradores son los ganaderos del estado que la utilizan como forraje. Tradicionalmente todos los productores comercializan la alfalfa en forma de pacas con un peso de entre 50 hasta 65 kg, con precios de venta que fluctúan entre \$130 y \$180 pesos mexicanos por paca y \$2,200 y \$3,000 por tonelada. Existe información que determina que la alfalfa es el pasto forrajero con un precio de mercado más alto en comparación con otros debido a su producción en masa y a los bajos costos de manejo del cultivo ⁽³⁴⁾. No obstante, los productores manifestaron tener ventas del 100% o el autoconsumo, y no tener problemas para la venta o distribución de su producto (Tabla 4).

Tabla 4. Rendimiento y comercialización de la alfalfa del valle de Mexicali.

Unidad de producción	Rendimiento (T/Ha)	Venta (%)	Comercialización (Pacas de 50 a 65 kg)	Precio de venta (Ton)	Mercado
Agrícola el Pinacate	5	100	Pacas	3000	Regional
Corrales Magaña	18	20	Pacas	3000	Regional
Lote 145	NE	100	Pacas	3000-3500	Regional
Rancho Zavala	NE	100	Pacas	NE	Regional
BH Asociados (Valdivia)	5	95	Pacas	NE	Nacional
Rancho JC	NE	90	Pacas	2700	Regional
Rancho Ruano	14	95	Pacas	3000	Nacional
Machados Produce	18	100	Pacas	2600	Regional
Corrales Valdivia	3	90	Pacas	3100	Internacional/ Nacional
Perker sociedad	3	100	Pacas	NE	Regional
22 de noviembre	NE	80	Pacas	NE	Regional
Agrícola Firomaza	3.5	100	Pacas	NE	Internacional/ Nacional

NE: No especificado.

Por otro lado, el 100% de las unidades de producción llevan a cabo el manejo de la tierra adicionando fertilizantes, herbicidas y agroquímicos entre los que destacan el P1152, cletodin, piretroides, organofosforados, plaguicidas comerciales de uso común, que si bien no es una práctica adecuada debido al impacto que tienen en el ambiente, los productores manifiestan la “necesidad de incorporarlos en su práctica agrícola” debido a que mejoran el rendimiento e incrementan la perdurabilidad de su predio. Así mismo, algunos reportes ⁽³⁵⁾ indican que juegan un papel importante en el desarrollo agrícola, debido a que reducen las pérdidas de los productos, mejoran el rendimiento y productividad, incrementan la calidad de los alimentos, y ayudan en el control de vectores o agentes causantes de enfermedades en los cultivos.

Las leguminosas forrajeras se cultivan ampliamente en zonas semiáridas, no sólo como fuente de forraje sino también para mejorar el entorno ecológico y la calidad del suelo ⁽³⁶⁾. En este sentido, la fertilidad del suelo es otro factor de importancia en el manejo del cultivo de alfalfa que influye en el rendimiento y la persistencia del forraje. No obstante, estudios recientes han demostrado una influencia positiva en el rendimiento y supervivencia de la alfalfa en suelos nutridos con fósforo y potasio ⁽³⁷⁾. El fósforo restringe el crecimiento de las plantas más que otros elementos debido a su baja movilidad y biodisponibilidad. Su disponibilidad en el suelo disminuye a medida que las plantas de alfalfa crecen, lo cual se correlaciona positivamente con el incremento del rendimiento de las mismas ⁽³⁶⁾.

3.5 Nuevas variedades de alfalfa

Las semillas de una planta de alfalfa son genéticamente heterogéneas. Por esta razón, el progreso del mejoramiento de la alfalfa ha sido particularmente lento en comparación con otros cultivos de importancia ⁽³⁸⁾. En este aspecto, el 25% de los encuestados mencionó usar semilla propia y el resto compra cada ciclo.

Los productores manifiestan la necesidad de considerar a mediano plazo, la implementación de nuevas variedades mejoradas genéticamente (GM) que permitan por una parte tener una producción eficiente con requerimientos mínimos de agua y con características fisiológicas adaptadas a las condiciones del valle. Por su parte, actualmente en los sistemas forrajeros de Estados Unidos, Canadá, México, Japón y Argentina han sido autorizados y desregulados para la producción de alimentos, piensos e importación, diversas variedades de alfalfa GM resistentes a herbicidas como glifosato y con lignina reducida, las cuales presentan características y rasgos adaptados a las condiciones locales de crecimiento, y su aplicación como doble propósito (heno y pastoreo) ^(39,40).

IV. Conclusiones

El presente estudio permitió conocer y describir la importancia que representa la producción de alfalfa (*Medicago sativa* L.) para la zona del Valle de Mexicali, debido a que representa una fuente de ingreso directo e indirecto, por su aporte a la producción de carne y leche, y al brindar forrajes a precios competitivos y de manera oportuna, que proveen de una fuente de proteína para generar productos y subproductos con calidad de exportación. Así mismo, se refuerza la necesidad de introducir y estudiar nuevas variedades más resistentes a los problemas de suelo a los que el productor se ha estado enfrentado, ocasionando la necesidad de la resiembra. Por lo anterior, es necesario

implementar estrategias de mejora, producción, y comercialización del cultivo de alfalfa, que le permitan a los productores poder obtener beneficios redituables con base en la calidad de su producción, y que sin duda beneficiará a muchas familias bajacalifornianas que viven de ello.

V. Agradecimientos y conflicto de interés

Los autores extienden su agradecimiento, apoyo y participación activa a cada uno de los productores de alfalfa del Valle de Mexicali; al Prodep (F-PROMEP-38/Rev-04, SEP-23-005) por el financiamiento y al Instituto de Ciencias Agrícolas de la UABC por las facilidades brindadas para el desarrollo del proyecto. Los autores declaran que no existe conflicto de interés de ningún tipo.

VI. Referencias

1. Yang, H, An F, Yang F, Wang Z. (2019). "The impact of irrigation on yield of alfalfa and soil chemical properties of saline-sodic soils", *PeerJ*: 7e7148. <https://doi.org/10.7717/peerj.7148>.
2. Acharya, JP, López Y, Gouveia TB, de Bem Oliveira I, Resende Jr FR, Muñoz PR, Ríos EF. (2020). "Breeding Alfalfa (*Medicago sativa* L.) Adapted to Subtropical Agroecosystems", *Agronomy* 10(5):742. <https://doi.org/10.3390/agronomy10050742>.
3. Bingzhe, Fu; Zhigang L, Xueqin G, Longguo W, Jian L, Wendong, P. (2021). "Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial community structures in arid and semi-arid areas of northern China", *Applied Soil Ecology* 159:103859. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103859>.

4. Sánchez-Santillán, P, Maldonado-Peralta MA, Rojas-García AR, Torres-Salado N, Herrera-Pérez J, Bottini-Luzardo, MB, Wilson-García CY, Quero-Carrillo AR. (2019). Productividad de variedades de alfalfa en el Valle de México. *Acta Universitaria*; 29. <http://doi.org/10.15174.au.2019.2202>.
5. Martínez-Varela, KJ, Ceceña-Durán C, González-Mendoza D, Grimaldo-Juárez O. (2015). "Control de la marchitez *Fusarium oxysporum* f. sp. *Medicaginis* en alfalfa (*Medicago sativa* L.) en el Valle de Mexicali, Baja California". Universidad Autónoma de Baja California, *OmniaScience* (Omnia Publisher SL). <https://doi.org/10.3926/oms.275/> ISBN: 978-84-944229-4-2.
6. SADER. (2020). "Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Supera cosecha de alfalfa las 536,838 toneladas en el Valle de Mexicali". Representación, Agricultura, Baja California. <https://www.agricultura.gob.mx/datos-2020>. Consultado 13 de mayo de 2020.
7. Bazán, RV, Coronado YAG, Fuentes, NN. (2017). "Comportamiento Productivo de la Alfalfa (*Medicago sativa*) de la Variedad Caravelí Sometida al Pastoreo en el Valle de Hualar", *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 28:743-749. <https://dx.doi.org/10.15381/rivep.v28i3.13359>.
8. Lins, AMC, Boge A, Jinguo B, Fransen H, Norberg SS, Long-Xi Y. (2020). "Identification of genetic loci associated with forage quality in response to water deficit in autotetraploid alfalfa (*Medicago sativa* L.)", *BMC Plant Biology* 20: 303. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02520-2>.
9. Djaman K, Smeal D, Koudahe K, Allen S. (2020). "Hay yield and water Use Efficiency of Alfalfa under Different Irrigation and Fungicide Regimes in a Semiarid Climate", *Water* 12:1721. <https://doi.org/10.3390/w12061721>.
10. Álvarez-Vázquez P, Hernández-Garay A, Mendoza-Pedroza SI, Rojas-García AR, Wilson-García CY, Alejos-de la Fuente JI. (2018). "Producción de diez variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.) a cuatro años de establecidas", *Agrociencia* 52: 841-851. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140531952018000600841&lng=en&tlng=es.
11. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Consultado el 22 de noviembre de 2019. Sitio web: <https://www.gob.mx/conagua>.
12. Lira HH. (2005). "Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C", *Geotermia. Revista Mexicana de Geoenergía* 18(1):37-46.
13. Almaraz A. (2015). "Algodón en el valle de Mexicali y los límites del intervencionismo estatal (1914-1950)", *Apuntes* 42:129-159.
14. Alaniz-Gutiérrez L. (2017). "Caracterización palinológica de las mieles del valle de Mexicali, Baja California, México", *Polibotánica* 43:255-283. <https://doi.org/10.18387/polibotanica.43.12>.
15. Neill DA y Cortez SL (2018). "Procesos y Fundamentos de la Investigación Científica". Primera edición. Editorial UTMACH, Gestión de proyectos editoriales universitarios; 125 pag. ISBN: 978-9942-24-093-4.

16. Awodele, SO, Bennett JA. (2022). "Soil biota legacies of alfalfa production vary with field conditions and among varieties and species", *Agriculture, Ecosystems & Environment* 335(107994). <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.107994>.
17. Bringas-Burgos, B, Mendoza-Muñoz I, Navarro-González, C, González-Ángeles, A, Jacobo-Galicia, G. (2020). "Análisis de sistemas de riego por gravedad y goteo subsuperficial basada en una encuesta de muestra de conveniencia en el valle de Mexicali", *Vínculos-Espe* 5:3: 13 – 32. <https://doi.org/10.24133/vinculosespe.v5i3.1725>.
18. Gulshan, KS, Shakeel AK, Manoj S, Ranjan B, Anil SN, Arti GB. (2022). "Phycoremediated N-fertilization approaches on reducing environmental impacts of agricultural nitrate leaching", *Journal of Cleaner Production* 345 (131120). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131120>.
19. Houlbrooke, DJ., Laurenson S. (2013). "Effect of sheep and cattle treading damage on soil microporosity and soil water holding capacity", *Agricultural Water Management* 121, Pages 81-84, ISSN 0378-3774. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.01.010>.
20. Zavala-Álvarez, J. (2006). "Estancamiento y desaliento del desarrollo productivo en la región agrícola del Valle de Mexicali, Baja California: un análisis tendencial", *Estudios fronterizos* 7:63-94.
21. Medellín-Azuara J., Mendoza-Espinosa, LG, Lund, JR, Harou, JJ y Howitt, RE. (2009). "Virtues of simple hydroeconomic optimization: Baja California, Mexico", *Journal of Environmental Management* 90 3470–3478. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.05.032>.
22. Cital, F, Ramírez-Hernández J, García-Hernández J, García-Leyva G, Rodríguez-Burgueño JE, Ramírez-Barreto M.E. (2022). "Ecosystem services (ES) provided by ditches in a desert agricultural valley", *Ecological Engineering* 174:106462. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106462>.
23. Mbarki, S, Skalicky M, Talbi O, Chakraborty A, Hnilicka F, Hejnak V, Zivcak M, Brestic M, Cerda A, Abdelly C. (2020). "Performance of *Medicago sativa* grown in clay soil favored by compost or farmyard manure to mitigate salt stress", *Agronomy* 10: 94. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010094>.
24. Goplen JJ, Coulter JA, Sheaffer CC, Becker R, Breitenbach FR, Behnken LM, Gunsolus JL. (2018). "Economic Performance of Crop Rotations in the Presence of Herbicide-Resistant Giant Ragweed", *Crop Economics, Production & Management Agronomy Journal* 110: 260 268. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.09.0536>.
25. Poffenbarger, H, Artz G, Dahlke G, Edwards W, Hanna M, Russell J, Sellers H, Liebman M. (2017). "An economic analysis of integrated crop-livestock systems in Iowa, U.S.A.", *Agricultural Systems* 157: 51-69. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.001>.
26. Cong, L, Sun Y, Long R, Kang J, Zhang T, Li M, Wang Z, Yang Q. (2017). "Modulation of protein expression in alfalfa (*Medicago sativa* L.) root and leaf tissues by *Fusarium proliferatum*", *Journal of Integrative*

- Agriculture* 16: 2558–2572.
[https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(17\)61690-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61690-3).
27. Medina-García, G, Echavarría-Cháirez FG, Ruiz-Corral JA, Rodríguez-Moreno V. M, Soria-Ruiz, J, De la Mora-Orozco C. (2020). “Efecto del calentamiento global sobre la producción de alfalfa en México”, *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 11:34-48.
<https://doi.org/10.22319/rmcp.v11s2.4686>.
 28. Lehman W, Nielson M, Marble V. and Stanford E. (1983). “Registration of cuf 101 alfalfa (reg. no. 119)”, *Crop Science* 23: 398.
 29. UC Davis Foundation Seed Program. Copyright The Regents of the University of California, Davis campus. Consultado en octubre de 2019. Sitio web: <https://fsp.ucdavis.edu/seed-catalog/alfalfa-varieties/cuf-101>
 30. Coblenz, WK, Hoffman PC. (2009). “Effects of bale moisture and bale diameter on spontaneous heating, dry matter recovery, in vitro true digestibility, and in situ disappearance kinetics of alfalfa-orchardgrass hays”, *Journal of Dairy Science* 92 :2853-2874.
<https://doi.org/10.3168/jds.2008-1920>.
 31. Ramos-Ulate, CM, Pérez-Álvarez S, Guerrero-Morales S, Palacios-Monarrez A. (2021). “Biofertilization and nanotechnology in alfalfa (*Medicago sativa* L.) as alternatives for a sustainable crop”, *Cultivos Tropicales* 42(2),1.
 32. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). Datos Abiertos de Estadística de Producción Agrícola. Consultado el 14 de octubre de 2019 y diciembre de 2022, website: <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>.
 33. Santana, OI, Olmos-Colmenero JJ, Wattiaux MA. (2019). “Replacing alfalfa hay with triticale hay has minimal effects on lactation performance and nitrogen utilization of dairy cows in a semi-arid region of Mexico”, *Journal of Dairy Science* 102:8546-8558.
<https://doi.org/10.3168/jds.2018-16223>.
 34. Neres, MA, Nath CD, Hoppen SM. (2021). “Expansion of hay production and marketing in Brazil”, *Heliyon* 16;7(4): e06787.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06787>.
 35. Tudi, M, Ruan D, Wang H, Lyu L, Sadler J, Connell R, Chu, D, Phung CDT. (2021). “Agriculture Development, Pesticide Application and Its Impact on the Environment”, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18: 1112.
<https://doi.org/10.3390/ijerph18031112>.
 36. Kong, M, Jing K, Cheng-Long H, Yan-Jie G, Kadambot HMS, Feng-Min Li. (2020). “Nitrogen, phosphorus, and potassium resorption responses of alfalfa to increasing soil water and P availability in a semi-arid environment”, *Agronomy* 10: 310.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10020310>.
 37. Berg, WK, Lissbrant S, Cunningham SM, Brouder SM, Volenec JJ. (2018). “Phosphorus and potassium effects on taproot C and N reserve pools and long-term persistence of alfalfa (*Medicago sativa* L.)”, *Plant Science* 272:301-308.
<https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2018.02.026>. PMID: 29807603.
 38. Zheng, L, Wen J, Liu J, Meng X, Liu P, Cao N, Dong J, Wang T. (2022).

- “From model to alfalfa: Gene editing to obtain semidwarf and prostrate growth habits”, *The Crop Journal* 10, 4, 932-941, ISSN 2214-5141. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.11.008>.
39. Barros, J, Temple S, Dixon RA. (2019). “Development and commercialization of reduced lignin alfalfa”, *Current Opinion in Biotechnology* 56:48-54. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.09.003>.
40. Choi, W, Kim IR, Lim HS, Lee J. R A. (2020). “Multiplex PCR Method for the Detection of Genetically Modified Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Analysis of Feral Alfalfa in South Korea”, *Proceedings of National Institute of Ecology* 1:83-89. <https://doi.org/10.22920/PNIE.2020.1.1.83>.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Evaluación de la citotoxicidad de andamios de PCL y PLGA con células troncales de pulpa dental para ingeniería tisular

Assessment of the cytotoxicity of PCL and PLGA scaffolds with dental pulp stem cells for tissue engineering

Rosales-Ibáñez, R.^{1*}, Rodríguez-Martínez, JJ.¹, González-González, AM.¹, Morales-de la Luz, R.², Sánchez-Pech, JC.⁴, Hernández-Sánchez, F.⁴, Villamar-Duque, T.E.³, González Aragón-Pineda, AE.², Flores-Sánchez, M.L.O.³

¹ Laboratorio de Ingeniería Tisular y Medicina Traslacional, Clínica Cuauhtépec, UNAM, Ciudad de México.

² Carrera de Cirujano Dentista, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM, Estado de México.

³ Bioterio de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM.

⁴ Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, Yucatán.

rosales_ibanez@unam.mx; jesusjiovanni@comunidad.unam.mx; arely.gonzalez@iztacala.unam.mx; rosariomorales_99@yahoo.com; jcsanchezpech@gmail.com; fernandi20@gmail.com; vidutoer@yahoo.com.mx; alvaroedgar@hotmail.com; letyflore1107@gmail.com

Innovación tecnológica: El andamio PCL/PLGA 80:20, probable para aplicaciones clínicas.

Área de aplicación industrial: Medicina regenerativa.

Recibido: 04 octubre 2022

Aceptado: 29 marzo 2023

Abstract

Materials of different nature such as poly - ϵ caprolactone and glycolic poly-lactic acid, have been used in regenerative medicine with human applications and dental pulp stem cells represent an attractive source of cells to be used in in vitro assays due to their easy accessibility, good cell viability and the fact that they are obtained from human third molars in a routine extraction.

Objective: To evaluate the in vitro cytotoxicity of PCL/PLGA scaffolds cultured with dental pulp stem cells.

Materials and methods: An experimental in vitro study was carried out evaluating PCL/PLGA scaffolds in two portions (80:20 and 90:10, respectively) on which DPSC obtained from third molars were planted. The cell viability was evaluated at three times 3, 7 and 10 days by the MTT assay. Data analysis was performed with the Stata software version 14 and the Student's "t" test.

Results: Culture and characterization of dental pulp stem cells were positive for CD44 and Stro-1, the results show an increase in cell viability from day 3 in the control groups and both

polymer mixtures. But there was a lower metabolic activity in the PLGA (90:10) compared to the PCL/PLGA (80:20).

Conclusions: PCL/PLGA 80:20 scaffolds showed greater cell viability at days 7 and 10 compared to the PCL/PLGA 90:10. It was also shown that neither mixture has cytotoxic effect on dental pulp stem cells.

Key words: Dental pulp stem cells, lactic-co-glycolic acid, poly - ϵ caprolactone, scaffolds, tissue engineering.

Resumen

Materiales de diferente naturaleza como poli- ϵ caprolactona y el ácido poli(láctico-co-glicólico), han sido empleados en medicina regenerativa con aplicaciones en humanos y, las células troncales de pulpa dental representan una fuente atractiva para emplearse en ensayos *in vitro* debido a su fácil acceso, buena viabilidad celular ya que se obtienen de terceros molares humanos en una extracción de rutina.

Objetivo: Evaluar la citotoxicidad *in vitro* de andamios de PCL/PLGA cultivados con células troncales de pulpa dental.

Materiales y métodos: Se realizó un estudio experimental *in vitro* evaluando los andamios de PCL/PLGA en dos proporciones (80:20 y 90:10, respectivamente) a los cuales se les sembraron células troncales de pulpa dental obtenidas de terceros molares. La viabilidad celular se evaluó a tres tiempos 3, 7 y 10 días mediante el ensayo MTT. El análisis de los datos se realizó con el software Stata versión 14 y la prueba "t" de Student.

Resultados: Se logró cultivar y caracterizar las células troncales de pulpa dental. Los resultados mostraron un aumento de la viabilidad celular a partir del día 3 en el grupo control y ambas mezclas de polímeros, pero existió una menor actividad metabólica en la mezcla PCL/PLGA (90:10) respecto a la mezcla PCL/PLGA (80:20).

Conclusiones: La mezcla PCL/PLGA 80:20 tuvo mayor viabilidad celular en los días 7 y 10 comparada con la PCL/PLGA de 90:10. También se demostró que ninguna de las dos mezclas tiene efectos citotóxicos en las células troncales de pulpa dental.

Palabras clave: Células troncales de pulpa dental, poli- ϵ -caprolactona. ácido poli-láctico-co-glicólico, andamios, ingeniería tisular.

1. Introducción

La pérdida de tejidos y órganos puede deberse a accidentes, enfermedades, trastornos genéticos y el envejecimiento natural, que, en la mayoría de los casos, el cuerpo humano no tiene la capacidad de regenerar. Para su tratamiento o recuperación los trasplantes han sido empleados, no obstante, la escasez de donaciones de tejidos impide cubrir la demanda de la población afectada. La ingeniería tisular es la ciencia que se encarga de construir sustitutos biológicos

en el laboratorio para su potencial uso en medicina regenerativa (1) y está basada en una triada: células (troncales o diferenciadas), andamios, y factores de crecimiento o inductores.

Las células troncales mesenquimales poseen la capacidad de auto renovación, alta tasa de proliferación y plasticidad de diferenciarse a linajes adipogénicos, condrogénicos y osteogénicos (2,3), sus fuentes de obtención son diversas (4) entre las que se encuentran la médula ósea (5),

cordón umbilical (6) e incluso tejidos bucales (7, 8).

Respecto a las células troncales de pulpa dental (7) las cuales son un tipo de célula no diferenciada de fácil acceso para su obtención (9), y con alta tasa de proliferación respecto a las células troncales de médula ósea (10), lo que las hace ser buenas candidatas para realizar ensayos *in vitro*, además de su probable aplicación en medicina regenerativa.

Los andamios (*scaffolds* en inglés) se utilizan como un soporte físico y biológico en el que se siembran las células, para posteriormente ser trasplantadas en un organismo. Los andamios son críticos en el éxito de regeneración tisular ya que intervienen en aspectos de adhesión, proliferación, diferenciación, distribución, retención y crecimiento celular, así como de distribución de nutrientes y oxígeno, promoviendo el establecimiento de un ambiente mecánico y biológico apropiado para la regeneración tisular de una manera organizada (11, 12, 13,14).

Para la construcción de andamios se han empleado biomateriales tanto naturales como sintéticos. Ejemplos de los primeros son el ácido hialurónico (15), la gelatina (16) y la matriz extracelular (17). Sin embargo, los polímeros naturales tienen varias desventajas, como propiedades mecánicas muy bajas, rápida degradación, dificultad para plastificar, riesgo de respuestas inmunitarias desfavorables y la falta de reproducibilidad en propiedades fisicoquímicas de un lote a otro, ya que dependen de la historia del individuo (animal o vegetal) donde se obtuvo el polímero natural. Entre los biomateriales sintéticos, la policaprolactona (PCL) ha sido utilizada por su biocompatibilidad, biodegradabilidad, estabilidad estructural y propiedades mecánicas; sin embargo, presenta baja bioactividad y energía superficial (alta hidrofobicidad), lo que conlleva a la reducción de la afinidad

celular y tasas de regeneración tisular bajas (18). Otro biomaterial sintético es el ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA), que en comparación con la PCL presenta mayor adhesión y proliferación celular debido a que es más hidrofílico. Un andamio fabricado a partir de PCL y PLGA podría promover una buena adhesión y proliferación celular, así como una buena resistencia mecánica, además de que ambos polímeros son aceptados por la *Food and Drug Administration* (FDA) de los Estados Unidos de Norteamérica y han sido utilizados para elaborar andamios por medio de la técnica de electrohilamiento (19,20,21).

Dentro de las múltiples técnicas para la fabricación de andamios, el electrohilamiento (electrospinning en inglés), permite la producción de fibras a escala micrométrica, pudiendo utilizarse prácticamente cualquier polímero para mimetizar una matriz extracelular. El proceso de electrohilamiento consiste en inyectar una disolución del polímero a través de una aguja de cero inoxidable hacia la placa receptora, también de acero inoxidable. Entre la aguja y la placa receptora se aplica un alto voltaje crenado un campo eléctrico entre ellas. Al salir la disolución de la aguja adquiere una carga positiva la cual hace que la disolución se acelera debido al campo eléctrico y en el trayecto se evapora el disolvente, llegando a la placa únicamente el polímero con forma de microfibras (22) (Figura 1). Los factores de crecimiento o biomoléculas han demostrado un efecto de diferenciación o inducción celular *in vitro* e *in vivo*, entre las que se encuentran las proteínas morfogenéticas de hueso (BMPs por sus siglas inglés), el factor β de crecimiento transformante (TGF- β en inglés), y los factores de crecimiento tipo insulina (22,23,24).

La combinación PCL/PLGA a diferentes proporciones ha sido utilizada previamente para la elaboración de andamios,

habiéndose demostrado que permite la adhesión de celular (25,26). Los andamios de estos dos polímeros contruidos con técnicas combinadas de impresión 3D y electrohilamiento permiten la diferenciación de células madre mesenquimales derivadas de cordón umbilical hacia linajes condrogénicos y osteogénicos sin tener efectos citotóxicos

(27). No obstante, en nuestro conocimiento, no existen reportes del empleo combinado de dichos polímeros que hayan evaluado su efecto en células troncales de pulpa dental, por lo que el presente estudio pretende evaluar su citotoxicidad en dichas células con fines de regeneración tisular.

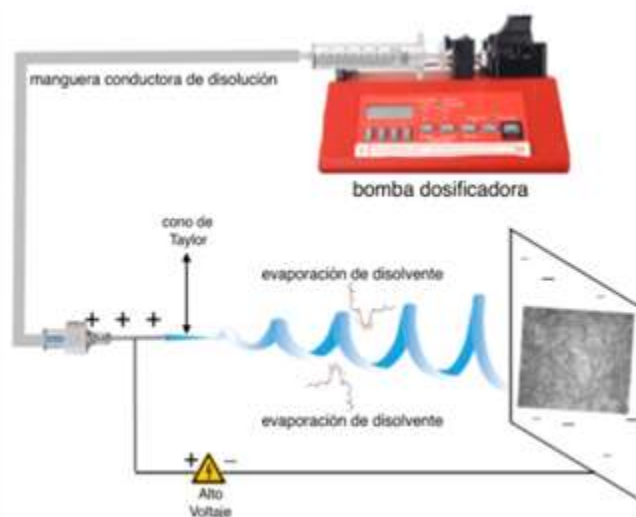


Figura 1. Proceso de electrohilamiento (Diseño por: Fernando Hernández Sánchez, CICY, Mérida, Yucatán, México).

2. Materiales y Métodos

Fabricación del andamio

Los andamios se elaboraron utilizando un electrohilador marca NABOND model TL-01 de manufactura China. Se hizo una disolución de policaprolactona (PCL) (Perstorp®, Mn=80000, Tm de 58°C-60°C y Tg = -60°C) y poli(láctico-co-glicólico) (PLGA) (Aldrich, Mn= 76000-115000 y Tg = 49°C-55°C). Se prepararon andamios PCL/PLGA en relaciones 90:10 y 80:20 respectivamente. Los disolventes utilizados fueron cloroformo y etanol de grado reactivo (JALMEK®). Las mezclas fueron disueltas al 12% m/v en cloroformo/etanol (90:10) durante un período de 12 h continuas. (28).

Las mezclas poliméricas fueron electrohiladas utilizando una diferencia de potencial de 20 kV, una distancia entre el

ánodo y el cátodo de 13 cm, una rapidez de giro del cilindro de 3 rev/s y una rapidez de flujo de 0.2 ml/h (28).

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La caracterización morfológica de cada tipo de andamio se realizó mediante microscopía electrónica de barrido utilizando el software Image-j. Cada microfotografía fue dividida en 4 cuadrantes para la evaluación del diámetro de las fibras (25 fibras por cuadrante, dando un total de 100 fibras), y tamaño de poro. Este último se calculó trazando una circunferencia entre fibras sobrepuestas en forma de triángulo o cuadrado, realizándose 10 medidas de diámetro de poro en cada cuadrante, dando un total de 40 medidas por tipo de andamio (figura 2b) (28).

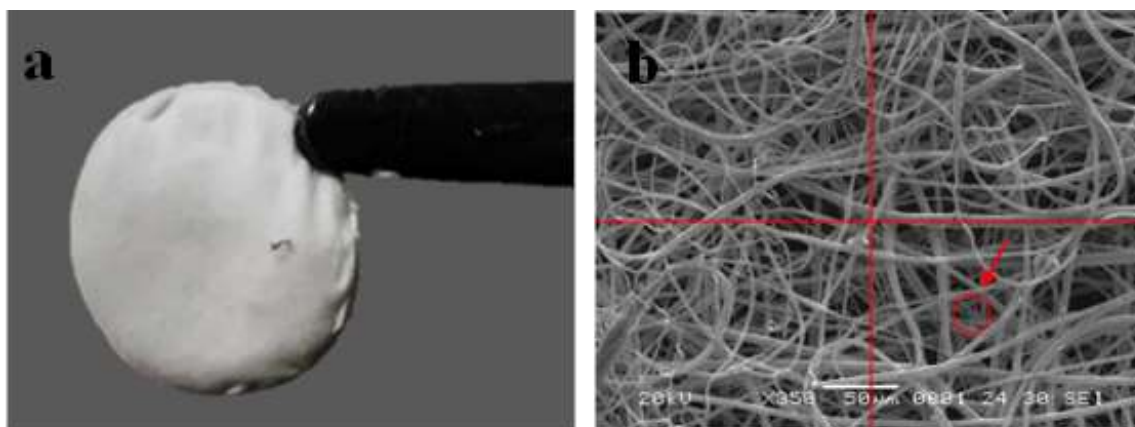


Figura 2. a) Sección de andamio macroscópicamente, **b)** Cuadrantes para la determinación del tamaño de poro en las micrografías de los andamios. El círculo rojo indica un poro formado por fibras superpuestas.

Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)

Para determinar la existencia de nuevos grupos funcionales cuando la PCL y el PLGA fueron mezclados se realizaron ensayos FTIR. Los análisis fueron llevados a cabo por la técnica de reflexión total atenuada (RTA) con un cristal de Germanio en un intervalo de número de onda 500 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} , analizando un total de 100 escaneos (28).

Obtención de las pulpas dentales humanas y cultivo celular

El presente estudio fue aprobado por la comisión de Ética y Bioseguridad de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala de la UNAM. El consentimiento informado previo por escrito fue leído y firmado por cada uno de los donantes. Se recolectaron terceros molares humanos incluidos de 5 pacientes sistémicamente sanos (18 a 22 años de edad) en la clínica Cuauhtepac de la Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UNAM (CE/FESI/012017/1098).

Los dientes se descontaminaron y se cortaron a nivel de la unión cemento-esmalte mediante un disco de diamante para acceder a la cámara pulpar; el enfriamiento durante el proceso de cortado se realizó irrigando constantemente con solución salina estéril (Solución CS Pissa). Para la obtención del tejido pulpar se utilizaron cucharillas de dentina (Hu-

Friedy) y limas endodóncicas (Densply), se trabajó en condiciones asépticas: en una cabina de flujo laminar (Telstar Bio II Advance) previamente limpiada con alcohol etílico al 70% y expuesta a luz ultravioleta durante 20 minutos. Todo el tejido pulpar aislado se colocó en cajas Petri estériles y se procedió a fragmentarlas mediante mango de bisturí con una hoja del número 20, los fragmentos de tejido se transfirieron a tubos cónicos de 15 ml (Biologix) para realizar la digestión enzimática con 3 mg/ml de Colagenasa I (Collagenase from *Clostridium histolyticum*, Sigma-Aldrich) y 4 mg/ml de Dispasa (Dispase II, Sigma-Aldrich), por mililitro de DMEM (Dulbecco's Modified Eagle Medium Low-Glucose, Biowest) durante 15 minutos a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Transcurrido ese tiempo se inactivó la solución enzimática agregando medio de cultivo, la suspensión celular se centrifugó a 1000 rpm durante 10 minutos a $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ para obtener el botón celular, se re-suspendió en medio fresco y se sembraron las células en cajas de cultivo tipo T de 25 cm^2 (Nunclon) agregándoles 5 ml de medio de cultivo DMEM bajo en glucosa (Dulbecco's Modified Eagle Medium Low-Glucose, Biowest), adicionado con Suero Bovino Fetal (FBS, Biowest) al 10%, antibióticos y antimicótico al 1% (penicilina 100U/ml, estreptomicina 100µg/ml, anfotericina B 5µg/ml, Sigma-Aldrich), y se incubó a $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una atmósfera humidificada de 95% de O_2 y

5% de CO₂. El medio de cultivo fue cambiado dos veces por semana hasta alcanzar una confluencia del 80% para

llevar a cabo los subsecuentes ensayos (figura 3) (29, 30).

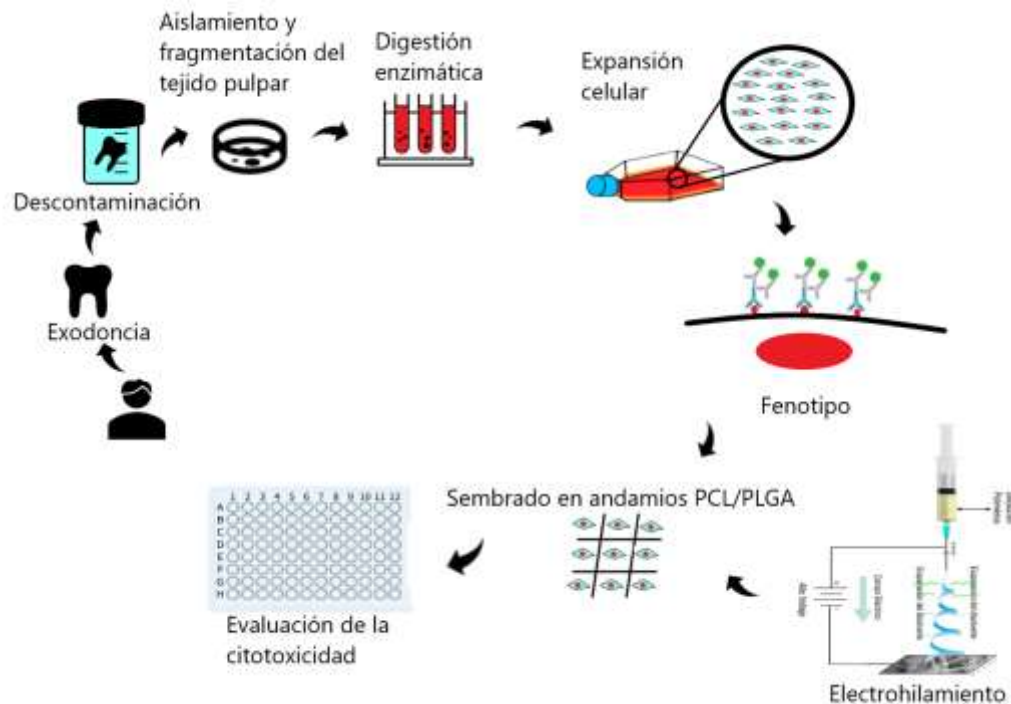


Figura 3. Esquema del proceso para la obtención de células de la pulpa dental por medio de digestión enzimática, la expansión celular hasta obtener confluencia celular para realizar la caracterización de células troncales de pulpa dental (DPSCs, por sus siglas en inglés), también se ejemplifica la siembra de las células en los andamios de PCL/PLGA para evaluar el efecto citotóxico de los mismos con las DPSCs.

Inmunofenotipo.

Las células troncales de la pulpa dental (DPSC por sus siglas en inglés) se caracterizaron por inmunofluorescencia con los anticuerpos antihumano-CD44 y antihumano-STRO-1. Se sembraron DPSC (5×10^3 células/ml) en una placa de 24 pozos (TPP, Techno Plastic Products) y se incubó a 37 °C con una atmósfera humidificada con 95% de O₂ y 5% de CO₂ durante 48 horas, hasta lograr una semi-confluencia, transcurridas esas horas, se eliminó el medio de cultivo, se lavó la placa de 24 pozos con PBS (Biowest) para remover células muertas y eliminar restos de medio de cultivo, posteriormente, las células se fijaron con formalina 10% (Sigma-Aldrich) durante 20 minutos a temperatura ambiente, se permeabilizaron con Tritón™X-100 (Sigma-Aldrich) al 0.50% durante 20 minutos, y se bloqueó con albumina de suero bovino (Santa Cruz)

al 1% durante 30 minutos. A continuación, se agregaron los anticuerpos primarios contra los marcadores de superficie: anti-humano-CD44 (Santa Cruz) a una dilución de 1:200, y el anticuerpo anti-humano-STRO-1(Santa Cruz) a una dilución de 1:100. La placa con las células se colocó en un refrigerador marca LG a una temperatura controlada de 4 °C durante toda la noche. Al día siguiente se descartó la solución con los anticuerpos primarios y se lavaron las células con PBS. Para la visualización del fenotipo, se agregó el anticuerpo secundario Alexa Fluor® 488 (Thermo Fisher) y se incubó durante 1 hora a temperatura ambiente, se descartó el anticuerpo secundario y nuevamente se lavó nuevamente con PBS para agregar 200µl por pozo de DAPI (4',6-Diamidino-2-Phenylindole, Dihydrochloride Invitrogen™) en una dilución de 1:1000 para teñir los núcleos, se lavaron las

células con agua destilada y se observó en microscopio confocal (Nikon A1R+STORM) ubicado en el Instituto de Investigaciones Biomedicas, C.U, UNAM (29,30,31).

Viabilidad celular

En el presente estudio se utilizó el ensayo colorimétrico por absorbancia MTT (3-(4,5-dimetiltiazol-2-yl) 2,5-difeniltetrazolium bromuro) (Roche) para evaluar la viabilidad celular de las DPSC en andamios PCL/PLGA (90:10) y PCL/PLGA (80:20). Para cada tipo de andamio se sembraron 5×10^3 células por pocillo en placas de 96 pozos (TPP, Techno Plastic Products) de la siguiente manera: células en pozo, células en andamios de PCL:PLGA (90:10) y PCL:PLGA (80:20), evaluando a diferentes tiempos 3, 7 y 10 días. Las células en pozo sirvieron como grupo control y las células en cada uno de los andamios sirvieron como grupos experimentales, todos los grupos se realizaron por triplicado. Después de cada tiempo, el medio de cultivo de los pozos seleccionados para este ensayo se desechó con la ayuda de micropipetas e inmediatamente se lavó con PBS y se añadieron 70 μ l de solución MTT al 10% por pozo, las placas de cultivo se resguardaron de la luz y se colocaron y se incubó durante tres horas a 37 °C con una atmósfera de 5% de CO₂, posteriormente se añadieron 100 μ l de isopropanol para solubilizar las sales de formazán y realizar la lectura mediante un lector de placas de

ELISA (Biotek Elx808) equipado con un filtro de 562-630 nm (30,31).

Análisis estadístico

Se usó el software Stata versión 14 (Stata Corp, College Station, TX, USA) para el análisis estadístico de los resultados del ensayo MTT. Los datos obtenidos se expresaron como media con sus respectivas desviaciones estándar. Cuando se realizó la comparación estadística entre el grupo control (células en pozo) con cada uno de los grupos experimentales (células en andamios de PCL/PLGA) se analizaron mediante la prueba "t" de Student. Se consideró como diferencia significativa un valor de $p < 0.05$.

3. Resultados

Microscopía electrónica de barrido

Los diámetros de fibra y tamaños de poro de los andamios se muestran en la tabla 1. Los resultados muestran que ambos parámetros se encuentran a una escala micrométrica, con valores de diámetro de fibra de $3.23 \pm 0.9 \mu\text{m}$ para la mezcla PCL/PLGA 90:10, y de $2.95 \pm 1.1 \mu\text{m}$ para la mezcla 80:20. Por su parte, el tamaño de poro fue de $9.10 \pm 1.02 \mu\text{m}$ y de $11.45 \pm 1.22 \mu\text{m}$ respectivamente para cada mezcla de polímeros.

En la figura 4 se muestra la micrografía de andamios hechos a partir de PCL/PLGA (90:10) y PCL/PLGA (80:20).

Tabla 1. Diámetros de fibra y tamaños de poro de los andamios.

Andamio	Diámetro de fibras (μm)	Diámetro de poro (μm)
PCL/PLGA (90:10)	3.23 ± 0.9	9.10 ± 1.02
PCL/PLGA (80:20)	2.95 ± 1.1	11.45 ± 1.22

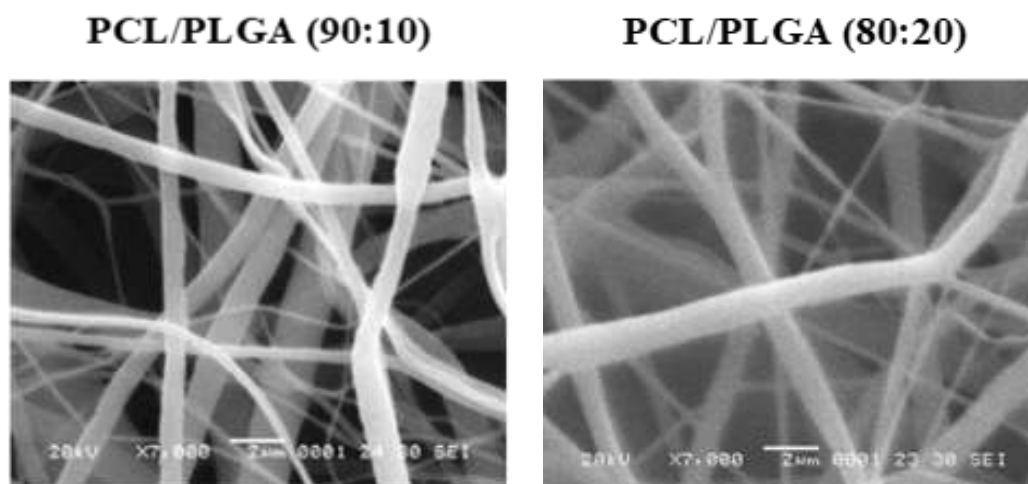


Figura 4. Micrografías de andamios PCL/PLGA en relaciones 90:10 y 80:20, obtenidas por Microscopía electrónica de barrido (MEB) con una ampliación de 7000x.

Espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR)

En el espectro de la figura 5 se muestran los picos pertenecientes a los andamios (PLGA 20% y PLGA 10%), en donde se identificaron bandas del carbonilo (tensión) en 1733 cm^{-1} , así como tensión asimétrica del grupo CH_2 en 2862 cm^{-1} . También se observan los grupos C-O y C-C a tensión en 1300 cm^{-1} que pertenecen a la fase cristalina de la policaprolactona. En 1244 cm^{-1} se identificó el pico C-O-C en tensión asimétrica, y en 1188 cm^{-1} se observa el pico O-C-O en tensión. Los picos C-O y C-C en tensión que aparecen en 1152 cm^{-1} pertenecen a la fase amorfa de la policaprolactona (Elzein T et al., 2004). Todos estos grupos funcionales son correspondientes a los polímeros utilizados (PCL y PLGA), por lo que no existieron formaciones de nuevos enlaces durante la disolución polimérica.

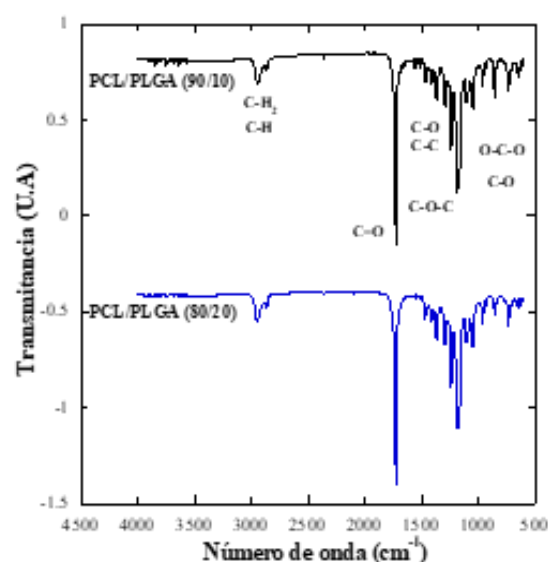


Figura 5. Espectro FTIR de los andamios PCL/PLGA (90:10) y PCL/PLGA (80:20).

Cultivo celular

Se obtuvieron las células por la técnica de digestión enzimática, las cuales se adherieron a la superficie de la placa de cultivo de acuerdo a los criterios de Dominici M., 2006 (figura 6) (32). Las células proliferaron extensamente exhibiendo una morfología fibroblastoide homogénea, agrupándose en gran número y formando colonias (33).

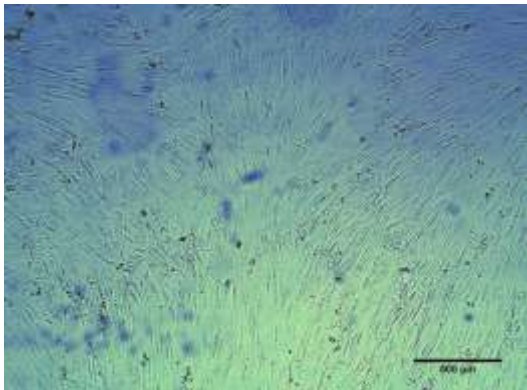


Figura 6. Células troncales de pulpa dental de humano con morfología fibroblastoide homogénea adheridas a la superficie de la placa de cultivo por

microscopia óptica de campo claro, (Leica, Alemania).

Inmunofenotipo

El análisis inmunofenotípico de DPSC reveló la expresión positiva para los marcadores mesenquimatosos, CD44 (figura 7-A) y STRO-1 (figura 7-B). Estos resultados indicaron la presencia de marcadores de células troncales.

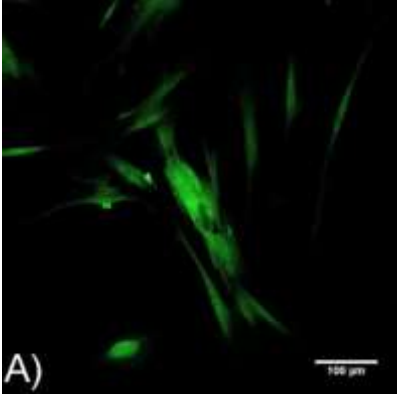
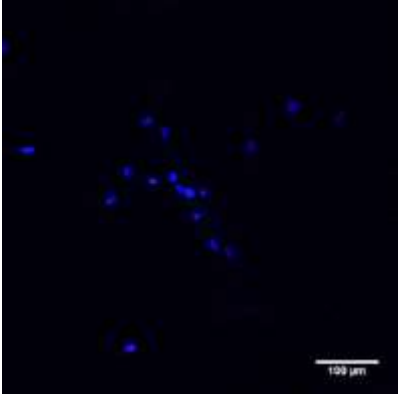
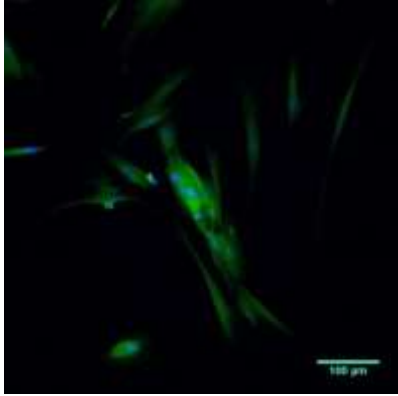
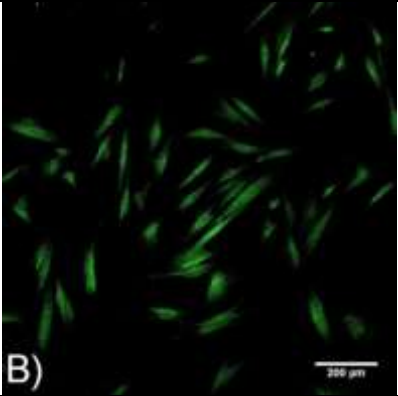
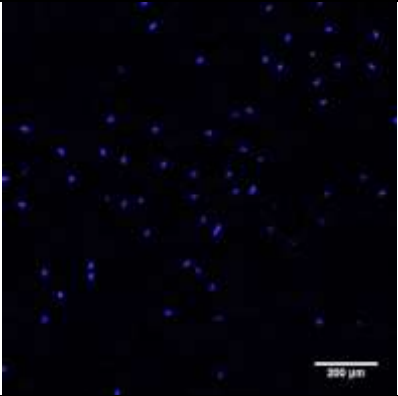
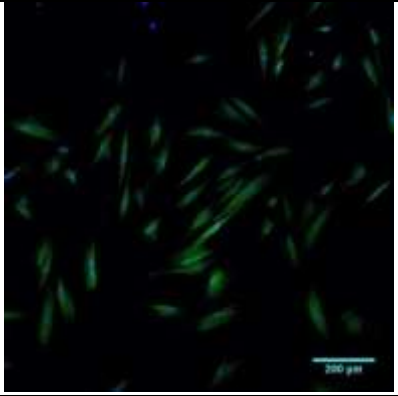
CD44	DAPI	MERGE
		
STRO-1	DAPI	MERGE
		

Figura 7.- Imágenes de inmunofenotipo de células troncales de pulpa dental de humano con los anticuerpos anti humano-CD44 y anti humano-STRO-1. (A y B) anticuerpo secundario Alexa Flúor 488, denótase la membrana celular en fluorescencia en color verde y los núcleos celulares teñidos con DAPI en color azul por microscopio confocal (Nikon A1R+ STORM).

Viabilidad celular

Los resultados de la viabilidad celular se presentan en la figura 8. Después de 3 días, la viabilidad celular de las células en pozo mostró una media de 0.264 ± 0.03 , las células en andamios de PCL/PLGA (90:10) exhibieron una media de 0.185 ± 0.106 , y

las células en andamios de PCL/PLGA (80:20) expresaron una media de 0.184 ± 0.023 . Sin embargo, no hubo diferencia estadísticamente significativa ($p > 0.05$). Después de 7 días, tanto la media de la viabilidad celular en el andamio PCL/PLGA 90:10 (0.260 ± 0.035), como

en el PCL/PLGA 80:20 (0.328 ± 0.017), fueron significativamente menores ($p < 0.05$) respecto al de las células en pozo (0.388 ± 0.006). De igual manera a los 10 días, tanto la viabilidad celular en el

andamio PCL/PLGA 90:10 (0.349 ± 0.010), como en el PCL/PLGA (80:20) (0.389 ± 0.003) fueron significativamente menores ($p < 0.05$) en comparación con las células en pozo (0.463 ± 0.011).

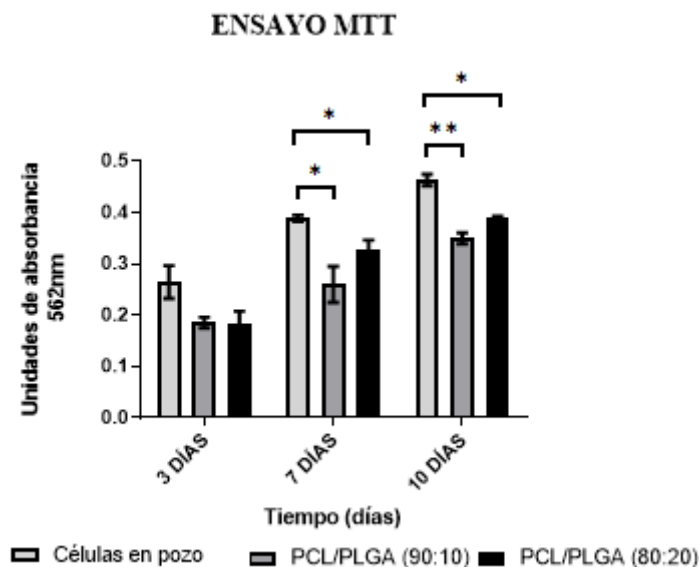


Figura 8. Gráfica de viabilidad celular determinada por ensayo de MTT después de 3, 7 y 10 días. * Diferencia estadísticamente significativa $P < 0.05$. ** Diferencia estadísticamente significativa $P < 0.01$.

4. Discusión

La poli-caprolactona (PCL) y el ácido poliláctico glicólico (PLGA) son dos de los polímeros más empleados en la elaboración de andamios para aplicaciones en ingeniería tisular y aprobados por la administración de alimentos y medicamentos de los Estados Unidos de Norteamérica (FDA en inglés) para su uso en humanos. Diferentes publicaciones han reportado el amplio uso de la PCL, ya que es un polímero relativamente barato, estable en el manejo y almacenamiento (34); además, es flexible y se ha utilizado para superar la fragilidad y baja elongación de otros polímeros, como el PLGA (35). Una de las grandes desventajas de la PCL es su hidrofobicidad, pero al mezclarla con el PLGA mejoran las propiedades de adhesión y proliferación celular (35). Por otro lado, Jay W et al. (2003) recomiendan no emplear altos porcentaje de PLGA cuando se realiza una mezcla con la PCL (36), lo mismo concluyen Hiep y Lee (2010), Milosevic M, et al. (2020) y Steven

Elder et al. (2022), quienes mencionan que la presencia de PLGA en constructos tisulares aumentaron la adhesión celular, en contraste con un andamio hecho solo con PCL (25,26,37). Cabe mencionar que la concentración PCL/PLGA (90:10) y PCL/PLGA (80:20) fue acorde a la metodología empleada por Hielp y cols, posteriormente, nuestro grupo de trabajo publicó (Sánchez-Pech et al, 2020) una investigación con resultados muy alentadores empleando la misma concentración de PCL/PLGA (90:10) y PCL/PLGA (80:20) al usar células uretrales de cerdo, esos andamios no fueron tóxicos y permitieron la viabilidad y proliferación celular.

Respecto a la fabricación de los andamios, el método de electrohilado es uno de los más simples, entre todos los métodos para la elaboración de matrices o andamios con fibras de naturaleza polimérica, esto con el fin de simular las matrices extracelulares. En ese sentido, Fioretta, E. S. et al. (2014)

señalan que en los andamios un tamaño de poro en el orden micrométrico propicia infiltración y adhesión celular, además de permitir que los nutrientes y el oxígeno penetren en el andamio (38); por lo que estas condiciones probablemente puedan aumentar la viabilidad celular. Respecto a la morfología de las microfibras se encuentra influenciada por diferentes parámetros, tales como el voltaje aplicado, la rapidez de flujo de la disolución polimérica, la distancia entre el ánodo y el cátodo; así como las propiedades de la disolución, ya sea concentración, tensión superficial y composición química de los disolventes. En nuestro caso los andamios fueron elaborados bajo las mismas condiciones, el aumento del 26% en el diámetro de los poros se atribuye al incremento en la proporción de PLGA en la mezcla de polímeros durante la elaboración de los andamios (39).

Por otro lado, las células troncales de diferentes fuentes han sido empleadas en muchas investigaciones *in vitro*, *in vivo* y en tratamientos en humanos. Nuestro grupo de investigación se caracteriza por emplear esta fuente de tejido humano (29-31) y de cerdo (40), para evaluar andamios de diferente naturaleza. En ese sentido, queremos resaltar cuatro propiedades de este tipo de células, en primer lugar las células troncales de la pulpa de los molares ha ido ganando terreno por la facilidad de obtener los dientes, generalmente de manera sencilla y ambulatoria, cuando es un molar erupcionado; además estas células son altamente viables (41), tienen una mejor tasa de proliferación respecto a las obtenidas de médula ósea (42) y una capacidad multipotente para diferenciarse a mínimo trilineaje mesodérmico (43).

En la elaboración de andamios (44) el éxito es la interacción célula-andamio, ya que esto se verá reflejado en la adhesión, viabilidad y proliferación (45,46) en su proceso fisiológico hacia la formación de la matriz extracelular (47,48). En ese

sentido, el ensayo de MTT evidenció diferencias en el comportamiento de la viabilidad de las células en los andamios a los diferentes tiempos evaluados. Aunque al tercer día de cultivo la viabilidad celular fue similar entre los andamios, para el séptimo y décimo días el andamio con mayor proporción de PLGA (80:20), presentó mayor viabilidad, lo que podría explicarse por el incremento de tamaño del poro en el andamio, y la mayor capacidad hidrofílica del PLGA en comparación con la PCL; siendo esta última una característica importante en la absorción de fluidos fisiológicos y en la transferencia de nutrientes a través del andamio (49). En 2017, Zou H y colaboradores, mencionan que el andamio de PLGA no es lo suficientemente amigable para la adhesión y proliferación celular (50); proponiendo mezclar el PLGA con colágeno, para mejorar la bioactividad de la superficie de los andamios elaborados (51); nuestros resultados evidencian que, en una proporción adecuada en los andamios, el PLGA incrementa la proliferación celular.

Por último, entre los requisitos en ingeniería tisular para la elaboración de constructos tisulares, están las evaluaciones *in vitro*, las cuales deben demostrar, entre otros aspectos, que favorecen la viabilidad y la proliferación celular; así como las posteriores evaluaciones de biocompatibilidad que deben ser realizadas en modelos *in vivo* (52), con el propósito de evaluar el rechazo de los constructos tisulares para que el huésped no lo reconozca como cuerpo extraño. Finalmente, Gangolli y colaboradores en 2019 (53) hacen énfasis en el uso de materiales, como PCL y PLGA ya que están aprobados por la FDA, los cuales fueron empleados en este proyecto.

5. Conclusiones

Se comprobó que la técnica de electrohilado favorece la creación de andamios con una arquitectura

microscópica estable y reproducible, misma que puede favorecer la adhesión y proliferación de células troncales de pulpa dental. Las células cultivadas dieron positivo para fenotipo de troncalidad.

Los andamios de PCL/PLGA (80:20) mostraron mayor viabilidad celular en los días 7 y 10 que la mezcla PCL/PLGA (90:10), demostrándose que ninguna de las dos mezclas evidenció efectos citotóxicos sobre las células troncales de pulpa dental.

6. Agradecimientos

Proyecto financiado por el Programa de Apoyo a los Profesores de Carrera (PAPCA) FESI-DIP-PAPCA-2016-14.

Todos los autores declaran que no existe conflicto de interés.

7. Referencias

- Berthiaume, F., Maguire, T. J., & Yarmush, M. L. (2011). Tissue engineering and regenerative medicine: history, progress, and challenges. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 2, 403–430. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-061010-114257>.
- Pittenger, M. F., Mackay, A. M., Beck, S. C., Jaiswal, R. K., Douglas, R., Mosca, J. D., Moorman, M. A., Simonetti, D. W., Craig, S., & Marshak, D. R. (1999). *Multilineage potential of adult human mesenchymal stem cells*. *Science (New York, N.Y.)*, 284(5411), 143–147. <https://doi.org/10.1126/science.284.5411.143>.
- Caplan, A. I. (1990). *Cell delivery and tissue regeneration*. *Journal of Controlled Release*, 11(1-3), 157–165. [https://doi.org/10.1016/0168-3659\(90\)90129-H](https://doi.org/10.1016/0168-3659(90)90129-H).
- Ullah, I., Subbarao, R. B., & Rho, G. J. (2015). *Human mesenchymal stem cells - current trends and future prospective*. *Bioscience reports*, 35(2), e00191. <https://doi.org/10.1042/BSR20150025>.
- Friedenstein, A. J., Deriglasova, U. F., Kulagina, N. N., Panasuk, A. F., Rudakowa, S. F., Luriá, E. A., & Ruadkow, I. A. (1974). *Precursors for fibroblasts in different populations of hematopoietic cells as detected by the in vitro colony assay method*. *Experimental hematology*, 2(2), 83–92.
- Erices, A., Conget, P., & Minguell, J. J. (2000). *Mesenchymal progenitor cells in human umbilical cord blood*. *British journal of haematology*, 109(1), 235–242. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2141.2000.01986.x>.
- Gronthos, S., Mankani, M., Brahimi, J., Robey, P. G., & Shi, S. (2000). *Postnatal human dental pulp stem cells (DPSCs) in vitro and in vivo*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97(25), 13625–13630. <https://doi.org/10.1073/pnas.240309797>.
- Sonoyama, W., Liu, Y., Fang, D., Yamaza, T., Seo, B. M., Zhang, C., Liu, H., Gronthos, S., Wang, C. Y., Wang, S., & Shi, S. (2006). *Mesenchymal stem cell-mediated functional tooth regeneration in swine*. *PloS one*, 1(1), e79. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0000079>.
- Sasaki, R., Aoki, S., Yamato, M., Uchiyama, H., Wada, K., Ogiuchi, H., Okano, T., & Ando, T. (2011). *PLGA artificial nerve conduits with dental pulp cells promote facial nerve regeneration*. *Journal of tissue engineering and regenerative medicine*, 5(10), 823–830. <https://doi.org/10.1002/term.387>.
- Tamaki, Y., Nakahara, T., Ishikawa, H., & Sato, S. (2013). *In vitro analysis of mesenchymal stem cells derived from human teeth and bone marrow*. *Odontology*, 101(2), 121–132. <https://doi.org/10.1007/s10266-012-0075-0>.
- Bártolo, P.J., Chua, C.K., Almeida, H.A., Chou S.M. y Lim S.C. (2009).

Biomanufacturing for tissue engineering: Present and future trends, Virtual and Physical Prototyping, 4:4, 203-216. <https://doi.org/10.1080/17452750903476288>.

12. Bartolo, P., Kruth, J.P., Silva, J., Levy G., Malshe, A. Rajurkar, K.P., Mitsuishi, M., Ciurana, J. y Leu M. (2012). *Biomedical production of implants by additive electro-chemical and physical processes*. CIRP annals 2012; 61(2): 635-655. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.005>.

13. Domingos, M., Chiellini, F., Gloria, A., Ambrosio, L., Bartolo, P. and Chiellini, E. (2012), "Effect of process parameters on the morphological and mechanical properties of 3D Bioextruded poly(ϵ -caprolactone) scaffolds", Rapid Prototyping Journal, Vol. 18 No. 1, pp. 56-67. <https://doi.org/10.1108/13552541211193502>.

14. De Santis, R., Gloria, A., Russo, T., D'Amora, U., Zeppetelli, S., Tampieri, A., Herrmannsdörfer T. y Ambrosio, L. A route toward the development of 3D magnetic scaffolds with tailored mechanical and morphological properties for hard tissue regeneration: Preliminary study: A basic approach toward the design of 3D rapid prototyped magnetic scaffolds for hard-tissue regeneration is presented and validated in this paper. Virtual and Physical Prototyping 2011; 6(4): 189-195. <https://doi.org/10.1080/17452759.2011.631324>.

15. Collins, M. N., & Birkinshaw, C. (2013). Hyaluronic acid based scaffolds for tissue engineering--a review. *Carbohydrate polymers*, 92(2), 1262–1279. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2012.10.028>

16. Afewerki, S., Sheikhi, A., Kannan, S., Ahadian, S., & Khademhosseini, A. (2018). Gelatin-polysaccharide composite

scaffolds for 3D cell culture and tissue engineering: Towards natural therapeutics. *Bioengineering & translational medicine*, 4(1), 96–115. <https://doi.org/10.1002/btm2.10124>

17. Badylak, S. F., Freytes, D. O., & Gilbert, T. W. (2009). *Extracellular matrix as a biological scaffold material: Structure and function*. *Acta biomaterialia*, 5(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2008.09.013>.

18. Patrício, T., Domingos, M., Gloria, A., & Bártolo, P. (2013). *Characterisation of PCL and PCL/PLA Scaffolds for Tissue Engineering*. *Procedia CIRP*, 5, 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.01.022>.

19. Nitya, G., Nair, G. T., Mony, U., Chennazhi, K. P., & Nair, S. V. (2012). *In vitro evaluation of electrospun PCL/nanoclay composite scaffold for bone tissue engineering*. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 23(7), 1749–1761. <https://doi.org/10.1007/s10856-012-4647-x>.

20. Fu, W., Liu, Z., Feng, B., Hu, R., He, X., Wang, H., Yin, M., Huang, H., Zhang, H., & Wang, W. (2014). *Electrospun gelatin/PCL and collagen/PLCL scaffolds for vascular tissue engineering*. *International journal of nanomedicine*, 9, 2335–2344. <https://doi.org/10.2147/IJN.S61375>.

21. Zamani, F., Amani-Tehran, M., Latifi, M., & Shokrgozar, M. A. (2013). *The influence of surface nanoroughness of electrospun PLGA nanofibrous scaffold on nerve cell adhesion and proliferation*. *Journal of materials science. Materials in medicine*, 24(6), 1551–1560. <https://doi.org/10.1007/s10856-013-4905-6>.

22. García, N.G. (2013). *Electrospinning: una técnica fascinante para la obtención de nanofibras poliméricas*. *Revista de*

plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros; 677: 166-173.

23. O'Driscoll S. W. (1999). *Articular cartilage regeneration using periosteum*. Clinical orthopaedics and related research, (367 Suppl), S186–S203. <https://doi.org/10.1097/00003086-199910001-00020>.

24. Majumdar, M. K., Banks, V., Peluso, D. P., & Morris, E. A. (2000). *Isolation, characterization, and chondrogenic potential of human bone marrow-derived multipotential stromal cells*. Journal of cellular physiology, 185(1), 98–106. [https://doi.org/10.1002/1097-4652\(200010\)185:1<98::AID-JCP9>3.0.CO;2-1](https://doi.org/10.1002/1097-4652(200010)185:1<98::AID-JCP9>3.0.CO;2-1).

25. Hiep, N. T., & Lee, B. T. (2010). *Electro-spinning of PLGA/PCL blends for tissue engineering and their biocompatibility*. Journal of materials science. Materials in medicine, 21(6), 1969–1978. <https://doi.org/10.1007/s10856-010-4048-y>

26. Milosevic, M., Stojanovic, D. B., Simic, V., Grkovic, M., Bjelovic, M., Uskokovic, P. S., & Kojic, M. (2020). *Preparation and modeling of three-layered PCL/PLGA/PCL fibrous scaffolds for prolonged drug release*. Scientific reports, 10(1), 11126. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68117-9>

27. Maurmann N., D. P Pereira, D. Burguez, F.D.A. de S Pereira, P. Inforçatti Neto, R. A. Rezende, D. Gamba, JVL da Silva y P. Pranke. (2017). *Mesenchymal stem cells cultivated on scaffolds formed by 3D printed PCL matrices, coated with PLGA electrospun nanofibers for use in tissue engineering*. Biomed. Phys. Eng. Express 3,045005. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/aa6308>.

28. Sánchez-Pech, J. C., Rosales-Ibáñez, R., Cauich-Rodríguez, J. V., Carrillo-Escalante, H. J., Rodríguez-Navarrete, A., Avila-Ortega, A., & Hernández-Sánchez,

F. (2020). *Design, synthesis, characterization, and cytotoxicity of PCL/PLGA scaffolds through plasma treatment in the presence of pyrrole for possible use in urethral tissue engineering*. Journal of biomaterials applications, 34(6), 840–850. <https://doi.org/10.1177/0885328219882638>.

29. Guzmán-Urbe, D., Estrada, K. N., Guillén, A., Pérez, S. M., & Ibáñez, R. R. (2012). *Development of a three-dimensional tissue construct from dental human ectomesenchymal stem cells: in vitro and in vivo study*. The open dentistry journal, 6, 226–234. <https://doi.org/10.2174/1874210601206010226>.

30. Flores-Cedillo, M. L., Alvarado-Estrada, K. N., Pozos-Guillén, A. J., Murguía-Ibarra, J. S., Vidal, M. A., Cervantes-Uc, J. M., Rosales-Ibáñez, R., & Cauich-Rodríguez, J. V. (2016). *Multiwall carbon nanotubes/polycaprolactone scaffolds seeded with human dental pulp stem cells for bone tissue regeneration*. Journal of materials science. Materials in medicine, 27(2), 35. <https://doi.org/10.1007/s10856-015-5640-y>.

31. Martin-Del-Campo, M., Rosales-Ibáñez, R., Alvarado, K., Sampedro, J. G., Garcia-Sepulveda, C. A., Deb, S., San Román, J., & Rojo, L. (2016). *Strontium folate loaded biohybrid scaffolds seeded with dental pulp stem cells induce in vivo bone regeneration in critical sized defects*. Biomaterials science, 4(11), 1596–1604. <https://doi.org/10.1039/c6bm00459h.3>.

32. Dominici, M., Le Blanc, K., Mueller, I., Slaper-Cortenbach, I., Marini, F., Krause, D., Deans, R., Keating, A., Prockop, D.j, & Horwitz, E. (2006). *Minimal criteria for defining multipotent mesenchymal stromal cells. The International Society for Cellular Therapy position statement*. Cytotherapy, 8(4), 315–317.

<https://doi.org/10.1080/14653240600855905>

33. Sivasankar, V., & Ranganathan, K. (2016). *Growth characteristics and expression of CD73 and CD146 in cells cultured from dental pulp*. *Journal of investigative and clinical dentistry*, 7(3), 278–285.

<https://doi.org/10.1111/jicd.12155>.

34. Tang, Z. G., Callaghan, J. T., & Hunt, J. A. (2005). The physical properties and response of osteoblasts to solution cast films of PLGA doped polycaprolactone. *Biomaterials*, 26(33), 6618–6624. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2005.04.013>

35. Kim, J. Y., & Cho, D.-W. (2009). *Blended PCL/PLGA scaffold fabrication using multi-head deposition system*. *Microelectronic Engineering*, 86(4-6), 1447–

1450. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2008.11.026>

36. Calvert, J. W., Marra, K. G., Cook, L., Kumta, P. N., DiMilla, P. A., & Weiss, L. E. (2000). Characterization of osteoblast-like behavior of cultured bone marrow stromal cells on various polymer surfaces. *Journal of biomedical materials research*, 52(2), 279–284.

[https://doi.org/10.1002/1097-4636\(200011\)52:2<279::aid-jbm6>3.0.co;2-8](https://doi.org/10.1002/1097-4636(200011)52:2<279::aid-jbm6>3.0.co;2-8)

37. Elder, S., Roberson, J. G., Warren, J., Lawson, R., Young, D., Stokes, S., & Ross, M. K. (2022). Evaluation of Electrospun PCL-PLGA for Sustained Delivery of Kartogenin. *Molecules (Basel, Switzerland)*, 27(12), 3739. <https://doi.org/10.3390/molecules27123739>

38. Fioretta, E. S., Simonet, M., Smits, A. I., Baaijens, F. P., & Bouten, C. V. (2014). *Differential response of endothelial and endothelial colony forming cells on electrospun scaffolds with distinct microfiber diameters*. *Biomacromolecules*,

15(3), 821–829. <https://doi.org/10.1021/bm4016418>.

39. Nezarati, R. M., Eifert, M. B., & Cosgriff-Hernandez, E. (2013). *Effects of humidity and solution viscosity on electrospun fiber morphology*. *Tissue engineering. Part C, Methods*, 19(10), 810–819.

<https://doi.org/10.1089/ten.TEC.2012.0671>

40. Rosales-Ibáñez, R., Cubo-Mateo, N., Rodríguez-Navarrete, A., González-González, A. M., Villamar-Duque, T. E., Flores-Sánchez, L. O., & Rodríguez-Lorenzo, L. M. (2021). *Assessment of a PCL-3D Printing-Dental Pulp Stem Cells Triplet for Bone Engineering: An In Vitro Study*. *Polymers*, 13(7), 1154.

<https://doi.org/10.3390/polym13071154>

41. Alraies, A., Alaidaroos, N. Y., Waddington, R. J., Moseley, R., & Sloan, A. J. (2017). *Variation in human dental pulp stem cell ageing profiles reflect contrasting proliferative and regenerative capabilities*. *BMC cell biology*, 18(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s12860-017-0128-x>

42. Amid, R., Kadkhodazadeh, M., Enssi, M., & Dehanvi, F. (2021). *In Vitro Activity of Dental Pulp Stem Cells versus the Bone Marrow Stem Cells Cultured in Presence of a Bone Allograft*. *Journal of long-term effects of medical implants*, 31(1), 7–14. <https://doi.org/10.1615/JLongTermEffMedImplants.2020036956>

43. Labedz-Maslowska, A., Bryniarska, N., Kubiak, A., Kaczmarzyk, T., Sekula-Stryjewska, M., Noga, S., Boruckowski, D., Madeja, Z., & Zuba-Surma, E. (2020). *Multilineage Differentiation Potential of Human Dental Pulp Stem Cells-Impact of 3D and Hypoxic Environment on Osteogenesis In Vitro*. *International journal of molecular sciences*, 21(17), 6172. <https://doi.org/10.3390/ijms21176172>

44. Hynes R. O. (2009). *The extracellular matrix: not just pretty fibrils*. *Science (New York, N.Y.)*, 326(5957), 1216–1219. <https://doi.org/10.1126/science.1176009>.

45. Ling, L. E., Feng, L., Liu, H. C., Wang, D. S., Shi, Z. P., Wang, J. C., Luo, W., & Lv, Y. (2015). *The effect of calcium phosphate composite scaffolds on the osteogenic differentiation of rabbit dental pulp stem cells*. Journal of biomedical materials research. Part A, 103(5), 1732–1745.
<https://doi.org/10.1002/jbm.a.35303.3>.
46. Jiménez, N. T., Carlos Munévar, J., González, J. M., Infante, C., & Lara, S. (2018). *In vitro response of dental pulp stem cells in 3D scaffolds: A regenerative bone material*. Heliyon, 4(9), e00775.
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00775>.
47. Markovic, D., Karadzic, I., Jokanovic, V., Vukovic, A., Vucic, V. (2016). *Biological aspects of application of nanomaterials in tissue engineering*. Chem. Ind. Chem. Eng. Q. 22 (2) 145–153
<https://doi.org/10.2298/CICEQ141231028M>.
48. Chen, G., Chen, J., Yang, B., Li, L., Luo, X., Zhang, X., Feng, L., Jiang, Z., Yu, M., Guo, W., & Tian, W. (2015). *Combination of aligned PLGA/Gelatin electrospun sheets, native dental pulp extracellular matrix and treated dentin matrix as substrates for tooth root regeneration*. Biomaterials, 52, 56–70.
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2015.02.011>.
49. Rickert, D., Lendlein, A., Peters, I., Moses, M. A., & Franke, R. P. (2006). *Biocompatibility testing of novel multifunctional polymeric biomaterials for tissue engineering applications in head and neck surgery: an overview*. European archives of oto-rhino-laryngology : official journal of the European Federation of Oto-Rhino-Laryngological Societies (EUFOS) : affiliated with the German Society for Oto-Rhino-Laryngology - Head and Neck Surgery, 263(3), 215–222.
<https://doi.org/10.1007/s00405-005-0950-1>
50. Zou, H., Wang, G., Song, F. y Shi, X. (2017). *Investigation of Human Dental Pulp Cells on a Potential Injectable Poly(lactic-co-glycolic acid) Microsphere Scaffold*. J Endod; 43(5): 745-750.
<https://doi.org/10.1016/j.joen.2016.12.019>.
51. Khojasteh, A., Motamedian, S. R., Rad, M. R., Shahriari, M. H., & Nadjmi, N. (2015). *Polymeric vs hydroxyapatite-based scaffolds on dental pulp stem cell proliferation and differentiation*. World journal of stem cells, 7(10), 1215–1221.
<https://doi.org/10.4252/wjsc.v7.i10.1215>.
52. D'Souza, S., Faraj, J. A., Dorati, R., & DeLuca, P. P. (2014). *A short term quality control tool for biodegradable microspheres*. AAPS PharmSciTech, 15(3), 530–541.
<https://doi.org/10.1208/s12249-013-0052-0>.
53. Gangolli, R. A., Devlin, S. M., Gerstenhaber, J. A., Lelkes, P. I., & Yang, M. (2019). *A Bilayered Poly (Lactic-Co-Glycolic Acid) Scaffold Provides Differential Cues for the Differentiation of Dental Pulp Stem Cells*. Tissue engineering. Part A, 25(3-4), 224–233.
<https://doi.org/10.1089/ten.TEA.2018.0041>.
54. Atala, A., Kasper, F. K., & Mikos, A. G. (2012). *Engineering complex tissues*. Science translational medicine, 4(160), 160rv12.
<https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3004890>.



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Autopercepción de las emociones de los universitarios en el regreso a las actividades presenciales tras el fin del aislamiento voluntario por el COVID-19

Self-perception of the university student's emotions on returning to face-to-face activities after the end of voluntary isolation by COVID-19

Bricio-Barrios, E.E.^{a,b}, Arceo-Díaz, S.^{b*}, Bricio-Barrios, J.A.^c, Ochoa-Flores, S.^d, Ramírez-Guzmán, M.C.^d, Flores-Anguiano, M.^b

^a Departamento de Bioquímica. Tecnológico Nacional de México campus Colima; C.P. 28976, Villa de Álvarez, Col., México.

^b Departamento de Ciencias Básicas. Tecnológico Nacional de México campus Colima; C.P. 28976, Villa de Álvarez, Col., México.

^c Facultad de Medicina, Universidad de Colima; C.P. 28040, Colima, Col., México.

^d Departamento de Desarrollo Académico; Tecnológico Nacional de México campus Colima; C.P. 28976, Villa de Álvarez, Col., México.

elena.bricio@colima.tecnm.mx; santiago.arceo@colima.tecnm.mx*; salvador.ochoa@colima.tecnm.mx; cecilia.ramirez@colima.tecnm.mx; jbricio@ucol.mx; mynerva.flores@colima.tecnm.mx

Innovación tecnológica: Tecnologías de la Información y Comunicación.

Área de aplicación: Educación y Comunicación.

Recibido: 26 septiembre 2022

Aceptado: 25 marzo 2023

Abstract

The objective of this work is to determine which are the predominant emotions of the students of the Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Colima after the return to academic activities during the COVID 19 serving as a basis for the implementation of measures to mitigate the harmful effects of the SARS-CoV-2 pandemic. The intensity of emotions such as joy, sadness, hostility, and anxiety was quantified using the Mood Assessment Scale (EVEA, for its acronym in Spanish), through 16 questions to identify these emotions under an 11-level Likert-type scale ranging from "none" to "overwhelming" intensity. These surveys were assigned every week during the first month of return to face-to-face activities to five groups with different levels of academic progress studying in the humanities and exact sciences. Data collection was carried out through

"Google Forms" where the participants chose the level of intensity of 16 questions associated with the four emotions. At the end of the four weeks of sampling, with a total of 288 responses, the database was curated, processed and the results analyzed through the online platform "Google Colab", which allowed different classifications to be made based on gender, level of academic progress, subject studied and teacher who taught the subject. The results showed that, in all groups of students, joy is most frequently identified emotion. However, students who took written assessments for the first time, after social isolation, showed higher intensity of negative emotions, such as hostility and anxiety, than those who were taking a course for the second or third time. When evaluating the temporal evolution of the intensity of emotions between weeks, a statistically significant difference in the joy-anxiety and hostility-sadness relationship of the first compared to the second week of face-to-face activities was observed in most groups. Meanwhile, the emotion correlation test showed that advanced semester students distinguish the mix of positive and negative feelings. These results can be implemented as a niche of opportunity for the incorporation of self-help techniques that allow the identification, and control of emotions that are associated with low academic and social achievement.

Keywords: distance education, emotional state, pandemic, SARS-CoV-2.

Resumen

El objetivo de este trabajo es determinar cuáles son las emociones predominantes en los estudiantes del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Colima tras el regreso a las actividades académicas por el periodo de contingencia de la COVID-19, sirviendo como base para la implementación de medidas de mitigación de los efectos nocivos de la pandemia del SARS-CoV-2. La intensidad de emociones como alegría, tristeza, hostilidad y ansiedad se cuantificó mediante la Escala de Evaluación del Estado de Ánimo (EVEA), a través de 16 preguntas para identificar estas emociones bajo una escala tipo Likert de 11 niveles que van desde "ninguna" a una intensidad "abrumadora". Estas encuestas fueron asignadas cada semana durante el primer mes de regreso a las actividades presenciales a cinco grupos con diferentes niveles de avance académico que cursan la carrera de humanidades y ciencias exactas. La recolección de datos se realizó a través de "Google Forms" donde los participantes eligieron el nivel de intensidad de 16 preguntas asociadas a las cuatro emociones. Al finalizar las cuatro semanas de muestreo, con un total de 288 respuestas, se realizó la curaduría de la base de datos, procesamiento y análisis de resultados a través de la plataforma en línea "Google Colab" que permitió realizar diferentes clasificaciones con base al sexo, nivel de avance académico, materia que fue alumno y profesor quien impartió la materia. Los resultados mostraron que, en todos los grupos de estudiantes, la alegría es la emoción más frecuente de identificar. Sin embargo, los estudiantes que tomaron evaluaciones escritas por primera vez, después del aislamiento social, mostraron una mayor intensidad de emociones negativas, como hostilidad y ansiedad, que aquellos que estaban tomando un curso por segunda o tercera vez. Al evaluar la evolución temporal de la intensidad de las emociones entre semanas, se observó una diferencia estadísticamente significativa en la relación alegría-ansiedad y hostilidad-

tristeza de la primera frente a la segunda semana de actividades presenciales en la mayoría de los grupos. Mientras tanto, la prueba de correlación de emociones mostró que los estudiantes de semestre avanzado distinguen la mezcla de sentimientos positivos y negativos. Estos resultados pueden implementarse como un nicho de oportunidad para la incorporación de técnicas de autoayuda que permitan la identificación y control de emociones que se asocian al bajo rendimiento académico y social.

Palabras clave: educación a distancia, estado emocional, pandemia, SARS-CoV-2.

1. Introducción

A finales del 2019 e inicio del 2020 emergió un virus identificado posteriormente como “SARS-CoV-2”, causante de la enfermedad “COVID-19”, que, al paso de pocos meses, se transmitió rápidamente entre las personas, hasta convertirse en una pandemia. En consecuencia, dió inicio a una cuarentena la cual la población mundial no estaba preparada económica, social y emocionalmente [1].

Al inicio del aislamiento social, a través de diversas fuentes digitales, los especialistas en salud mental dieron consejos de cómo crear, crecer y fomentar una sana convivencia dentro del círculo familiar y relacional [2]. No obstante, con la extensión de la cuarentena dio paso al tedio, fastidio, mal humor e intolerancia entre las personas [3], tornando un tema prioritario el retorno a actividades regulares previas a la pandemia y la atención en la salud mental.

Dentro de las acciones que se realizaron en México, la Secretaría de Educación Pública instó, entre otras acciones, el uso de plataformas digitales para dar continuidad al ciclo escolar permitiendo retomar, de forma parcial, las actividades de enseñanza-aprendizaje [4]. Después de casi dos años y, al conocer a mayor detalle los mecanismos de transferencia del virus, así como las acciones de sanidad acompañado a una activa campaña de vacunación, se retornaron las actividades

escolares en la mayoría de las instituciones educativas públicas del país [5].

Las encuestas o cuestionarios son considerados, en el área de las ciencias sociales, una herramienta en la identificación de información de un grupo de personas que tienen en común algún atributo [6]. Estas escalas permiten a que los participantes atiendan los cuestionamientos por medio de una escala de calificación con base al nivel de aprobación de una declaración [7].

Por otro lado, para que las encuestas puedan ser consideradas como una fuente de información confiable requieren el cumplimiento de las propiedades métricas de contenido, como: i) no contengan omisiones o estén sesgadas (diseño), ii) las respuestas obtenidas alcancen objetivos asequibles (construcción), la confiabilidad de obtener resultados semejantes al replicar la aplicación de la prueba (aplicación) [8], así como la capacidad de medir el contraste entre grupos [9].

De las escalas validadas, la lista de adjetivos en la escala Likert han mostrado ser una herramienta confiable debido a la facilidad de expresar el nivel de intensidad que sienten es ese momento [10], requiere poco tiempo de aplicación [11] y ha demostrado cumplir con las propiedades métricas mencionadas [12].

Referente a las escalas validadas de auto-aplicación que evalúan la intensidad de las

emociones, Sanz en [13] recopiló los adjetivos asociados al estado de ánimo depresivo y alegre de la escala de Lubin en [14], de ansiedad y hostilidad elaborado por Spielberger et al. en [15, 16].

Estas tres escalas conforman la encuesta nombrada como Escala de Valoración del Estado de Ánimo (EVEA) permite identificar los cuatro estados emocionales: felicidad, tristeza, hostilidad y depresión, donde el autor tomó como fuente previa cuatro adjetivos para cada una de las emociones distribuidos azarosamente en 16 cuestionamiento cuya intensidad es cuantificada a través de la escala tipo Likert con 11 niveles de intensidad que describe la ausencia del sentimiento (cero) hasta muy fuerte (diez) en el momento de la aplicación [13]. A pesar de que, de forma individual las emociones fueron validadas, EVEA fue aplicada en estudiantes universitarios [14] y reportó validez factorial en su diseño [10] y construcción [11], así como su capacidad para medir el contraste de las emociones entre grupos [14, 11].

Dado que, la experiencia de la pandemia ha sido un tema nuevo para todos, no es posible conocer de manera certera la vulnerabilidad de la salud emocional del estudiantado al concluir el aislamiento voluntario. Si bien, en la literatura abierta se ha reportado el efecto de la pandemia durante el aislamiento a escala económica familiar [17], social [18] y emocional [19] es escasa la información para la auto-percepción de las emociones de los estudiantes al abandonar el espacio creado por ellos mismos en algún espacio de su casa, trabajo o espacio disponible con acceso a telefonía celular e internet a cambio de las aulas de las instituciones académicas mexicanas.

Haciendo referencia exclusivamente a México, durante la pandemia, López en [20] emplearon la escala de EVEA en 131

universitarios del área de ciencias blandas de la Universidad Nacional Autónoma de México por ocasión única, obtuvieron como resultado 61% con ansiedad, 60% tristeza, 58% de alegría y 43% tristeza. En Colima, México, la Universidad Tecnológica de Manzanillo (Colima), se reportó que el 38.9% de los estudiantes no asimiló la transición de la escuela en línea y el 60% de los estudiantes no contaban con las herramientas digitales para acceder a las clases virtuales [21]. Mientras que, en el interior del Instituto Tecnológico de Colima, evaluaron a dos grupos de estudiantes de sexto semestre de la carrera de Gestión Empresarial en sus hábitos de estudio y niveles de ansiedad así como las calificaciones obtenidas en el semestre previo (agosto-diciembre 2018) y al inicio de la pandemia (enero-julio, 2019) [22].

Tomando en consideración, los efectos ocasionados tras el aislamiento voluntario y las repercusiones económicas, sociales y culturales, este trabajo empleó la escala de EVEA del 1 al 31 de marzo del 2022 a 5 grupos de estudiantes de licenciatura del Tecnológico Nacional de México campus Colima que estaba conformado: i) por estudiantes de carreras de ciencias blandas y duras, ii) primer, segundo y cuarto año escolar, iii) estudiantes que recursaban una asignatura con el mismo docente y iv) dinámica transitiva de sus emociones las primeras cuatros semanas de retorno de actividades académicas presenciales. Concluido dicho periodo, se evaluaron las métricas de contenido, grado de consistencia entre grupos e identificación de patrones, a través de estadística descriptiva para determinar cuantitativamente si existe una diferencia estadísticamente significativa en las emociones con base al sexo, tipo de área de estudio, avance académico, al evaluarlos semanal y mensualmente.

2. Materiales y Equipos

Para automatizar el proceso, el test de EVEA se construyó por medio de la plataforma gratuita de Google Forms donde, el docente compartió el vínculo de acceso y el estudiante al ingresar a la plantilla de manera voluntaria, otorga el consentimiento informado que los resultados son de carácter confidencial y anónimo. En caso que el participante rechazara la invitación, se solicitó que se retirara del aula durante 10 minutos. Mientras quienes aceptaron participar, a través de su teléfono celular ingresaron datos generales (edad, nombre de la asignatura y sexo) y procedieron a contestar el test EVEA eligiendo la intensidad de la emoción por medio de la herramienta de opción múltiple disponible en la plantilla mencionada.

Esta actividad se repitió una vez por semana durante cuatro semanas y, al finalizar el periodo de muestreo, a través de la plataforma online de libre acceso Google-Colab.

Al disponer de la base de datos y de las herramientas para el análisis de información, se evaluó la fiabilidad de las respuestas obtenidas a través de la prueba de alpha-Cronbach y se procedió a la identificación y eliminación de los datos atípicos por medio de un diagrama de caja y bigotes. Con la base de datos depurada, se realizaron los siguientes análisis estadísticos: i) identificar la dinámica temporal de la intensidad de las emociones a través estadística descriptiva para identificar la distribución de los datos que conforma los diagramas de caja (cuatro cuartiles) y valor máximo y mínimo registrados (bigotes), desviación de los datos respecto a la media (desviación estándar). ii) Pruebas de hipótesis donde se evaluó la existencia de diferencias estadísticamente significativas de las emociones identificadas entre semanas para cada grupo de estudiantes. iii) Grado de correlación entre emociones de cada grupo de

estudiantes identificando por el método de la correlación de Spearman.

Previo a la sección de discusión de resultados se muestran las siglas que se emplearon para este trabajo: Métodos Numéricos (MN), Programación y Métodos Numéricos (PMN), Ingeniería de Procesos (IP), Desarrollo Humano (DH) y Dinámica Social (DS).

3. Discusión de resultados

Como banco de trabajo se eligieron estudiantes inscritos del Tecnológico Nacional de México campus Colima quienes cursan carreras conocidas como “ciencias duras” donde la formación del estudiante está basada en la experimentación, análisis y validación; mientras que las “ciencias blandas” o humanísticas se basa en la observación de comportamiento, interacción, emociones entre seres vivos [23]. A continuación, se realizó la selección de los grupos participantes en el test bajo los siguientes criterios: i) todos los grupos clasificados por hombres y mujeres, ii) misma asignatura y docente pero diferente carrera, iii) misma carrera y docente pero diferente asignatura y iv) diferente asignatura y docente.

Con base a los requerimientos de este estudio se eligieron cinco grupos conformado por estudiantes de diferente año escolar: i) ciencias duras de Ing. Bioquímica con las asignaturas de PMN vs IP e Ing. Mecatrónica con la materia de MN con estudiantes de tercer año que recurieron la asignatura de segundo año y ii) ciencias blandas con la Lic. en Administración y Gestión Empresarial en las materias DH vs DS, ambas correspondientes al primer año de la carrera.

3.1 Fiabilidad del banco de trabajo

Como banco de trabajo, se registraron 288 respuestas y, para evaluar la fiabilidad de esta encuesta se realizó la prueba de alpha-

Cronbach que, basada en la cantidad de cuestionamientos, cantidad de posibles respuestas y número de participantes, estima el grado de correlación entre las preguntas y si son representativas de una población. Esta prueba cuantitativa ha sido catalogada con un valor mínimo de 0.5 a 0.6 como malo hasta 0.9 a 1.0 catalogado como excelente [24]. Los resultados mostraron que, con los 16 ítems del test evaluado y basado en la cantidad de participantes, cantidad de cuestionamientos y la variabilidad se obtuvo el coeficiente de 0.913 o su equivalente de “excelente”.

3.2 Dinámica temporal de la intensidad de emociones

Establecido el grado de fiabilidad del test, se realizó la clasificación de los grupos y se observó que, algunos estudiantes no participaron activamente en la encuesta durante las cuatro sesiones, por tanto, con base a la fecha de asignación de la actividad se cotejó con la lista de asistencia de ese día y se descartaron los datos recabados cuando la cantidad de participantes en la encuesta fue menor a los que se presentaron a esa clase obteniendo las siguientes distribuciones temporales: i) dos semanas para los grupos de DH, PMN y MN ii) cuatro semanas en la asignatura de DS e IP. La Tabla 1 reporta la estadística de las emociones reportadas por todos los estudiantes que participaron en el cuestionario.

Tabla 1. Estadísticos de la intensidad de emociones de todos los cinco grupos de estudiantes.

	Mujeres				Hombres			
	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría
Promedio	4.26	5.19	3.70	6.77	3.90	4.99	3.83	6.84
Desviación estándar	3.28	2.63	3.01	2.50	3.9	2.73	3.02	2.22
Mínimo	0	0	0	0	0	0	0	0.75
25%	1	3.12	0.75	5.12	1.25	3.00	1.25	5.25
50%	4.50	5.50	3.50	7.00	3.87	5.25	3.12	7.00
75%	7.50	7.25	6.5	8.87	6.0	6.81	6.06	8.75
Máximo	10	9.5	10	10	10	10	10	10

La Tabla 1 muestra la relación de emociones de los estudiantes de los cinco grupos que participaron durante las cuatro sesiones. En general, se observó, a través de la desviación estándar, que los hombres y mujeres tienen mayor dificultad en identificar la intensidad de la tristeza y, en contraparte, la alegría. Respecto a la distribución de los datos, del 25 al 75% de las personas que contestaron la encuesta, la alegría alcanzó mayor intensidad, mientras que, la hostilidad mostró el valor más bajo de las cuatro emociones. Al contrastar los sexos, se identificó que, a excepción de la alegría en los hombres y ansiedad en las mujeres, el valor más bajo y

alto coincide con los límites de la encuesta y, en promedio, las mujeres reportaron mayor intensidad respecto a los hombres. Estos resultados están asociados a los cambios que ocurren durante la madurez de los individuos, por tanto, se realizó un contraste de estudiantes de segundo semestre de Ciencias Sociales (DS) respecto a ciencias exactas (Bioquímica) en vísperas de ser egresados de la institución académica.

La Tabla 2 muestra la relación de las emociones de estudiantes de primer (DS) y último año (IP) de formación académica. En esta tabla se identificó que para ambos grupos

se registró que los alumnos que ubicaron del 25 al 75% de los datos muestran que la alegría predomina. No obstante, al evaluar los bigotes no se reportó un patrón en común. A excepción de la tristeza en DS se alcanza el valor máximo en ambos grupos, esta tendencia no se encontró en el valor mínimo. Los resultados reportados por cada grupo identificaron algunos contrastes de interés, por ejemplo: En el primer cuartil (25%) se observa menor intensidad en tristeza, ansiedad y hostilidad en estudiantes DS

respecto a IP. Los estudiantes de primer año, la alegría es la emoción con mayor intensidad, en cambio IP reporta un equilibrio en las cuatro emociones y mayor facilidad para identificarlas. Por otro lado, DS reportó menor intensidad con 1.25 respecto a 5.25 del resto. Identificado el fuerte contraste entre los estudiantes, que en promedio tienen 4 años de diferencia, se contrastaron las emociones de dos grupos de estudiantes con el mismo rango de edad y formación humanística.

Tabla 2. Estadísticos de la intensidad de emociones del primer y último año escolar.

	Dinámica Social				Ingeniería de Procesos			
	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría
Promedio	2.75	3.49	2.62	6.61	5.54	6.38	5.37	5.77
Desviación estándar	3.03	2.84	2.90	2.59	2.44	2.04	2.69	2.27
Mínimo	0	0	0	0.75	0	1	.25	0
25%	0.062	1.0	0.25	5.0	4.25	5.25	3.5	4.0
50%	1.62	3.12	1.25	6.62	5.5	6.25	5.25	5.75
75%	4.5	5.43	4.93	9.0	7.5	8.0	7.5	7.5
Máximo	9.75	10	10	10	10	10	10	10

La Tabla 3 reporta el contraste de las emociones en los grupos de ciencias blandas. Se identificó que en ambos grupos la alegría alcanzó el valor promedio superior respecto a las otras y, valores cercanos entre sí, en la capacidad de identificar y diferenciarlos. Referente al valor mínimo, la alegría tiene un valor diferente a cero y alcanza el máximo de 10; este patrón se repitió en la distribución de los datos del 25 al 75%. Por otro lado, se observó que DS posee la misma habilidad para distinguir sus emociones, pero no se

identificó un patrón en el resto de las pruebas estadísticas. Los estudiantes localizados entre el 25 al 75% en la distribución de los datos, se observa que DH reportó mayor ansiedad respecto a DS. Para complementar el contraste de grupos de ciencias blandas, se evaluaron estudiantes de ciencias duras con el mismo rango de edad y, que además cursaron estudiantes de Ing. Bioquímica e Ing. Mecatrónica la misma asignatura, en el mismo periodo.

Tabla 3. Estadísticas de la intensidad de emociones en dos grupos de Ciencias Sociales.

	Dinámica Social				Desarrollo Humano			
	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría
Promedio	2.41	3.24	2.07	7.16	2.59	4.42	2.22	8.13
Desviación estándar	2.77	2.52	2.48	2.39	2.76	2.33	2.35	1.77
Mínimo	0	0	0	0.75	0	0	0	3.5
25%	0.18	1.18	0.18	5.62	0.25	2.5	0.0	3.5
50%	1.62	3.12	0.87	7.25	2.0	4.25	1.5	8.75
75%	3.25	5.06	3.62	9.18	3.75	6.25	3.0	9.5
Máximo	9.75	8.0	7.5	10.0	10	9.5	7.5	10

La Tabla 4 reporta la relación de las emociones de estudiantes que cursaron la misma asignatura, bajo el nombre de Métodos Numéricos y Programación y Métodos Numéricos con el mismo docente. Es de interés mencionar que, el grupo de Mecatrónica se encontraban recursando la asignatura. En general, ambos grupos indicaron que la alegría es el sentimiento que identifican con mayor facilidad, así también es el que tiene un valor superior a cero como mínimo y diez como máximo y en una posición más alta en el primer cuartil respecto a las otras emociones. No obstante, la media

de los datos difiere significativamente en magnitud entre los grupos. Mientras que, al contrastar los grupos se observó que el grupo de Bioquímica reportó menor tristeza y hostilidad, pero la amplitud de datos del 25 al 75% es superior en la hostilidad respecto a Mecatrónica. Además, se observó que la distribución de los datos de la alegría alcanzó magnitudes superiores en todos los estadísticos. Referente a los estudiantes que están recursando tienen menor dificultad para identificar sus emociones y los valores de tristeza y hostilidad tienen baja intensidad entre el primer y tercer cuartil.

Tabla 4. Estadísticos de la intensidad en dos grupos de Ciencias Duras que cursaron y recursaron la misma asignatura.

	Ing. en Mecatrónica				Ing. en Bioquímica			
	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría	Tristeza	Ansiedad	Hostilidad	Alegría
Promedio	2.42	3.81	2.00	7.89	5.20	5.78	4.69	7.03
Desviación estándar	2.19	2.94	2.08	1.45	3.30	2.65	3.00	2.16
Mínimo	0	0	0	4.25	0	0	0	0.75
25%	0.75	1.68	0.43	6.68	2.56	3.87	1.93	6.00
50%	2.00	4.12	1.25	8.12	5.62	6.25	5.00	7.37
75%	3.37	5.75	3.06	9.06	7.68	7.5	6.68	8.75
Máximo	8.0	9.0	8.0	10	10	9.5	9.5	10

3.3 Prueba de hipótesis entre grupos

Establecida la dinámica temporal de la intensidad de las emociones del estudiantado y las correlaciones entre otros grupos, se procedió a la identificación de la prueba de hipótesis de Mann-Whitney que reporta si existe una diferencia significativa entre dos grupos de datos de diferente tamaño de muestra [25]. Como criterios de evaluación se extrajeron los resultados de la intensidad de las emociones de cada semana registrada donde se observó, en general que, a excepción de los estudiantes de la carrera de Bioquímica, la alegría es la emoción que reportó una diferencia significativa respecto a las otras emociones en las cuatro semanas registradas, y, por medio del cálculo de la mediana se observa que la intensidad de la alegría se redujo semana con semana. Aunado a esto en las primeras dos semanas DH, DS y MN reportaron en su mediana un decremento en todas las emociones y, a través de la prueba Mann-Whitney se detectaron diferencias significativas entre sus emociones. Posteriormente, al solicitar información referente a las dos primeras semanas de actividades con los grupos PMN y MN se comentó que ambos grupos de estudiantes iniciaron el retorno hacia actividades presenciales con evaluaciones escritas e ingreso a laboratorios. Al realizar la prueba estadística por grupo se observó que: i) DH una marcada diferencia entre las emociones de tristeza con ansiedad y ansiedad y hostilidad las primeras dos semanas de evaluación. ii) DS durante las cuatro semanas de registro se identificaron diferencias estadísticamente significativas de alegría-tristeza y alegría-hostilidad. iii) MN observó el patrón de alegría-ansiedad y hostilidad-tristeza.

3.4 Grado de correlación lineal entre grupos

Se contrastó la relación entre emociones que expresaron los estudiantes de cada carrera durante el tiempo de muestreo a través del análisis de correlación de Spearman que muestra el grado de asociación lineal entre dos variables cuya magnitud es catalogada por Smarandache en [26] como una correlación nula (0), muy débil (0 a 0.19), débil (0.2 a 0.39), moderada (0.4 a 0.59), fuerte (0.6 a 0.79), muy fuerte (0.8 a 0.99) y perfecta (1.0). Para este caso de estudio las duplas identificadas fueron: alegría-tristeza, alegría-hostilidad, alegría-ansiedad, tristeza-hostilidad, tristeza-ansiedad, hostilidad-ansiedad. Así como la dirección creciente o decreciente de ambas variables a través del signo positivo y negativo. La Figura 1 y 2 reportan las relaciones positivas y negativas entre las emociones identificadas para los cinco grupos de estudiantes que participaron en este estudio.

La Figura 1 muestra, a través de un diagrama de calor, la correlación sinérgica de las emociones de Ansiedad-Tristeza, Hostilidad-Tristeza y Ansiedad-Hostilidad para los cinco grupos muestreados. En general, se observa un bloque de sentimiento Moderado respecto a los 6 y 9 bloques de intensidad Fuerte y Muy Fuerte. En específico, los estudiantes del grupo de DS y PMN reportaron la misma intensidad, a pesar de pertenecer a diferentes áreas de conocimiento y grado académico. Mientras que, los estudiantes que cursan la asignatura de MN e IP por segunda ocasión con el mismo docente se observa que el nivel de Ansiedad-Tristeza y Ansiedad-Hostilidad es fuerte.

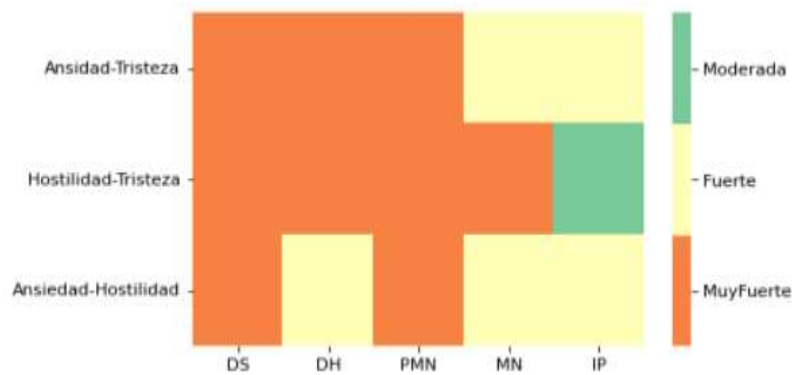


Figura 1. Correlación de Spearman de correlaciones positivas de los cinco grupos.

La Figura 2 muestra las correlaciones negativas de la Alegría respecto a la Tristeza, Ansiedad y Hostilidad. En semejanza a la Figura 1, se identifica que la mayoría de los bloques corresponden a la intensidad Débil y Moderada y solo un bloque de intensidad Muy Débil y Fuerte. Referente a los grupos

evaluados, los estudiantes de DH mostraron bajos niveles de las emociones antagónicas, seguido por quienes cursan DDS y MN. En contraparte, se observa una correlación negativa moderada en los estudiantes de PMN e IP.

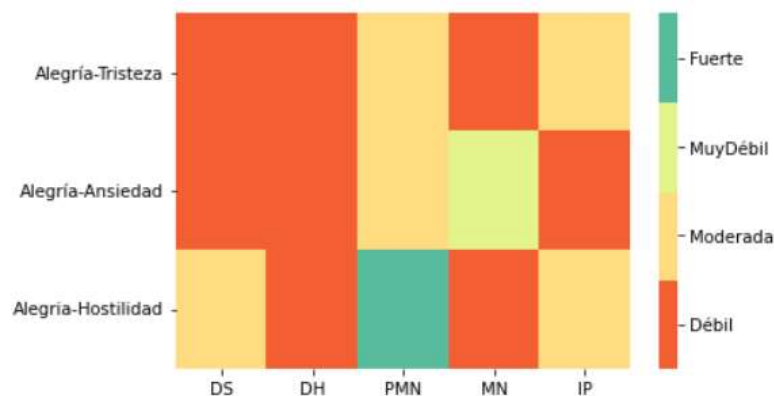


Figura 2. Correlación de Spearman de correlaciones negativas de los cinco grupos.

4. Conclusiones

Este trabajo reporta el uso del cuestionario EVEA para la identificación de intensidad de cuatro emociones en estudiantes universitarios al retorno a clases presenciales. La selección de los estudiantes se realizó con base a características que comparten los grupos evaluados y a través de la prueba de alpha-Cronbach se identificó la fiabilidad de la prueba mencionada.

En general, al evaluar la relación entre hombres y mujeres se observó que en ambos

sexos tienen mayor facilidad para distinguir la alegría y, en contraparte, la ansiedad. En cambio, la hostilidad se posicionó como el valor de la mediana en ambos grupos y la alegría con mayor puntaje cuando se evaluó el promedio de los datos recabados. Individualmente, en cuatro de los cinco grupos la alegría es la emoción con mayor puntaje promedio, mientras que, los estudiantes que cursan el último semestre de la carrera mostraron a la ansiedad como el sentimiento con mayor puntaje.

Referente a la emoción que distinguen con mayor facilidad, los estudiantes de Ingeniería Bioquímica mostraron reportaron mayor puntaje al seleccionar los sinónimos asociados a la ansiedad, mientras que el resto de los grupos fue la alegría. En contraparte, la emoción más difícil de identificar fue la tristeza en los grupos de tercer semestre, en cambio, IP reportó la hostilidad esto debido a que una tercera parte del grupo se encontraba recursando la asignatura. Finalmente, se identificó la mediana de los datos donde en todos los estudiantes coincidieron que la ansiedad, tornando un tema de interés la enseñanza de técnicas para reducir este estado de ánimo.

Como trabajo a futuro se plantea, la evaluación del test de EVEA en estudiantes con bajo y alto nivel académico para estimar la relación entre las emociones con el aprovechamiento escolar; así como la orientación educativa personalizada para aquellos estudiantes en riesgo.

5. Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento a los estudiantes y personal de los departamentos académicos del Instituto Tecnológico de Colima y Universidad de Colima por las facilidades otorgadas para el desarrollo de este trabajo.

6. Referencias bibliográficas

[1] Van Bavel, J. J., Baicker, K., Boggio, P. S., Capraro, V., Cichocka, A., Cikara, M., ... y Willer, R. (2020). Using social and behavioural science to support COVID-19 pandemic response. *Nature human behaviour*, 4(5), 460-471. <https://www.nature.com/articles/s41562-020-0884-z>

[2] Ceberio, M. R. (2021). Contexto y vulnerabilidad en la crisis del COVID-19: emociones y situaciones del durante e

interrogantes acerca del después. *Ajayu Órgano de Difusión Científica del Departamento de Psicología UCBSA*, 19(1), 90-126.

https://app.lpz.ucb.edu.bo/Publicaciones/Ajayu/v19n1/v19n1_a04.html

[3] Huarcaya-Victoria, J. (2020). Consideraciones sobre la salud mental en la pandemia de COVID-19. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 37(2).

<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2020.372.5419>

[4] Ramírez, M. L., y Rodríguez, S. A. (2020). Trayectorias escolares en la educación superior ante la pandemia ¿continuar, interrumpir o desistir?. http://132.248.192.241:8080/jspui/bitstream/IISUE_UNAM/544/1/LopezM_RodriguezS_2020_Trayectorias_escolares.pdf

[5] Orellana-Centeno, J. E., y Guerrero-Sotelo, R. N. (2021). El proceso de vacunación en México. *Revista de la Asociación Dental Mexicana*, 78(5), 270-274.

<http://www.scielo.org.ar/pdf/medba/v82n3/1669-9106-medba-82-03-461.pdf>

[6] Quispe Limaylla, A. (2013). El uso de la encuesta en las ciencias sociales. *Ediciones Díaz de Santos*. <https://bit.ly/3LzrcEc>

[7] Matas, A. (2018). Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión. *Revista electrónica de investigación educativa*, 20(1), 38-47. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1607-40412018000100038&script=sci_arttext_plus&tlng=es

[8] Ramírez, J. L. M. (2019). El proceso de elaboración y validación de un instrumento de medición documental. *Acción y reflexión*

educativa, (44), 50-63.
https://revistas.up.ac.pa/index.php/accion_reflexion_educativa/article/view/673

[9] Rotundo, G. Z., y Giner, M. T. C. (2008). Propuesta metodológica para la construcción de escalas de medición a partir de una aplicación empírica. *Actualidades investigativas en Educación*, 8(2).
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/aie/article/view/9342>

[10] Ávila, A. y Giménez, A., (1991a). Los adjetivos en tareas de evaluación psicológica: Propiedades y valor estimular. *Revista de Psicología General y Aplicada*, 44, 465-475.
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/aie/article/view/9342>

[11] Ávila, A. Y Giménez, A., (1991b). Adjectives in psychological assessment tasks: Instruments and applications in the psychology of emotion and personality. *Psychological Assessment*, 7, 307-331.
<https://bit.ly/3Tuyj2L>

[12] Pueyo, A. (1993). Evaluación del estado de ánimo y de la activación: estado de la cuestión. *Aportaciones recientes a la evaluación psicológica*, Barcelona: PPU, 283-306.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5004926>

[13] Sanz, J. (2001). Un instrumento para evaluar la eficacia de los procedimientos de inducción de estado de ánimo: “La Escala de Valoración del Estado de Ánimo” (EVEA). *Análisis y modificación de conducta*, 27, 71-110.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5004926>

[14] Lubin, B. (1965). Adjective checklists for measurement of depression. *Archives of general psychiatry*, 12(1), 57-62.

<https://jamanetwork.com/journals/jamapsychiatry/article-abstract/488695>

[15] Spielberger, C., Gorsuch, L., y Lushene, E. (1970). *Manual for the State-Trait Anxiety Inventory*. Palo Alto, CA: Consulting Psychologist Press.

[16] Spielberger, D, Jacobs, R., y Crane, S. (1983). Assessment of anger: The State-Trait Anger Scale. *Advances in personality assessment*, Hillsdale NJ, 159-187.

[14] Pacheco-Unguetti, A. P., Acosta, A., Marqués, E., y Lupiáñez, J. (2011). Alterations of the attentional networks in patients with anxiety disorders. *Journal of Anxiety Disorders*, 25, 888-895.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0887618511000909>

[15] Del Pino-Sedeño, T., Peñate, W., y Bethencourt, J. M. (2010). La escala de valoración del estado de ánimo (EVEA): análisis de la estructura factorial y de la capacidad para detectar cambios en el estado de ánimo. *Análisis y modificación de conducta*, 36(153-154), 19-32.
<http://www.uhu.es/publicaciones/ojs/index.php/amc/article/view/1058>

[16] Sanz, J., Gutiérrez, S., y García-Vera, M. P. (2014). Propiedades psicométricas de la Escala de Valoración del Estado de Ánimo (EVEA): Una revisión. *Ansiedad y estrés*, 20(1).
<http://uhu.es/publicaciones/ojs/index.php/amc/article/view/1058>

[17] Elias, G, y Paredes, A. (2021). Las finanzas personales bajo el impacto de la Covid-19 en México. *Enfoque disciplinario*, 6(1), 32-41.
<http://www.enfoquedisciplinario.org>

[18] Flores, M., Cabezuelo, F., y Chalá P. (2022). Las prácticas profesionales de la comunicación y las relaciones públicas de las

ONG internacionales ante la crisis del COVID-19: el caso de México. *Observatorio (OBS*)*, 16(2). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8479867>

[19] Lugo-González, I. V., Pérez-Bautista, Y. Y., Becerra-Gálvez, A. L., Fernández-Vega, M., y Reynoso-Erazo, L. (2021). Percepción emocional del COVID-19 en México: estudio comparación entre la fase 1, fase 2 y medios de información. *Interacciones*, 7, e164. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2413-44652021000100001&script=sci_arttext

[20] López, J., Rodea G., Vargas, V. Sánchez, A y Martínez, M. Nivel del estado de ánimo en estudiantes universitarios durante el confinamiento por la COVID-19. *Revista Electrónica de Psicología de la FES Zaragoza-UNAM*, 12(24), 47-54. [https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/2022/Publicaciones/revistas/Rev_Elec_Psico/Vol12_No_24/REP12\(24\)-art5.pdf](https://www.zaragoza.unam.mx/wp-content/2022/Publicaciones/revistas/Rev_Elec_Psico/Vol12_No_24/REP12(24)-art5.pdf)

[21] Vázquez, M., Delgadillo, J., Pérez, H. Y Cancino R. (2021). Gestión estratégica aplicada en los centros educativos de modalidad presencial ante la pandemia del COVID-19 para la impartición de clases en línea en México: un caso de estudio. *Estudios de Administración*, 28(1), 182-200. <https://revistas.uchile.cl/index.php/EDA/article/view/58234>

[22] Arévalo, V., Preciado, B., Corona, E., Jacobo F., Olvera, A. Y Cárdenas E. (2022). COVID-19 y los estragos en la educación superior. *Revista de Difusión Científica, Ingeniería y Tecnologías*, 16(3), 37-42. <https://bit.ly/3FAaYa6>

[20] Sanz-Fernández, J. (2001). Un instrumento para evaluar la eficacia de los procedimientos de inducción de estado de ánimo: la Escala de Valoración del Estado de Ánimo (EVEA). *Análisis y Modificación de*

Conducta, 27, 72-110. https://eprints.ucm.es/id/eprint/37320/1/Un%20instrumento%20para%20evaluar%20la%20eficacia%20de%20los%20procedimientos%20de%20inducción%20de%20estado%20de%20ánimo_la%20EVEA.pdf

[21] Provencio-Ortega, M. (2012). Patrones de escaneo visual ante expresiones faciales negativas en personas con creencias persecutorias. (Tesis de Licenciatura, Universidad Complutense de Madrid). <https://eprints.ucm.es/id/eprint/17108/>

[22] Romero, N. (2012). *Memoria auto-referente y autobiográfica en la depresión mayor: factores de vulnerabilidad implicados* (Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/cittes?codigo=160056>

[23] Cronbach, L. J. (1947). Test "reliability": Its meaning and determination. *Psychometrika*, 12(1), 1-16. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02289289>

[24] Borjas-Gil, M. I., y Vilchez-Paz, C. F. (2009). Ciencias" duras" vs. Ciencias" blandas". *REDHECS*, 7(4), 195-209. <http://ojs.urbe.edu/index.php/redhecs/article/view/88>

[25] Timarán-Delgado, C. A., Moreno-Portilla, M. I., y Luna-Tascón, E. G. (2011). Construcción y validación de un cuestionario para identificación de factores asociados al desempeño escolar (FADE). *Acta Colombiana de Psicología*, 14(2), 57-67. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-91552011000200006

[26] Smarandache, F. (2008). Alternatives To Pearson's and Spearman's Correlation Coefficients. *Infinite Study, SSRN Electronic Journal*, DOI: 10.2139/ssrn.2725499



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Análisis de Series Temporales Aplicado al Modelado de Aportaciones del Embalse Angostura

Time Series Analysis Applied to the Modeling of Inflows of Angostura Reservoir

Marín-Cruz, I., Martínez-Martínez, J.L.*, Mota-Palomino, R.O.A., Badaoui, M.

Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Zacatenco. Ciudad de México.
<https://orcid.org/0000-0002-0443-9788>, <https://orcid.org/0000-0002-0660-1654>*, <https://orcid.org/0000-0003-1034-2357>, <https://orcid.org/0000-0002-1249-7742>.
imarinc1200@alumno.ipn.mx; jmartinezm1820@alumno.ipn.mx*; rmotap@ipn.mx; mbadaoui@ipn.mx

Innovación tecnológica: Modelado estocástico de las aportaciones del Embalse Angostura.

Área de aplicación: Análisis de sistemas eléctricos de potencia.

Recibido: 30 marzo 2022

Aceptado: 05 abril 2023

Abstract

The main purpose of this work is to model the inflow per basin of the Angostura reservoir, using the time series approach and the SARIMA and PAR(p) models. The performance of each model is evaluated considering a one-month ahead forecast and the estimation of the mean and standard deviation, obtained from the generation of synthetic scenarios. According to the error metrics considered, the SARIMA model has greater functionality for one-month ahead forecasting, while the PAR(p) model is more suitable for modeling the monthly mean and standard deviation. The use of these type of models allows the National Electric System operator to manage more economically the energy stored in Angostura, since the decisions involved are more robust to the set of scenarios that may arise.

Keywords: Time series analysis, Angostura reservoir, synthetic streamflow series generation.

Resumen

En el presente trabajo se tiene el objetivo de modelar las aportaciones por cuenca propia del embalse Angostura, para tal finalidad se recurre al enfoque de series temporales y se emplean los modelos SARIMA y PAR(p). Se evalúa el desempeño de cada modelo considerando el pronóstico de un mes en adelante y la estimación de la media y la desviación estándar, obtenidas a partir de la generación de escenarios sintéticos. De acuerdo con las métricas de error consideradas, el modelo SARIMA posee mayor funcionalidad para el pronóstico de un mes en adelante, mientras que el modelo PAR(p) resulta más adecuado para modelar la media y la desviación estándar mensuales. La utilización de este tipo de modelos le permite al operador del Sistema Eléctrico Nacional, gestionar de manera más económica la energía almacenada en Angostura, toda vez que las decisiones involucradas son robustas ante el conjunto de escenarios probables de presentarse.

Palabras clave: Análisis de series temporales, embalse Angostura, generación de series sintéticas de aportaciones.

I. INTRODUCCIÓN

La administración multianual del recurso hidráulico almacenado en los grandes embalses del Sistema Interconectado Nacional (SIN), representa una de las tareas principales del operador del Sistema, debido a que, a través de la definición de planes de extracción, se deben conciliar objetivos que pueden llegar a contraponerse. Por un lado, se desea disponer de la suficiente energía almacenada para contribuir a suministrar la demanda futura, y por otro, se desea contar con almacenamiento disponible en los grandes embalses, para contener las avenidas probables de presentarse durante las temporadas de lluvias, y de esta forma evitar en medida de lo posible el derrame de excedentes.

Actualmente, el Sistema Eléctrico Mexicano se encuentra en un proceso de transición, cuyo objetivo es que las decisiones relacionadas con los procesos de planeación de la expansión y de planeación de la operación del Sistema Eléctrico Nacional, se tomen en función de modelos probabilísticos, y no, en función de modelos deterministas. Debido a lo anterior, resulta prioritario recurrir a modelos matemáticos que permitan capturar la naturaleza aleatoria involucrada

en la gestión del recurso hidráulico almacenado en los embalses, y de esta forma tomar decisiones más robustas ante el conjunto de escenarios probables de presentarse, en lugar de tomar decisiones considerando un único escenario debido a que finalmente, será otro el que se termine materializando.

De forma general, la planeación operativa de mediano plazo de sistemas hidrotérmicos tiene como objetivo determinar una política de operación a través de la cual, para cada etapa del periodo de estudio, se define el despacho de centrales termoeléctricas y el volumen de agua a turbinar en cada central hidroeléctrica, de tal forma que se minimice el costo esperado de operación, considerando un horizonte de estudio de 1 a 36 meses.

Dentro de las características principales involucradas en la operación de embalses en el mediano plazo, se tiene su naturaleza estocástica, ya que involucra variables que por la longitud del horizonte de estudio no se pueden pronosticar con exactitud (aportaciones por cuenta propia, demanda, precios de combustibles, entre otras [1]). Asimismo, es un problema acoplado en el tiempo debido a que, a través de la

disponibilidad de energía en forma de agua almacenada es posible realizar su transferencia de un periodo de tiempo a otro, desde horas hasta años en el futuro, de acuerdo con las características físicas de los embalses. Además, en virtud de que el valor económico de la generación hidroeléctrica no se puede cuantificar únicamente en términos de los bloques de generación, sino en función del ahorro de combustible por concepto de generación termoeléctrica desplazada, la función objetivo es no separable [2]. Por otro lado, es un problema de optimización de gran escala como resultado del crecimiento exponencial del número de escenarios en función del número de etapas [3], adicionalmente, es un problema no lineal debido a la función de costos y a la función de generación hidroeléctrica [4].

En vista de que el problema en cuestión es estocástico, la optimización del despacho hidrotérmico para un único escenario hidrológico (enfoque determinista) es una estrategia arriesgada: i) Sí se considera un escenario húmedo, la optimización despachará más generación hidro, pero sí en la realidad la hidrología es seca, los embalses estarán en una situación de bajo almacenamiento; ii) Sí se considera un escenario seco, la optimización despachará poca generación hidro y tendrá un costo elevado debido al despacho térmico. En caso de que la hidrología sea húmeda, el sistema estará en una situación de sobre almacenamiento, lo que podría ocasionar derrames.

La principal debilidad del enfoque determinista reside en el modelado de variables aleatorias, ya que evita lidiar con su naturaleza incierta y se asumen conocidos los valores que dichas variables tomarán en cada periodo de tiempo. Sí bien cuando el horizonte de estudio corresponde al corto plazo, esta hipótesis podría resultar adecuada, sin embargo, conforme la longitud del

horizonte de estudio aumenta, esta hipótesis se vuelve idealizada, al no ser realista considerar, por ejemplo, que para los próximos 36 meses se es capaz de conocer con exactitud las aportaciones que van a presentarse durante cada etapa en cada embalse del SIN. Por lo tanto, es necesario recurrir a modelos matemáticos que permitan capturar la naturaleza aleatoria de las aportaciones y de esta forma, contribuir a la toma de decisiones relacionadas con la administración óptima del recurso hidráulico almacenado en los grandes embalses.

Los datos hidrológicos usualmente se encuentran disponibles como series temporales, para las cuales los intervalos entre observaciones adyacentes son menores a un año (sucesiones diarias, semanales, mensuales, etc.) [5]. En este sentido, se deduce que la serie histórica representa una de las posibles realizaciones de un proceso estocástico. Se podría asumir que la naturaleza sorteó dicha serie bajo algún conjunto de leyes probabilísticas, un nuevo sorteo produciría una nueva serie, distinta de la histórica, sin embargo, igualmente probable. Cada sorteo está asociado a una nueva serie, a través de dichas series es posible obtener una muestra de resultados a partir de simulaciones con lo que a su vez se puede caracterizar la distribución de probabilidad de las variables de interés en lugar de obtener un único resultado como cuando sólo la serie histórica está disponible.

Es posible tener la certeza de que los volúmenes de aportaciones registrados en el pasado no se repetirán con la misma magnitud y con la misma secuencia, sin embargo, una manera más adecuada de utilizar la información histórica es emplearla en el proceso de selección de un modelo matemático con la finalidad de caracterizar: i) La dependencia temporal de una secuencia de aportaciones a un embalse con el ciclo anual y con su histórico reciente; ii) La naturaleza

de la interdependencia entre las aportaciones a diferentes embalses; iii) La naturaleza de la distribución del vector de ruidos en cada intervalo de tiempo [6]. Posteriormente es

posible simular la operación del Sistema ante un conjunto de escenarios sintéticos. Lo descrito anteriormente, se ilustra en la Figura 1.

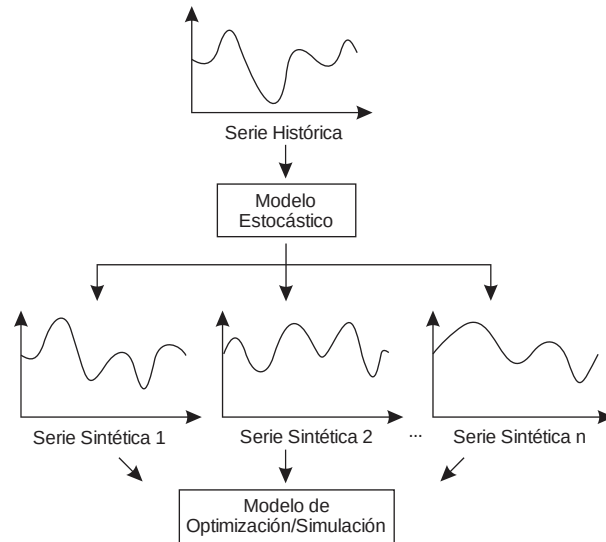


Figura 1. Representación esquemática de la generación de escenarios sintéticos, adaptada de [6].

Una vez que se cuenta con un modelo matemático que es capaz de representar adecuadamente las características estadísticas contenidas en el registro histórico, es posible realizar diversos análisis en el ámbito de la simulación y optimización de sistemas eléctricos que impliquen considerar la incertidumbre asociada a la operación y manejo de recursos de generación de electricidad basados en centrales hidroeléctricas con capacidad de regulación. Como ejemplos de aplicación de estos modelos destaca la optimización del despacho hidrotérmico, el análisis de adecuación de recursos de generación y la optimización de planes de expansión de generación.

Aunque un gran número de modelos estadísticos disponibles en la literatura, la estocasticidad de los volúmenes de aportaciones es comúnmente reproducida por modelos autorregresivos, los cuales resultan atractivos para la optimización del despacho hidrotérmico debido a: i) la relación lineal

entre el volumen de aportaciones en una etapa y las etapas anteriores; y ii) la preservación de la varianza y autocorrelación de las aportaciones anuales [7]. Por lo tanto, en este trabajo se consideran dos modelos de series de tiempo para capturar los cambios estacionales en la autocorrelación de la serie de tiempo de volúmenes de aportaciones: en el primer enfoque, la serie se diferencia estacionalmente para ajustar un modelo lineal que contiene parámetros estacionales y no estacionales de la serie diferenciada para establecer un modelo Estacional de Media Móvil Integrada Autorregresiva (SARIMA); mientras que en el segundo enfoque, se ajusta un modelo autorregresivo para cada mes para formar un modelo Periódico Autorregresivo de orden p (PAR(p)).

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar los enfoques referidos con anterioridad, con la finalidad de identificar cuál es el mejor para realizar pronóstico de un mes en adelante, y para realizar el modelado tanto de la media como de la desviación

estándar. Las métricas de error consideradas son: MAE, MAPE y RMSE. El contenido del artículo se compone de lo siguiente: En la sección II se describen las características generales asociadas con los modelos PAR(p) y SARIMA, en la Sección III se presenta el caso de estudio junto con la discusión de los resultados principales, mientras que en la Sección IV se describen las conclusiones más relevantes.

II. MODELOS ESTACIONALES DE SERIES DE TIEMPO

En general, se puede decir que una serie de tiempo es un conjunto de n observaciones x_t , cada una de las cuales se registra en un momento específico t [8]. Bajo esta definición es natural suponer que cada observación x_t es un valor realizado de una determinada variable aleatoria X_t , por lo

tanto, un modelo de series de tiempo para los datos observados $\{x_t\}$ es una especificación de las distribuciones conjuntas de una secuencia de variables aleatorias $\{X_t\}$ [9].

Es importante mencionar que una de las principales hipótesis sobre el uso de modelos autorregresivos y/o de medias móviles es asumir que el proceso estocástico en cuestión es estacionario [10]. Sin embargo, esta propiedad no siempre se cumple y es común aplicar alguna transformación como la de Box-Cox para corregir anomalías como la heterocedasticidad y la no normalidad de los datos para después remover la estacionalidad mediante alguno de los modelos abordados en este trabajo [5]. La familia paramétrica de transformaciones para una serie X_t está dada por [11]:

$$f_\lambda(X_t) = \begin{cases} \lambda^{-1}(X_t^\lambda - 1) & U_t \geq 0, \lambda > 0 \\ \ln X_t & U_t > 0, \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde el parámetro λ , posiblemente un vector, define una transformación particular. En la práctica, si es necesaria una transformación de Box-Cox, suele darse el caso de que $\lambda = 0$ o $\lambda = 0.5$ es adecuado [9].

A. Modelo SARIMA

Los modelos SARIMA son útiles para modelar series de tiempo estacionales en las

que la media y otras estadísticas de una temporada determinada no son estacionarias a lo largo de los años [5]. En general, si d y D son enteros no negativos, entonces Y_t es un proceso SARIMA(p, d, q) $\times$ (P, D, Q) $_s$ con periodo s si la serie diferenciada $W_t = \nabla^d \nabla_s^D Y_t$ es un proceso ARMA definido por [8], [9]:

$$\phi(B)\Phi(B^s)(W_t - \mu_w) = \theta(B)\Theta(B^s)\varepsilon_t \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde:

B operador de retraso, $B^j(Y_t) = Y_{t-j}$
 ∇^d operador de diferencia de retraso d , $\nabla^d(Y_t) = (1 - B)^d Y_t$
 ∇_s^D operador de diferencia de retraso s , $\nabla_s^D(Y_t) = (1 - B^s)^D Y_t$
 d y D órdenes de las diferenciaciones aplicadas a Y_t

para eliminar su tendencia y estacionalidad
 respectivamente

ε_t ruido blanco con media cero y varianza σ^2 , $\varepsilon_t \sim WN(0, \sigma^2)$

μ_w valor esperado de W_t

ϕ, Φ funciones polinomiales de orden p y P respectivamente

θ, Θ funciones polinomiales de orden q y Q respectivamente

Normalmente, cuando se busca determinar algún modelo SARIMA que se ajuste a un conjunto de datos, no se dispone de una formulación precisa del problema, por lo tanto, el orden del modelo ajustado puede ser determinado mediante criterios de información tales como el de Akaike (AIC) o Bayes (BIC), los cuales consisten en funciones de penalización para la selección del modelo y por lo tanto permiten establecer un criterio para seleccionar aquel que tenga una menor penalización; no obstante, los métodos de inspección gráfica también pueden ser especialmente útiles [8]. En este sentido, la selección provisional de un

modelo y sus respectivos órdenes se puede llevar a cabo mediante la inspección de la función de autocorrelación (FAC) muestral $\hat{\rho}(h)$ y la función de autocorrelación parcial (FACP) muestral $\hat{\alpha}(h)$ de la serie diferenciada W_t considerada en la Ecuación 2, las cuales pueden ser estimadas para cada retraso h , tal que $-n < h < n$, a partir de las siguientes expresiones [9]:

$$\hat{\rho}(h) = \frac{\hat{\gamma}(h)}{\hat{\gamma}(0)} \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\hat{\alpha}(h) = \hat{\phi}_{hh} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde $\hat{\gamma}(h)$ es la función de autocovarianza muestral dada por:

$$\hat{\gamma}(h) = n^{-1} \sum_{t=1}^{n-|h|} (y_{t+|h|} - \hat{y})(y_t - \hat{y}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo $\hat{y}$ la media muestral $\hat{y} = n^{-1} \sum_{t=1}^n y_t$, mientras que $\hat{\phi}_{hh}$ es el último componente de:

$$\hat{\phi}_h = \hat{\Gamma}_h^{-1} \hat{\gamma}_h \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde

$$\hat{\Gamma}_h = [\hat{\gamma}(i-j)]_{i,j=1}^h \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\hat{\gamma}_h = [\hat{\gamma}(1), \hat{\gamma}(2), \dots, \hat{\gamma}(h)]^T \quad (\text{Ec. 8})$$

La FAC y FACP proporcionan una medida útil del grado de dependencia entre los valores de una serie de tiempo en diferentes momentos, por ejemplo, si $\hat{\rho}(h)$ es significativamente distinta de cero para $0 \leq h \leq q$ y despreciable para $h > q$, entonces un polinomio θ de orden q (posiblemente con algunos coeficientes iguales a cero) podría ser un buen candidato para el componente MA regular del modelo; de manera análoga se

puede proceder con $\hat{\alpha}(h)$ para identificar el orden p del polinomio ϕ correspondiente al componente AR regular del modelo [8].

En el caso de Φ y Θ , los órdenes P_1 y Q_1 pueden identificarse mediante la inspección de valores de $\hat{\rho}(h)$ y $\hat{\alpha}(h)$ para valores de h que son múltiplos enteros de s ($s = 12$ para datos mensuales). En la práctica se suelen utilizar valores de $\pm 1.96/\sqrt{n}$ como límites entre los cuales $\hat{\rho}(h)$ y $\hat{\alpha}(h)$ se consideran "despreciables", ya que 1.96 es el cuantil de 0.975 de la distribución normal estándar [9]. Una vez definido el orden del modelo candidato a ser ajustado, los parámetros son determinados utilizando el método de momentos, mínimos cuadrados o máxima verosimilitud.

B. Modelo PAR

Dentro de los modelos estadísticos utilizados para representar la estocasticidad de las aportaciones [12], se encuentran los modelos

autorregresivos periódicos de orden p_m , comúnmente referidos como modelos $PAR(p_m)$, los cuales pueden ser entendidos como la aplicación de un modelo autorregresivo para cada periodo m . Dichos modelos resultan atractivos por las siguientes razones [13]: i) Relación lineal entre la aportación de una etapa t , con las aportaciones de etapas anteriores $(t-1, t-2, \dots, t-p_m)$, ii) Reproducción adecuada de autocorrelaciones en volúmenes anuales, iii) Generación de escenarios sintéticos preservando: estacionalidad, dependencia temporal, y dependencia espacial entre embalses localizados en una misma cuenca y entre aquellos pertenecientes a distintas cuencas.

Además, es importante resaltar que el modelo $PAR(p_m)$ ha sido utilizado en Brasil desde 1979, para realizar la generación de escenarios sintéticos durante la ejecución de sus modelos probabilísticos de despacho hidrotérmico [14], lo cual representa una motivación adicional para explorar la implementación de esta metodología.

Cuando se considera una serie de tiempo Y_t que tiene una estacionalidad o periodo s (al igual que el modelo SARIMA) sobre un horizonte de u años, se puede establecer que $Z_{r,m}$ representa una observación de la serie temporal en el r -ésimo año y m -ésimo periodo mensual, donde $r = 1, 2, \dots, u$, y $m = 1, 2, \dots, s$. Por lo tanto, el modelo PAR de

orden $(p_1, p_2, \dots, p_s)$ es definido para el periodo m como [15]:

$$\phi^{(m)}(B)(Z_{r,m} - \mu_m) = \varepsilon_{r,m} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde:

B operador de retraso,
 $B^k(Z_{r,m}) = Z_{r,m-k}$
 $\phi^{(m)}$ función polinomial de orden p_m
 μ_m valor esperado de $Z_{r,m}$ para el periodo m
 $\varepsilon_{r,m}$ ruido blanco con media cero y varianza σ_m^2 , $\varepsilon_{r,m} \sim WN(0, \sigma_m^2)$

En principio, el modelo PAR podría extenderse al caso de la media móvil autorregresiva periódica (PARMA). Sin embargo, cuando hay parámetros de media móvil presentes en el modelo, las no linealidades resultantes causan dificultades para obtener estimaciones de máxima verosimilitud de los parámetros [15].

Al igual que en el modelo SARIMA, una manera útil de seleccionar el orden del modelo PAR es emplear la forma periódica de la FACP para identificar el número de parámetros que podrían ser necesarios para caracterizar cada periodo del modelo PAR , ya que dicha función puede ser determinada para cada periodo. Para el caso de la serie $Z_{r,m}$, la función de autocovarianza periódica muestral para $m = 1, 2, \dots, s$ y para cada retraso h está definida por:

$$\hat{\gamma}_h^{(m)} = n^{-1} \sum_{r=1}^u (Z_{r,m} - \hat{\mu}_m)(Z_{r,m-h} - \hat{\mu}_{m-h}) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde $\hat{\mu}_m$ es la media muestral de la serie $Z_{r,m}$ para el periodo m , $\hat{\mu}_m = u^{-1} \sum_{r=1}^u Z_{r,m}$. Cuando el retraso h es cero, se obtiene la estimación de la varianza de las observaciones para el periodo m , que está dada por:

$$\hat{\gamma}_0^{(m)} = n^{-1} \sum_{r=1}^u (Z_{r,m} - \hat{\mu}_m)^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Ya que se asume que el modelo autorregresivo para el periodo m es de orden p_m , la FACP muestral para dicho periodo es $\hat{\phi}_{p_m}^{(m)}$ y puede ser estimada mediante las ecuaciones periódicas de Yule-Walker, cuya forma matricial está dada por [5]:

$$\hat{\phi}^{(m)} = [\hat{\Gamma}_{p_m}^{(m)}]^{-1} \hat{\gamma}^{(m)} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde

$$\hat{\gamma}^{(m)} = [\hat{\gamma}_1^{(m)}, \hat{\gamma}_2^{(m)}, \dots, \hat{\gamma}_m^{(m)}]^T \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\hat{\Gamma}_{p_m}^{(m)} = \begin{bmatrix} \hat{\gamma}_0^{(m-1)} & \hat{\gamma}_1^{(m-2)} & \dots & \hat{\gamma}_{p_m-1}^{(m-p_m)} \\ \hat{\gamma}_1^{(m-1)} & \hat{\gamma}_0^{(m-2)} & \dots & \hat{\gamma}_{p_m-2}^{(m-p_m)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{\gamma}_{p_m-1}^{(m-1)} & \hat{\gamma}_{p_m-2}^{(m-2)} & \dots & \hat{\gamma}_0^{(m-p_m)} \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 14})$$

Por definición, la FACP periódica teórica del periodo m se corta después del retraso p_m a un valor de cero. En consecuencia, si la FACP periódica muestral no es significativamente distinta de cero después del retraso p_m , esto indicaría que el orden del modelo ajustado a la serie en el periodo m debería ser p_m . Si ninguno de los valores de la FACP periódica muestral en el periodo m es significativamente diferente de cero, el modelo dentro del modelo PAR general debe ser un ruido blanco. En este caso, p_m se establece igual a cero. Para este fin se considera que el intervalo de confianza del 95% es $\pm 1.96/\sqrt{u}$ y puede ser trazado para cada periodo hasta un retraso máximo de aproximadamente $u/4$ [5].

Por lo tanto, una vez identificado el orden p_m del modelo correspondiente al periodo m , los coeficientes autorregresivos $\hat{\phi}_{p_m}^{(m)}$ se pueden obtener de igual manera por medio de la solución de las ecuaciones de Yule-Walker.

Adicionalmente, se tiene que es posible modelar los errores $\varepsilon_{r,m}$ a partir de una distribución Normal multivariada $N(0, \hat{\Sigma}_m)$, donde $\hat{\Sigma}_m$ es la matriz de covarianzas [12]. No obstante, dado que la matriz de covarianzas de los errores contenidos en los modelos univariados representa la correlación cruzada entre distintas series de tiempo (p. ej. aportaciones a distintos embalses ubicados en una cuenca), resulta necesario realizar el modelado de errores asociados con dichas series históricas.

C. Generación de escenarios sintéticos

La metodología para la generación de escenarios a partir de los modelos ajustado para un conjunto de observaciones consiste básicamente en el muestreo de los términos de error a partir de su función de distribución. El procedimiento para generar K escenarios sintéticos de aportaciones de T etapas a partir del modelo SARIMA se describe a continuación:

Establecer $\lambda, d, D, \hat{\mu}_W, \hat{\sigma}^2$ y los parámetros de las funciones $\hat{\phi}, \hat{\Phi}, \hat{\theta}, \hat{\Theta}$

Para $k = 1, 2, \dots, K$

Para $t = 1, 2, \dots, T$

Generar aleatoriamente $\varepsilon_{k,t} \sim WN(0, \hat{\sigma}^2)$

Evaluar la expresión descrita por la Ecuación 2 para obtener $W_{k,t}$

Revertir las diferenciaciones para obtener $Y_{k,t}$

Revertir la transformación de Box-Cox para obtener $X_{k,t}$

Fin Para

Fin Para

Para el caso de la generación de K escenarios sintéticos de aportaciones de $R \times 12$ etapas a

partir del modelo $PAR(p_m)$ el procedimiento es el siguiente:

Establecer $\lambda, \hat{\mu}_m, \hat{\sigma}_m^2$ y los parámetros de las funciones $\hat{\phi}^{(m)}$

Para $k = 1, 2, \dots, K$

Para $r = 1, 2, \dots, R$

Para $m = 1, 2, \dots, 12$

Generar aleatoriamente $\varepsilon_{k,r,m} \sim WN(0, \hat{\sigma}_m^2)$

Evaluar la expresión descrita por la Ecuación 9 para obtener $Z_{k,r,m}$

Revertir la transformación de Box-Cox para obtener $X_{k,r,m}$

Fin Para

Fin Para

Fin Para

D. Métricas de error

Debido a que generalmente las medidas de error utilizadas para evaluar cuantitativamente el desempeño de modelos de pronóstico corresponden al Error Medio Absoluto (MAE), al Error Porcentual Medio Absoluto (MAPE) y a la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE) [16], estas son las medidas de error que se consideran para realizar la comparación de ambos modelos.

Sí bien el MAE determina el promedio de las desviaciones presentadas entre los pronósticos y los valores observados, en ocasiones no es fácil definir a partir de esta métrica sí el error es pequeño o no, porque dicho error posee las mismas unidades que la variable en cuestión, por lo tanto, se recurre a normalizar el error con respecto al valor observado con el objetivo de expresar los resultados en términos porcentuales, lo anterior corresponde al MAPE.

Adicionalmente, los errores referidos anteriormente tienen la característica de estar basados en el error medio, por lo que podrían subestimar los impactos de aquellos errores significativamente grandes que se presenten

con poca frecuencia, por lo que para considerarlos se determina el RMSE, en el cual, al elevar al cuadrado los errores se tiene una métrica que le da mayor ponderación a las grandes diferencias. El cálculo de los errores descritos con anterioridad se presenta en las siguientes Ecuaciones:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \quad (\text{Ec. 15})$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - y_i|}{x_i} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (\text{Ec. 17})$$

Donde:

x_i Valor observado
 y_i Valor pronosticado

III. CASO DE ESTUDIO

El embalse Angostura se localiza en el estado de Chiapas y pertenece al complejo

hidroeléctrico del río Grijalva, el cual es el más importante de México en cuanto a capacidad hidroeléctrica ya que en este se encuentran instalados 4,800 de los 12,125 MW instalados a nivel nacional [17]. La Figura 2 muestra las cuencas hidrológicas pertenecientes a dicho complejo, donde se aprecia que la cuenca de mayor superficie corresponde a la de Angostura, la cual inicia en Guatemala y posee un área de drenaje de 134,400 km² [18].



Figura 2. Cuencas hidrológicas asociadas con las centrales hidroeléctricas del río Grijalva [18].

Con el objetivo de representar esquemáticamente la configuración en cascada asociada con las cuatro centrales eléctricas situadas en el río Grijalva, en la Figura 3 se muestran cada uno de los embalses que forman parte de dicho complejo hidroeléctrico, mientras que en la Tabla 1 se presentan sus principales características.

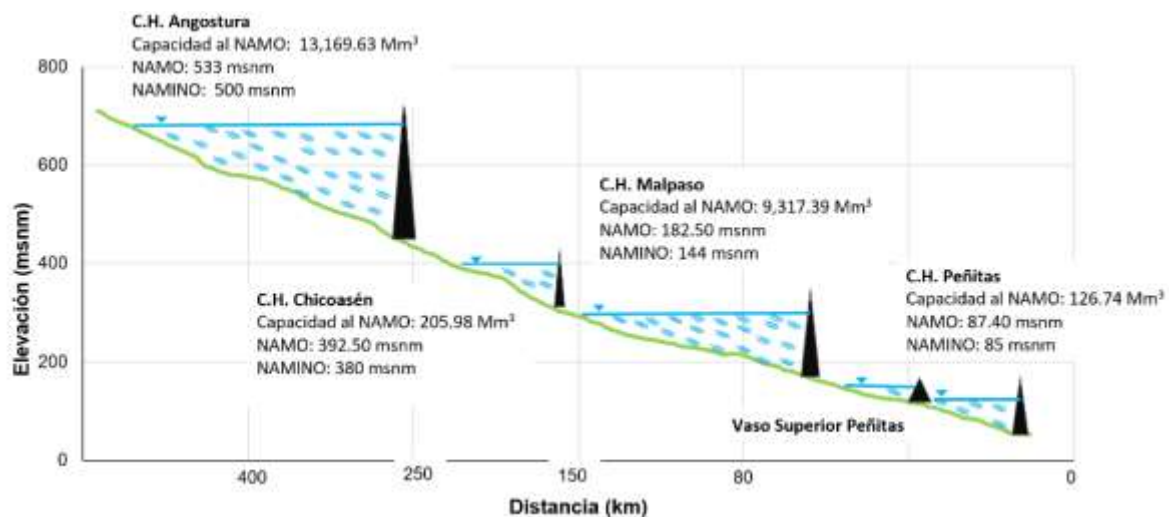


Figura 3. Representación esquemática del Complejo Hidroeléctrico del río Grijalva [18].

Tabla 1. Centrales hidroeléctricas localizadas en la cuenca del río Grijalva [19].

Embalse	Central Hidroeléctrica	Capacidad Instalada [Unidades x MW]	Volumen al NAMO [Mm³]
Angostura	Belisario Domínguez	5x180	13,169.63
Chicoasén	Manuel Moreno Torres	8x300	205.98
Netzahualcóyotl	Malpaso	6x180	9,317.39
Peñitas	Ángel Albino Corzo	4x105	126.74

Como puede observarse en la Figura 3, existe una dependencia operativa de las respectivas centrales situadas aguas arriba de cada central, lo cual resalta la importancia de Angostura, ya que, al ser el primer embalse, el recurso hidráulico almacenado en él posee mayor valor energético debido a que el mismo volumen de agua que se turbinas en la central, se turbinas 3 veces más antes de llegar al Golfo de México.

Así mismo, en la Tabla 1 es posible observar que, si bien Angostura no cuenta con la mayor capacidad instalada, posee la mayor capacidad de almacenamiento del complejo hidroeléctrico (13,169.63 Mm³ al Nivel de Aguas Máximas Ordinarias o NAMO), lo cual permite desplazar plurianualmente el agua que almacena. Por lo tanto, la correcta operación del embalse Angostura es de suma relevancia para el Sistema Interconectado Nacional, tanto en términos de protección contra inundaciones, como en términos energéticos y económicos.

A. Conjunto de datos

El conjunto de datos empleado en este estudio corresponde a la serie de tiempo del volumen mensual en Mm³ de aportaciones por cuenca propia al embalse Angostura registrados de 1952 a 2019 (816 observaciones), la cual se muestra en la Figura 4. Tal como se puede apreciar, existe un fuerte comportamiento estacional y una alta variabilidad que pueden ser observados con mayor detalle en el diagrama de cajas y bigotes para el conjunto de observaciones presentado en la Figura 5. En este caso se puede notar que la estacionalidad se encuentra presente independientemente del año en cuestión y que las aportaciones tienden a ser mayores durante el segundo semestre de cada año, lo cual se debe a que la temporada de lluvias se presenta de junio a noviembre. Este comportamiento estacional se observa en otros embalses del SIN, tales como los ubicados en la cuenca del río Santiago [20].

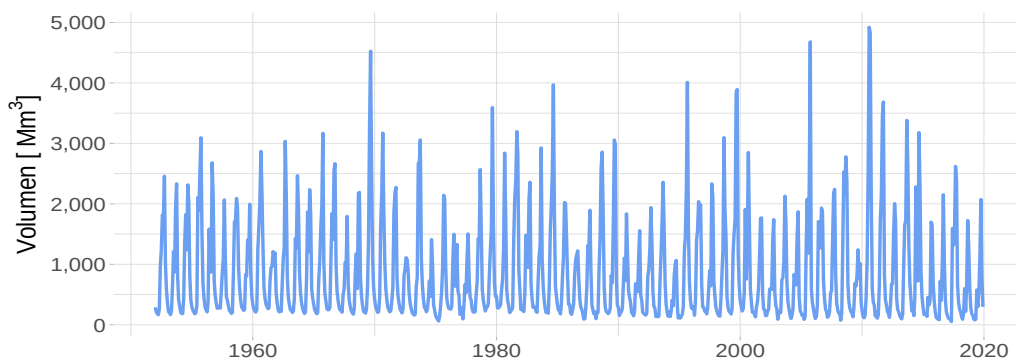


Figura 4. Serie de tiempo X_t del volumen mensual de aportaciones por cuenca propia al embalse Angostura.

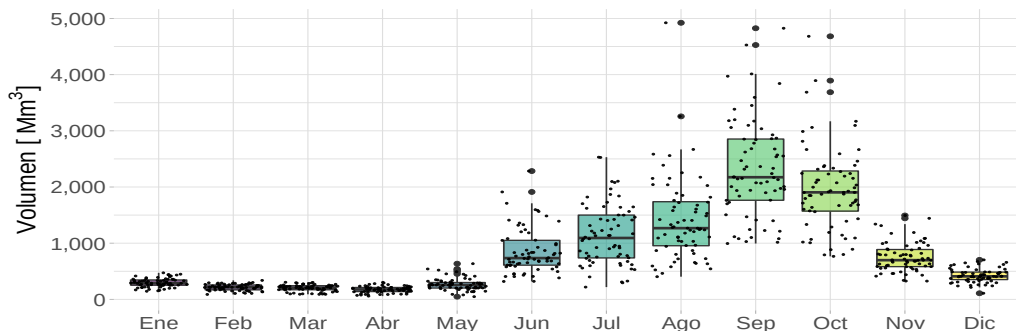


Figura 5. Diagrama de cajas y bigotes del conjunto de datos de volúmenes mensuales de aportaciones por cuenca propia al embalse Angostura.

B. Ajuste de los modelos

Debido a que la serie histórica tiene una longitud de 68 años, se utilizan logaritmos naturales de la serie temporal correspondientes a los primeros 66 años para ajustar los modelos, de modo que el resto de los datos (24 observaciones) es empleado para evaluar los pronósticos realizados.

En el caso del modelo $PAR(p_m)$, los órdenes del modelo se identificaron mediante la inspección de la FACP periódica ajustando un modelo para cada mes, donde p_m fue el ultimo retraso para el cual dicha función fue significativamente distinta de cero. Como ejemplo, en la Figura 6 se muestra la FACP periódica de la serie $Z_{r,m}$ correspondiente a enero.

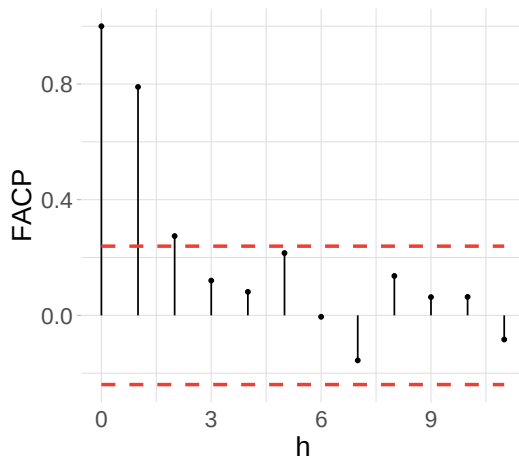


Figura 6. FACP periódica muestral de la serie $Z_{r,m}$ correspondiente al mes de enero.

En la Figura 6 se aprecian valores de autocorrelación parcial periódica significativos hasta el retraso 2 y valores no significativos para retrasos mayores, lo que

sugiere que las aportaciones correspondientes a enero dependen únicamente de los volúmenes presentados en diciembre y en noviembre. Cabe mencionar que los coeficientes la FACP periódica se obtienen a través de la resolución sucesiva de las ecuaciones de Yule-Walker, así mismo los parámetros de los modelos fueron estimados sin considerar que los parámetros intermedios estuvieran restringidos a cero. En el Apéndice se encuentran los coeficientes correspondientes a cada modelo $PAR(p_m)$.

Dado que la matriz de covarianzas de los errores contenidos en los modelos univariados representa la correlación cruzada entre aportaciones a los embalses ubicados en la cuenca del río Grijalva, resulta necesario realizar el modelado de errores asociados con las series históricas del resto de los embalses que también forman parte de la cuenca (Chicoasén, Netzahualcóyotl, Peñitas). Al igual que lo coeficientes de cada modelo $PAR(p_m)$, en el Apéndice se presentan las matrices de covarianzas mensuales correspondientes.

En el caso del modelo SARIMA se aplicó sólo una diferencia de orden 12 a los logaritmos naturales de los datos con el fin de eliminar su estacionalidad ($D = 1$ y $s = 12$), ya que en la Figura 4 se puede apreciar que no existe una tendencia evidente, por lo que no hay una justificación para definir un valor de d distinto de 0. Posteriormente se procedió a inspeccionar la FAC y la FACP muestrales para identificar el orden del modelo, las cuales son mostradas en la Figura 7.

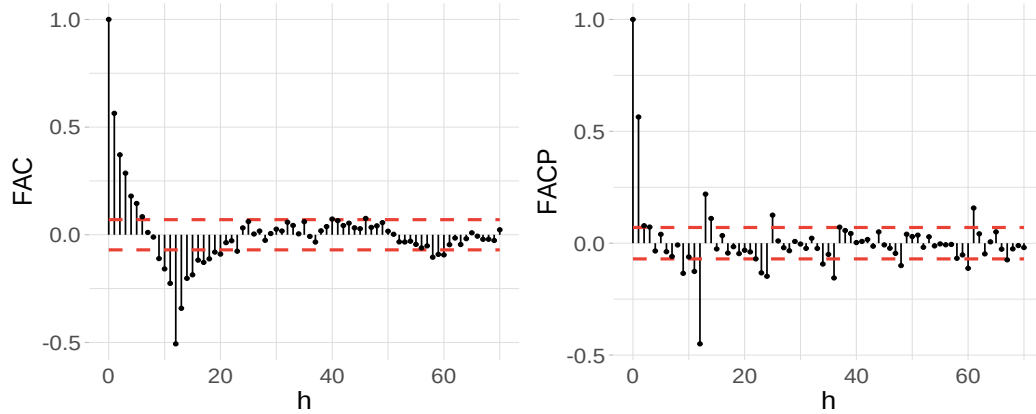


Figura 7. FAC y FACP muestral de la serie $W_t - \hat{\mu}_W$.

Una vez identificados los posibles órdenes del modelo, los parámetros fueron estimados empleando el método de máxima verosimilitud en el software R y se determinó que el más adecuado fue el modelo SARIMA(1,0,1) $\times$ (0,1,1)₁₂, en el que los coeficientes de los polinomios son $\hat{\phi}_1 = 0.7121$, $\hat{\theta}_1 = -0.2358$, $\hat{\theta}_{12} = -0.9153$ y la varianza estimada de ε_t es $\hat{\sigma}^2 = 0.0975$.

Con el objetivo de realizar la comparación de los modelos de series de tiempo SARIMA y PAR(p_m), se consideran los siguientes criterios de evaluación: i) el pronóstico de un mes en adelante para los últimos dos años de la serie histórica y ii) el modelado de la media y de la desviación estándar mensuales, a partir de la generación de 200 series sintéticas con la misma duración que la serie original.

C. Pronóstico de un mes en adelante

En el caso del modelo SARIMA, el pronóstico de una etapa en adelante se obtiene reemplazando t en la Ecuación 2 por $T+1$. Ya que en este caso se asume que se tienen observaciones hasta el momento $T=792$, se realiza el pronóstico de una etapa en adelante considerando que en cada etapa se cuenta con la información de la realización del proceso $X_t, t = 793, \dots, 816$ para realizar

el siguiente pronóstico. Considerando el caso de los modelos PAR(p_m), en cada periodo se realiza el pronóstico de la aportación $\hat{X}_t$ asociada al mes m , utilizando las p_m aportaciones registradas anteriormente en la serie histórica.

Los resultados de los pronósticos realizados a través de cada modelo se presentan gráficamente en la Figura 9, junto con las aportaciones registradas en la serie histórica. Tal como se aprecia en la Figura 9 el comportamiento estacional logra ser capturado adecuadamente por ambos modelos, lo que permite diferenciar con facilidad la temporada de estiaje (diciembre - mayo), de la temporada de lluvias (junio - noviembre), sin embargo, el valor puntual de los pronósticos difiere de las aportaciones observadas, principalmente durante la temporada de lluvias. Es importante observar que los pronósticos para los meses de julio difieren considerablemente de los valores observados, lo cual se debe a que históricamente la correlación entre las observaciones de junio y julio es positiva, por lo que los modelos, al ser al menos de orden 1, no consideran un comportamiento opuesto al observado en la etapa anterior.

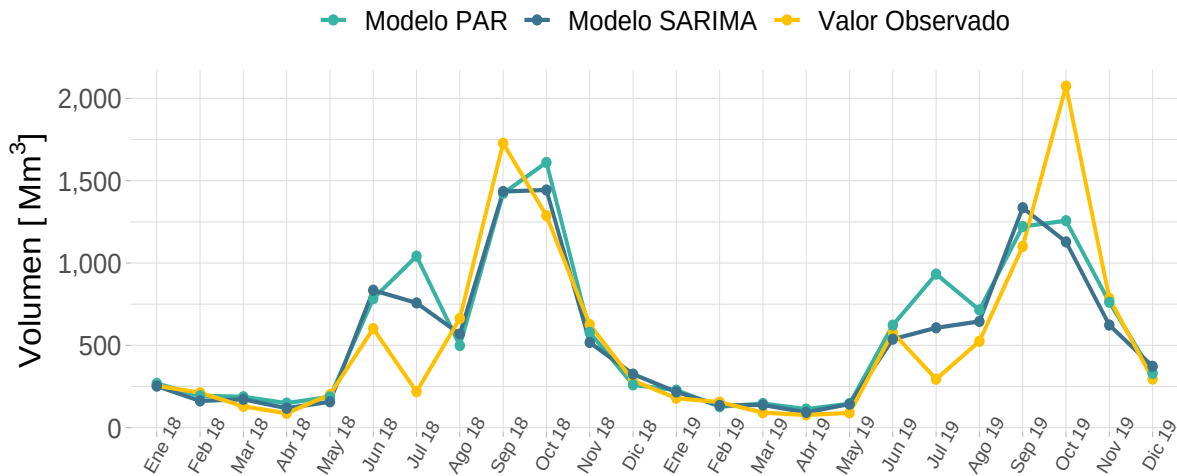


Figura 9. Pronóstico de un mes en adelante.

Tabla 2. Errores asociados con los pronósticos.

Modelo	Medida de error		
	MAE [Mm ³]	MAPE [%]	RMSE [Mm ³]
PAR(p_m)	172.14	48.72	294.96
SARIMA	154.22	37.08	257.31

Sí bien gráficamente los pronósticos son similares, cuantitativamente se tiene que los obtenidos a través del modelo SARIMA son mejores, debido a que se estimaron errores menores. Cabe destacar que, si bien las unidades del MAE y del RMSE están dadas en Mm³, los errores obtenidos son competitivos considerando aquellos valores reportados en la literatura [16].

D. Generación de series sintéticas

Continuando con el proceso de validación de los modelos de series de tiempo, se procede a realizar la generación de 200 series sintéticas con la misma duración de la serie histórica, para lo cual se emplean las observaciones registradas a lo largo de los 68 años de historia con la finalidad de caracterizar los modelos. Posteriormente se determina el valor esperado mensual, junto con la

desviación estándar, a partir de la observación 121 con el objetivo de eliminar los efectos de las condiciones iniciales [12]. Cabe mencionar que durante la generación de series sintéticas únicamente se recurre a las aportaciones históricas para inicializar los modelos y después se utilizan las aportaciones generadas a medida que se tienen disponibles.

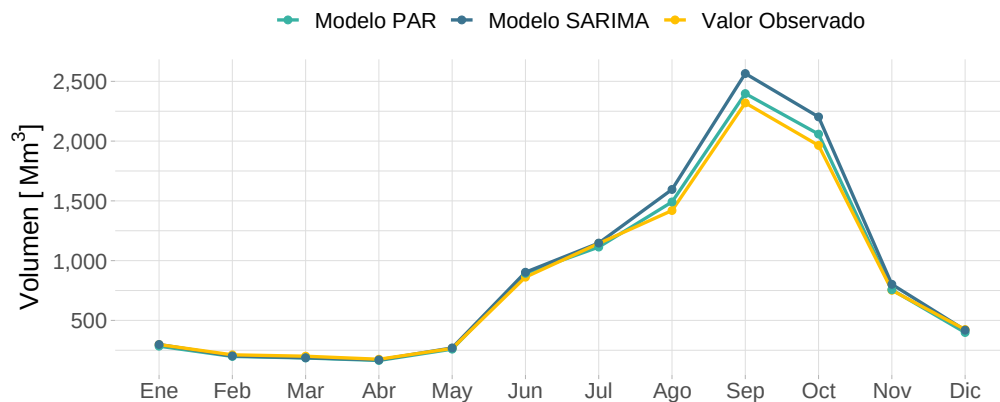
Adicionalmente, durante el proceso de generación de series, las aportaciones se acotan inferior y superiormente con el objetivo de no tomar en cuenta valores significativamente inferiores o superiores a las aportaciones mínimas y máximas registradas en la historia, por lo tanto, mientras la aportación generada se encuentre fuera del intervalo dado por el 110% de la aportación máxima y el 90% de la aportación mínima, es necesario generar nuevamente una variable aleatoria ε_t para obtener la aportación correspondiente. En la Tabla 3 se muestran las aportaciones mínimas y máximas de las que se tiene registro, junto con los límites empleados para acotar las aportaciones generadas sintéticamente.

Tabla 3. Límite inferior y superior de las aportaciones generadas.

Mes	Aportación [Mm ³]			
	Mínima registrada	Máxima registrada	Límite inferior	Límite superior
Enero	144.30	472.40	129.87	519.64
Febrero	87.90	338.00	79.11	371.80
Marzo	90.00	304.20	81.00	334.62
Abril	58.00	303.30	52.20	333.63
Mayo	48.06	634.90	43.25	698.39
Junio	319.00	2,283.80	287.10	2,512.18
Julio	218.47	2,531.02	196.62	2,784.12
Agosto	403.54	4,922.94	363.19	5,415.23
Septiembre	994.00	4,825.83	894.60	5,308.41
Octubre	765.87	4,682.56	689.28	5,150.82
Noviembre	325.30	1,493.00	292.77	1,642.30
Diciembre	108.80	703.11	97.92	773.42

Con la finalidad de identificar qué tan adecuadamente el conjunto de series sintéticas reproduce la media y la desviación estándar mensual, dichas medidas estadísticas se presentan en la Figura 10 y en la Figura 11, respectivamente, donde es posible apreciar que los valores medios obtenidos con las 200 series sintéticas son muy similares a los

observados, sin embargo, de las desviaciones estándar se percibe que la dispersión contenida en las series generadas es mayor, en particular durante la temporada de lluvias. Lo anterior era de esperarse, debido a que a medida que los volúmenes son mayores la incertidumbre involucrada aumenta.

**Figura 10.** Valores medios mensuales del registro histórico y de las series sintéticas generadas.

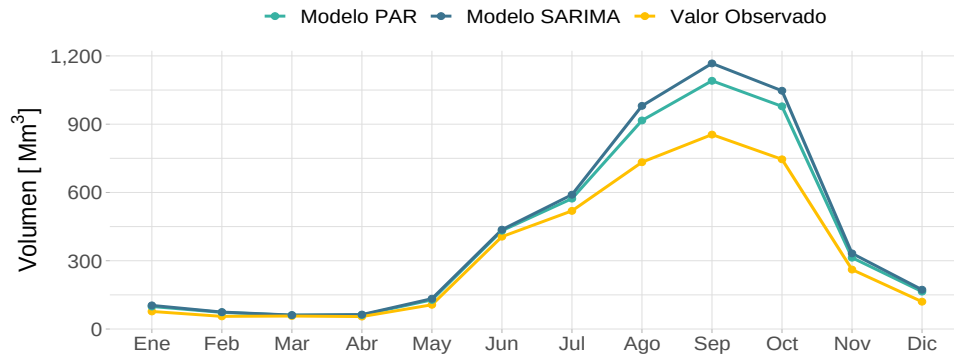


Figura 11. Desviaciones estándar mensuales del registro histórico y de las series sintéticas generadas.

Tal como se realizó en el caso del pronóstico de un mes en adelante, para identificar cuantitativamente qué tan adecuadas fueron las estimaciones, se determinan los errores correspondientes tanto para la media, como para la desviación estándar. Los resultados se muestran en la Tabla 4, en la cual es posible

apreciar que si bien el desempeño de ambos modelos es similar, los errores obtenidos por el modelo $PAR(p_m)$ son ligeramente inferiores a los asociados con el modelo SARIMA.

Tabla 4. Errores asociados con las series sintéticas generadas.

Variable	Modelo	Medida de error		
		MAE [Mm³]	MAPE [%]	RMSE [Mm³]
Media	$PAR(p_m)$	32.81	4.36	44.19
	SARIMA	34.68	6.32	48.21
Varianza	$PAR(p_m)$	71.45	19.87	109.56
	SARIMA	84.36	24.12	117.16

IV. CONCLUSIONES

En general, los modelos $PAR(p_m)$ y SARIMA lograron tener un desempeño apropiado con respecto a la estimación del pronóstico de un mes en adelante, ya que ambos logran capturar adecuadamente el comportamiento estacional de las aportaciones. Sin embargo, se tiene que el modelo SARIMA resultó ser cuantitativamente mejor que los modelos $PAR(p_m)$ debido a que presentó menores valores en las métricas de error consideradas, no obstante, resulta necesario aclarar que los pronósticos puntuales fueron distintos a los volúmenes observados, particularmente durante la temporada de lluvias. Por lo tanto, en este caso se destaca que los modelos empleados podrían pronosticar adecuadamente eventos de sequías, pero no necesariamente podrían anticipar eventos de

aportaciones extraordinarias. Esto puede deberse a la influencia significativa de la estacionalidad que tiende a preservarse a lo largo del tiempo, es decir, el impacto que tiene la observación de un evento de gran o menor magnitud puede mantenerse para años subsecuentes hasta que su efecto tienda a desaparecer como consecuencia de la ocurrencia de eventos posteriores. En este sentido, resulta de interés comparar el desempeño de estos modelos de pronóstico con aquellos que incorporan variables exógenas o que permiten la autorregresión considerando múltiples variables, tales como los modelos de vectores autorregresivos (VAR).

Con respecto a la generación de series sintéticas, se destaca que ambos modelos fueron capaces de aproximar adecuadamente

los valores medios mensuales de la serie observada, y en particular se tiene que los modelos $PAR(p_m)$ mostraron ser más adecuados en virtud de que lograron preservar con mayor precisión características de la desviación estándar mensual asociadas con la serie histórica. En este caso se concluye que su aplicación resulta conveniente para estudios que impliquen la consideración de la incertidumbre asociada con la administración del recurso hidráulico del embalse Angostura.

APÉNDICE

En esta sección se especifican los parámetros correspondientes a los modelos $PAR(p_m)$, los cuales son los siguientes: i) Valores medios mensuales de las aportaciones transformadas, ii) Coeficientes autorregresivos mensuales, y iii) Matrices de covarianzas mensuales.

En la Tabla 5 se muestran los coeficientes asociados con los valores medios de las aportaciones transformadas ($\hat{\mu}_m$).

Tabla 5. Media de log-observaciones.

Mes	Media	Mes	Media	Mes	Media	Mes	Media
Enero	5.6598	Abril	5.1044	Julio	6.9183	Octubre	7.5122
Febrero	5.3179	Mayo	5.4960	Agosto	7.1390	Noviembre	6.5652
Marzo	5.2491	Junio	6.6613	Septiembre	7.6786	Diciembre	6.0033

En la Tabla 6 se muestran los coeficientes autorregresivos de cada modelo.

Tabla 6. Coeficientes de modelos $PAR(p_m)$.

Mes	Orden del modelo									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Enero	0.5786	0.2743								
Febrero	0.2997	0.4992	-0.0429	0.0132	-0.1108	0.2427				
Marzo	0.3440	0.4063								
Abril	0.3453	0.3078	0.4791	-0.3799						
Mayo	0.4536	0.1559	0.0144	-0.3485	0.0687	0.1592	-0.0156	-0.1996	0.2276	0.2675
Junio	0.4498	-0.0484	-0.0567	-0.1041	-0.0633	-0.1861	0.2543			
Julio	0.4547	0.0365	-0.0049	0.1442	0.1471	0.2709	-0.4558			
Agosto	0.6461	-0.0993	0.0364	0.0435	-0.0242	0.1173	-0.2916			
Septiembre	0.6676									
Octubre	0.4435	-0.0234	0.1928	0.0972	-0.2662					
Noviembre	0.4429	0.1454	0.0868	0.0613	-0.0762	-0.2270	-0.0025	0.0761	0.2566	
Diciembre	0.7227	-0.0710	0.1055	-0.1951	0.3657					

A continuación, se muestran en la Tabla 7, y en la Tabla 8 los coeficientes asociados con las matrices de covarianzas empleadas para modelar los errores correspondientes, donde

ANG, MMT, MPS y PEA, hacen referencia a cada uno de los embalses ubicados en el río Grijalva.

Tabla 7. Matrices de covarianzas mensuales ($\hat{\Sigma}_m$) para los meses de enero a junio.

Mes	Embalse	ANG	MMT	MPS	PEN
Enero	ANG	0.1068	0.0471	0.0508	0.0240
	MMT	0.0471	0.2923	0.0946	0.0524
	MPS	0.0508	0.0946	0.3908	0.1262
	PEN	0.0240	0.0524	0.1262	0.2077
Febrero	ANG	0.1148	0.0578	0.0499	0.0194
	MMT	0.0578	0.2927	0.0712	0.0368
	MPS	0.0499	0.0712	0.2779	0.1660

Marzo	PEN	0.0194	0.0368	0.1660	0.3438
	ANG	0.1060	0.0369	0.0456	0.0053
	MMT	0.0369	0.2353	0.0612	0.0506
	MPS	0.0456	0.0612	0.3989	0.0762
Abril	PEN	0.0053	0.0506	0.0762	0.3680
	ANG	0.1255	-0.0217	0.0747	0.0295
	MMT	-0.0217	0.4086	-0.0094	0.0414
	MPS	0.0747	-0.0094	0.5104	0.0788
Mayo	PEN	0.0295	0.0414	0.0788	0.3296
	ANG	0.1950	0.0916	0.1777	0.0718
	MMT	0.0916	0.3885	0.2531	0.1004
	MPS	0.1777	0.2531	0.7608	0.1944
Junio	PEN	0.0718	0.1004	0.1944	0.8104
	ANG	0.2215	0.1873	0.2260	0.1794
	MMT	0.1873	0.3482	0.2560	0.1509
	MPS	0.2260	0.2560	0.7372	0.2509
	PEN	0.1794	0.1509	0.2509	0.6704

Tabla 8. Matrices de covarianzas mensuales ($\hat{\Sigma}_m$) para los meses de julio a diciembre.

Mes	Embalse	ANG	MMT	MPS	PEN
Julio	ANG	0.3054	0.2642	0.2539	0.1983
	MMT	0.2642	0.3349	0.2422	0.2228
	MPS	0.2539	0.2422	0.4203	0.2421
	PEN	0.1983	0.2228	0.2421	0.5588
Agosto	ANG	0.3174	0.2810	0.2506	0.1395
	MMT	0.2810	0.4137	0.2510	0.1303
	MPS	0.2506	0.2510	0.4930	0.1598
	PEN	0.1395	0.1303	0.1598	0.2464
Septiembre	ANG	0.2534	0.2940	0.1912	0.1620
	MMT	0.2940	0.4312	0.2594	0.1989
	MPS	0.1912	0.2594	0.4953	0.1603
	PEN	0.1620	0.1989	0.1603	0.3326
Octubre	ANG	0.2517	0.2470	0.1978	0.1175
	MMT	0.2470	0.3726	0.2020	0.1260
	MPS	0.1978	0.2020	0.3999	0.1701
	PEN	0.1175	0.1260	0.1701	0.2995
Noviembre	ANG	0.1747	0.1594	0.0917	0.0711
	MMT	0.1594	0.2857	0.1189	0.0934
	MPS	0.0917	0.1189	0.3177	0.1655
	PEN	0.0711	0.0934	0.1655	0.3073
Diciembre	ANG	0.1875	0.0886	0.1165	0.0819
	MMT	0.0886	0.2435	0.0778	0.0649
	MPS	0.1165	0.0778	0.3833	0.1823
	PEN	0.0819	0.0649	0.1823	0.3636

REFERENCIAS

- [1] P. V. Larroyd, V. L. De-Matos y E. C. Finardi, *Assessment of Risk-Averse Policies for the Long-Term Hydrothermal Scheduling Problem*,

Energy Systems, vol. 8, n° 1, p. 103–125, 2017.

- [2] M. V. F. Pereira y L. M. V. G. Pinto, *Stochastic Optimization of a Multireservoir Hydroelectric System:*

- A Decomposition Approach*, Water Resources Research, vol. 21, n° 6, p. 779–792, 1985.
- [3] R. E. C. Gonçalves, E. C. Finardi, E. L. Da-Silva y M. L. L. Dos-Santos, *Comparing Stochastic Optimization Methods to Solve the Medium-Term Operation Planning Problem*, Computational and Applied Mathematics, vol. 30, n° 2, p. 289–313, 2011.
- [4] V. L. De-Matos y E. C. Finardi, *A Computational Study of a Stochastic Optimization Model for Long Term Hydrothermal Scheduling*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 43, n° 1, p. 1443–1452, 2012.
- [5] K. W. Hipel and A. I. McLeod, *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science Pub Co, 1994.
- [6] PSR, *SDDP Methodology Manual*, Rio de Janeiro, 2020.
- [7] M. Maceira, V. Duarte, D. Penna, L. Moraes y A. Melo, *Ten years of application of stochastic dual dynamic programming in official and agent studies in Brazil*, 16th Power Systems Computation Conf., 2008.
- [8] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel and G. M. Ljung, *Time series analysis: forecasting and control*, 5a ed., John Wiley & Sons, 2015.
- [9] P. J. Brockwell and R. A. Davis, *Introduction to Time Series and Forecasting*, 3a ed., Springer, 2016.
- [10] A. J. Conejo, M. Carrión, J. M. Morales, *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets*, Springer, 2010.
- [11] G. E. P. Box and D. R. Cox, *An analysis of transformations*, Journal of the Royal Statistical Society: Series B, vol. 26, no. 2, pp. 211–243, 1964.
- [12] A. Shapiro and W. Tekaya, *Report for Technical Cooperation between Georgia Institute of Technology and ONS*, Atlanta, Georgia, 2011.
- [13] B. Bezerra, *Incorporação da Incerteza dos Parâmetros do Modelo Estocástico de Vazões na Política Operativa do Despacho Hidrotérmico*, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, 2015.
- [14] L. A. Terry, M. V. F. Pereira, T. A. Araripe, L. F. C. A. Silva, and P. R. H. Sales, *Coordinating the Energy Generation of the Brazilian National Hydrothermal Electrical Generating System*, Interfaces (Providence), vol. 16, no. 1, pp. 16–38, 1986.
- [15] Noakes, D., McLeod, A. and Hipel, K., 1985. *Forecasting monthly riverflow time series*. *International Journal of Forecasting*, 1(2), pp.179–190.
- [16] F. Treistman, M. E. Maceira, D. D. Penna, J. Machado, and O. Rotunno, *Synthetic Scenario Generation of Monthly Streamflows Conditioned to the El Niño–Southern Oscillation: Application to Operation Planning of Hydrothermal Systems*, Stoch. Environ. Res. Risk Assess., vol. 34, no. 2, pp. 331–353, 2020.
- [17] International Hydropower Association, *2018 Hydropower Status Report: Sector trends and Insights*. London, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.hydropower.org/publications/2018-hydropower-status-report>.
- [18] M. L. Arganis-Juárez, R. Mendoza-Ramírez, R. Domínguez-Mora, A. A. Hernández-Ruiz, and M. Berezowsky-

- Verduzco, *Influence of Guiding Curves in the Optimal Management of a Hydropower System*, Water Resour. Manag., pp. 4989–5001, 2013.
- [19] CFE, *Sinopsis meteorológica y pronóstico preliminar*, Enero 4, 2021, Mexico City, 2021.
- [20] M. L. Arganis-Juaréz, R. Mendoza-Ramírez y R. Domínguez-Mora, *Operación de tres presas hidroeléctricas usando curvas guía y programación dinámica estocástica*, Water Science & Technology, vol. 3, n° 3, p. 97–114, 2012.