



REVISTA CIENTÍFICA DE
INGENIERÍAS
Y ARQUITECTURA

VOLUMEN 4 NÚMERO 2

CARTA EDITORIAL	5
Bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica “tepezil” como estabilizadores de tierra arcillosa proveniente de Yagul, Oaxaca	8
Monitoreo de la calidad del aire en viviendas como estrategia para mejorar el bienestar general	29
Red neuronal artificial para determinar la condición ecofisiológica de los helechos espada a partir de una imagen	45
Clasificación del estado de salud de la Lantana camara mediante redes neuronales y extracción de características	74
Migración del sistema de control de prácticas profesionales y servicio social (SC-PPySS) de la escuela de ingenierías y arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca: una aplicación práctica	97

CARTA EDITORIAL

Apreciable comunidad:

Es un honor para mí dirigirme a ustedes para presentar este nuevo número de la Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca. En esta edición, compartimos un compendio de investigaciones que reflejan cómo la gestión del conocimiento recorre desde la recuperación de saberes locales hasta la implementación de tecnologías de vanguardia. Estamos convencidos de que la investigación no debe ser un ejercicio aislado, sino un motor capaz de transformar nuestra realidad regional y global.

El primer artículo, titulado “Bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica “tepezil” como estabilizadores de tierra arcillosa proveniente de Yagul, Oaxaca”, nos invita a repensar la construcción desde la sostenibilidad y la identidad cultural, proponiendo soluciones de vivienda que respetan nuestro patrimonio. En esa misma línea de bienestar social, el segundo artículo, “Monitoreo de la calidad del aire en viviendas como estrategia para mejorar el bienestar general”, aborda la salud pública desde la arquitectura, recordándonos que los espacios habitacionales deben ser, ante todo, seguros y dignos.

Avanzando hacia la integración tecnológica, el tercer y cuarto artículo demuestran cómo el investigar implica adoptar nuevas herramientas. En “Red neuronal artificial para determinar la condición ecofisiológica de los helechos espada” y “Clasificación del estado de salud de la Lantana camara mediante redes neuronales”, los investigadores evidencian que las nuevas herramientas computacionales son aliadas indispensables para la gestión ambiental.

Cerrando esta edición, se presenta la “Migración del sistema de control de prácticas profesionales y servicio social (SC-PPySS)”. Este trabajo subraya la importancia de la mejora continua en los procesos administrativos, validando que la transformación digital es un pilar fundamental para la eficiencia educativa.

Finalmente, les hago la invitación a leer esta edición buscando la inspiración a ejercer una ciencia con propósito para el bien común. Mi total agradecimiento y reconocimiento a los autores y colaboradores por su compromiso y dedicación para generar este espacio de diálogo científico.

Indivisa Manent
Lo unido permanece

José Adrián Villanueva Ortiz
Director de Posgrado e Investigación

Derechos de Autor© 2025 Villanueva Ortiz, José Adrián



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica “tepezil” como estabilizadores de tierra arcillosa proveniente de Yagul, Oaxaca

Maguery bagasse and volcanic stone powder “tepezil” as stabilizers of clay soil from Yagul, Oaxaca.

H.Z. López Calvo¹, L.M. Ángel Pérez², H. Gómez Barranco^{3*}, L.C. Rodríguez Sanchez⁴

**Autor de correspondencia*

DOI: 10.56643/rcia.v4i2.208

Como citar este artículo: López Calvo et al. (2025). Bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica “tepezil” como estabilizadores de tierra arcillosa proveniente de Yagul, Oaxaca. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 4(2). 8-28. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i2.208>

RESUMEN

En el presente artículo se describen los trabajos encaminados a evaluar los efectos de la adición de fibra de bagazo de maguey (FBM), obtenida como sub-producto de la elaboración de mezcal, combinada con polvo de piedra volcánica (PPV), conocido con el nombre de tepezil, como estabilizadores de las propiedades físico-mecánicas de tierra arcillosa proveniente de la comunidad de Yagul, Oaxaca. De acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), la tierra seleccionada fue clasificada como arcillas inorgánicas de mediana plasticidad. Durante la fase experimental se elaboraron 16 mezclas utilizando combinaciones de 0, 20, 25, 30, 33, 37, 40, 50, 60 y 75% de FBM y PPV como estabilizadores de la tierra para su aplicación como material de construcción.

1 Doctor en Ingeniería Civil. Profesor-investigador de la Facultad de Arquitectura 5 de mayo de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6386-0249>. Correo electrónico: hz.lopez.calvo@gmail.com

2 Arquitecta. Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca (UABJO), Facultad de Arquitectura 5 de mayo, Maestría en Ciencias de la Construcción, Cuerpo Académico Tecnología y Sustentabilidad. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0124-2500>. Correo electrónico: lauramaganpe@gmail.com

3 Doctora en Protección de los Patrimonios Históricos. Profesora-investigadora de la Facultad de Arquitectura 5 de Mayo de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7221-1438>. Correo electrónico: arq.heidy.gb@gmail.com

4 Doctora en Historia Moderna y Contemporánea. Profesora-investigadora de la Facultad de Arquitectura 5 de Mayo de la Universidad Autónoma Benito Juárez de Oaxaca, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1546-9050>. Correo electrónico: cecil.rs@gmail.com

Recibido: 19/03/2025 | Aceptado: 09/05/2025 | Publicado: 15/12/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. .

Las propiedades evaluadas fueron: contracción por desecación, resistencia a la compresión y pruebas de inmersión. Los resultados revelaron que la adición de bagazo de maguey y polvo de tepezil contribuyó a mejorar las propiedades físico-mecánicas de la tierra, reduciendo el porcentaje de contracción lineal hasta en 25% e incrementando su resistencia al humedecimiento bajo pruebas de inmersión hasta en 96.90% en comparación con la mezcla control elaborada con sólo tierra arcillosa.

PALABRAS CLAVE: durabilidad, resistencia, estabilización, subproductos de maguey, suelo.

ABSTRACT

In this paper, the work was to evaluate the effects of the addition of maguey bagasse fiber (FBM) obtained as a by-product of the mezcal production in combination with volcanic stone powder (PPV), known as tepezil, as stabilizers in the physical and mechanical properties of the clay soil from the community of Yagul, Oaxaca. The selected soil was classified as inorganic clays of medium plasticity according to the Unified Soil Classification System (USCS). During the experimental phase, 16 mixtures were prepared in combinations of 0, 20, 25, 30, 33, 37, 40, 50, 60 and 75 % of FBM and PPV as soil stabilizers for application as construction material. The properties evaluated were: shrinkage due to drying, compressive strength and immersion tests. The results revealed that the addition of maguey bagasse and tepezil powder were favorable to improve the physical and mechanical properties of the soil, by reducing the percentage of linear contraction by up to 25 %, and increased their resistance to wetting under immersion tests by up to 96.90 %, compared to the control mixture made with only clay soil.

KEYWORDS: durability, maguey byproducts; resistance; soil, stabilization.

INTRODUCCIÓN

El uso de tierra como material de construcción tiene su origen en la manipulación y combinación de materiales accesibles al ser humano para su protección ante el medio ambiente. Con el paso del tiempo, la tecnificación y el mejoramiento de dichos materiales generaron diversos sistemas constructivos basados en tierra, que hoy en día constituyen una alternativa para disminuir el impacto ambiental, ya que su uso supone un menor gasto energético si se lo compara con materiales industrializados (Solís et al., 2015; Vásquez, 2001).

Existen dos procesos para elaborar materiales de construcción que utilizan la tierra como materia prima. El más sofisticado de ellos implica el uso de tierra cocida en hornos a altas temperaturas. El segundo está basado en la utilización de tierra cruda, a la que no se le aplica ningún proceso de cocción (Ordóñez, 2012). Entre estos últimos, los más conocidos son: los bloques de arcilla cruda, también llamados adobe, la tapia o tierra compactada y el bahareque.

Sin embargo, dada su naturaleza, no todos los suelos son aptos para ser usados como material de construcción. Buscando mejorar las propiedades físico-mecánicas de la tierra se han desarrollado diversas investigaciones, que implicaron su estabilización con agentes externos, ya sea por procesos consolidantes, en lo que se conoce como estabilización heterogénea, o por la adición de fibras en las matrices (Arteaga et al., 2011).

Empleando el proceso consolidante, Vilela Mora y Loaiza Carrión (2017) determinaron que la incorporación de 8% de peso del adobe en cemento resulta adecuada para estabilizar y mejorar sus condiciones físicas. Entre los estabilizadores utilizados más comúnmente en los sistemas de construcción con tierra se encuentran las fibras de origen artificial o natural (Laborel-Préneron, 2016). El uso de fibras contribuye a disminuir considerablemente la formación de fisuras, evitando su aparición durante la etapa de dilatación, retracción y endurecimiento del elemento de tierra. En este mismo sentido, Ghavami et al. (1999) concluyeron en su investigación que la adición de fibras de coco y sisal de 50 milímetros de longitud en un porcentaje de 4% tuvo un efecto significativo en la prevención de la aparición de grietas por contracción en el proceso de secado; además, su uso incrementó ligeramente su resistencia a la compresión. Sin embargo, otros estudios en los que se evaluaron mezclas de tierra que contenían cemento Portland, tepezil y fibras de agave determinaron que el aumento de fibras en la mezcla redujo en aproximadamente 46% la resistencia a la compresión con respecto a una muestra control que no contenía fibras (Olivera et al., 2018). Por otra parte, se han probado diversas adiciones, tales como cemento, cal y subproductos naturales e industriales, para la estabilización de la tierra. En su investigación, Vilane (2010), por ejemplo, empleó melaza, estiércol de vaca, aserrín y cemento Portland como estabilizadores en bloques de tierra. Hossain et al. (2007), por su parte, proponen el uso de ceniza volcánica, cal, cemento y sus combinaciones para pavimentos de carreteras, aeródromos, presas de tierra y viviendas de bajo costo. La adición de ceniza de cascarilla de arroz y cemento estabiliza suelos residuales, disminuyendo la densidad seca máxima y aumentando el contenido óptimo de humedad tras incorporar 6-8% de cemento y 10-15% de ceniza de cascarilla de arroz (Basha et al., 2005).

El cemento Portland es el material más utilizado para la estabilización de tierra que se usará como material de construcción. Sin embargo, su fabricación requiere un alto consumo energía, con la consecuente liberación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero y altas emisiones de CO₂ (Worrell, Price, Hendricks y Ozawa-Meida, 2001). Según Moreno et al. (2022), es posible sustituir parcialmente el agregado fino o de cemento en materiales constructivos con rocas metamórficas como el polvo de mármol; al respecto, en su investigación concluyen que, en proporciones de entre 10 y 15%, el polvo de mármol como sustituto parcial del cemento proporciona un incremento en la resistencia a la compresión de morteros, concretos e incluso en la fabricación de ladrillos. No obstante, Álvarez, Ríos y Castellanos (2021) indicaron en su estudio que los morteros en los que se usó piedra pómez como materia prima para la producción de geopolímeros alcanzaron resistencias a la compresión de 19.16 MPa-19.96 MPa, inferiores a las obtenidas con morteros de cemento Portland ordinario, que lograron resistencias a la compresión de 27.92 MPa-29.00 MPa.

El bagazo es el residuo fibroso del maguey y representa aproximadamente 14 a 20% del peso de la planta. Las cantidades producidas en el estado de Oaxaca alcanzan aproximadamente 122,696 toneladas al año; comúnmente es empleado como combustible para calderas en la propia producción del mezcal, a pesar de lo cual la mayor parte se vierte en ríos, arroyos o simplemente se amontona fuera de palenques o terrenos de cultivo y su lenta degradación lo convierte en un problema ambiental (Martínez et al., 2013). En la literatura se puede encontrar información sobre la estabilización de la tierra empleando subproductos del maguey, lo que mejora sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad para su uso como material de construcción. Tales son los resultados de la investigación de Lejano y Pineda (2018) sobre tierra comprimida estabilizada con distintas fibras naturales, como la fibra de coco, abacá y maguey, en donde se constató la capacidad de carga de muros reforzados con fibra aumenta en 33.79% en comparación con los muros no reforzados. La adición de bagazo de maguey contribuye considerablemente a mejorar la resistencia a la flexión y la resistencia a la compresión, según lo determinó el estudio de Caballero et al. (2018). Es en el contexto antes mencionado que la investigación relacionada con el uso de materiales de construcción alternativos de origen natural, como puzolanas y fibras cuya obtención no requiere procesos altamente contaminantes, y el aprovechamiento de residuos agroindustriales como el bagazo de maguey, adquiere gran relevancia desde el punto de vista ambiental y científico. La presente investigación tiene como objetivo evaluar los efectos de la incorporación de bagazo de maguey en conjunto con el polvo de piedra volcánica “tepezil” como estabilizadores, para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de una tierra arcillosa proveniente de

la región de Yagul, Oaxaca, para su posible uso como material de construcción sustentable, como son los sistemas constructivos que emplean arcilla como materia prima, entre ellos, el adobe, la tapia y el bahareque.

Entre las limitaciones detectadas se encuentra la variabilidad de los materiales, ya que el bagazo puede mostrar distinta composición y comportamiento en combinación con las adiciones, según la especie o el método de extracción poco estandarizado, así como la variación del tepezil en granulometría y mineralogía.

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en esta investigación es de tipo aplicada con un enfoque cualitativo, ya que las variables son obtenidas mediante la recolección, la medición aritmética y el análisis de datos con métodos estadísticos (Hernández Sampieri, 2014). Para evaluar los efectos de la adición de bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica tepezil en las propiedades físico-mecánicas de tierra arcillosa proveniente de Yagul, Oaxaca, se desarrolló un diseño experimental. Las variables consideradas en el estudio fueron el tipo de mezcla, seis en combinaciones binarias (CBI) y 10 en combinaciones ternarias (cte). Los componentes y niveles de las mezclas fueron T1, FBM y PPV, refiriéndose respectivamente a tierra de la región, fibra de maguey de especie agave angustifolia y polvo de piedra volcánica en combinaciones de 0, 20, 25, 30, 33, 37, 40, 50, 60 y 75% . En lo que respecta a la variable tiempo transcurrido o edad, las mezclas se probaron a los siete y 30 días de edad. Las variables de respuesta fueron la resistencia a la compresión axial, el porcentaje de contracción por desecación y la resistencia al proceso de inmersión. Los detalles del diseño experimental se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Variables empleadas en el diseño experimental.

Variables de respuesta	Características y dimensiones de la muestra	Número de muestras y edad de prueba	Equipos de prueba y norma utilizada
Resistencia a la contracción por desecación	Barra de 40 x 40 mm de sección transversal y 400 mm de longitud.	Una réplica por mezcla probada a los 30 días.	Toma de medidas con calibrador Vernier de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-416- ONNC-CE-2003.

Resistencia a la inmersión	Cubos de 100 mm por lado.	Dos réplicas por mezcla probadas a los siete días.	De acuerdo con la norma ASTM C-67.
Resistencia a la compresión		Dos réplicas por mezcla probadas a los siete días.	Máquina de ensayo hidráulica ALCON. Ensayos de acuerdo con la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2014.
Nota: Elaborada por los autores			

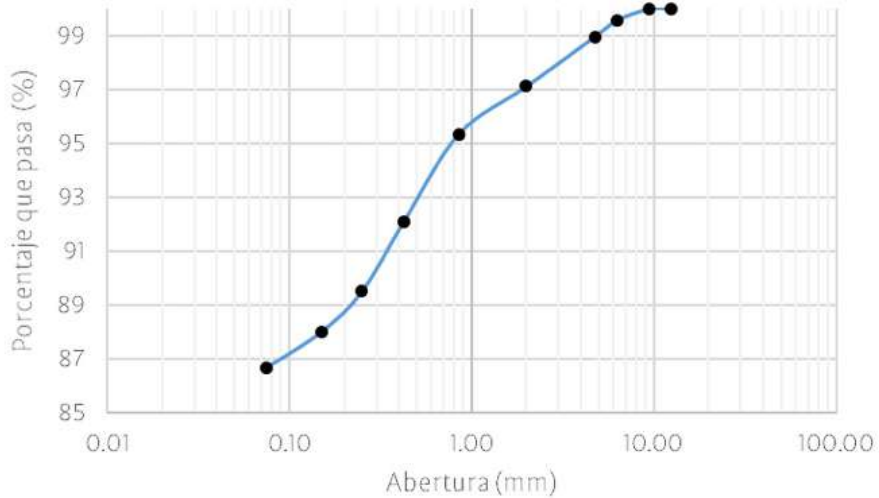
La tierra (T1) utilizada proviene de la región de Yagul, localizada aproximadamente a una hora de la capital del estado de Oaxaca. En la figura 1 se muestra la localización del predio del que se obtuvo la tierra de estudio.

Figura 1. Localización de la región de estudio. Fuente: Elaboración propia.



Visualmente se identificó la tierra como de color gris y su contacto con agua dificultaba su trabajabilidad, ya que se volvía sumamente pegajosa para su manipulación. Se inició la caracterización del suelo con la obtención del peso volumétrico seco suelto (pvss) y del peso volumétrico seco compacto (pvsc), de acuerdo con la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004. Los resultados obtenidos mostraron que el pvss fue de 1,174 kg, mientras que el pvsc fue de 1,408 kg. En segunda instancia, se hizo un análisis granulométrico acorde a la norma NMX-C-077-ONNCCE-2022. Los resultados obtenidos revelaron que la tierra analizada está constituida por 86.69% de arcilla, 1.33% de limos, 10.96% de arenas y tan sólo 1.03% de gravas. En la figura 2 se muestra la gráfica granulométrica obtenida.

Figura 2. Gráfica granulométrica de la muestra de tierra de Yagul, Oaxaca. Fuente: Elaboración propia



Seguidamente se determinaron el índice líquido, el límite plástico y el índice de plasticidad, según la norma mexicana NMX-C-493-ONNCCE-2018. Empleando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (sucs), la tierra fue identificada como un suelo de arcillas inorgánicas de mediana plasticidad (cl), con un límite líquido (ll) de 35.50%, un límite plástico (lp) de 24% y un índice plástico (ip) de 11.50%. Para la elaboración de las mezclas se utilizó fibra de bagazo de maguey proporcionada por un palenque de producción de mezcal de la región de Yagul, Oaxaca. Para su secado, el bagazo se expuso tres días al sol; posteriormente, se seleccionaron fibras cuyo tamaño oscilaba entre 20 mm y 40 mm de longitud como máximo. Asimismo, se adquirió polvo de piedra volcánica (PPV) con un proveedor de materiales de construcción local, para utilizarlo como adición estabilizante. En la figura 3 se muestran los dos estabilizantes.

Figura 3. Materiales estabilizantes. Izquierda: polvo de piedra volcánica (PPV). Derecha: bagazo de maguey (FBM). Fuente: Elaboración propia



2.1 Diseño de la argamasa y su proceso de estabilización

Para evaluar la factibilidad de estabilización de la tierra del sitio para su empleo como material de construcción, se desarrolló un diseño experimental que supuso la elaboración de 16 mezclas derivadas de la combinación de tierra T1, PPV y FBM y el uso de una muestra control con tierra T1 sin estabilizar. Dadas sus características de ligereza y composición mineralógica, se decidió utilizar polvo de piedra volcánica, conocido como tepezil, el cual fue cribado en una malla con un tamaño máximo de abertura de 4.75 mm, en combinación con fibras de bagazo de maguey. Con dichas adiciones se elaboraron seis combinaciones binarias (CBI), elaboradas con tierra-bagazo y tierra-polvo de piedra volcánica en porcentajes de 20% y hasta 75% de sustitución con respecto al volumen de tierra. De la misma manera, se elaboraron 10 mezclas ternarias (cte), conteniendo tierra, fibra de bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica en diferentes combinaciones, desde 20% hasta 75% con respecto al volumen de la tierra. En la tabla 2 se muestran las diversas mezclas elaboradas y las combinaciones de sus componentes.

Tabla 2. Componentes de la mezcla y porcentajes de sustitución con respecto al volumen de tierra.

Mezclas	ID	Tierra T1 (%)	FBM (%)	PPV (%)
Control	M1	100	0	0
Combinaciones binarias (CBI)	M2	75	25	0
	M3	50	50	0
	M4	25	75	0
	M5	75	0	25
	M6	50	0	50
	M7	25	0	75
	Combinaciones ternarias (CTE)	M8	60	20
M9		40	20	40
M10		20	20	60
M11		50	30	20
M12		33	33	33
M13		20	30	50
M14		40	40	20
M15		30	40	30
M16		20	40	40
M17		37	25	37

Notas: Elaborada por los autores

2.2 Etapa experimental

2.2.1 Pruebas de contracción por desecación

A fin de realizar las pruebas de contracción por desecación, se elaboraron barras de contracción en moldes de 40 x 40 mm de sección transversal y 400 mm de longitud para cada una de las mezclas (véase figura 4). Para la fabricación de los especímenes, se colocó la tierra en estado plástico en cada uno de los moldes y se dejó secar durante 30 días en el laboratorio a una temperatura de $21 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad de entre 60 y 65 %. Una vez concluido el periodo de secado, se midieron las grietas ocasionadas por la pérdida de humedad con un vernier mecánico y se determinó el porcentaje de contracción mediante la suma de los espesores de las grietas con respecto a la longitud total de la barra.

Figura 4. Especímenes para cálculo de contracción por desecación. Fuente: Elaboración propia



2.2.2 Resistencia a compresión axial

A fin de realizar la prueba de compresión axial, se fabricaron cubos de 100 x 100 x 100 mm para cada una de las mezclas, siguiendo los lineamientos de la norma NMX-C-219-ONNCCE-2005. Una vez alcanzada la edad de prueba, los especímenes fueron sometidos a compresión axial empleando una prensa hidráulica de 120 toneladas de capacidad a una velocidad constante de 0.30 mm por segundo (véase figura 5).

Figura 5. Prueba de compresión axial en cubos de 100 x 100 x 100 mm. Fuente: Elaboración propia



2.2.3 Cálculo de la pérdida de masa por inmersión

Para calcular la pérdida de masa causada por el humedecimiento, se fabricaron por duplicado cubos de 50 x 50 x 50 mm para cada una de las mezclas. Inicialmente se pesaron los especímenes en estado seco y luego se los sumergió en agua durante siete días (véase figura 6). Al cumplir la edad de prueba, los cubos fueron retirados del agua y secados superficialmente con un paño húmedo para quitar los excedentes de agua; luego fueron pesados nuevamente y se calculó la pérdida de masa, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Absorción \%} = 100 \frac{(W_s - W_d)}{W_d}$$

Donde:

W_d : peso seco del espécimen en gramos.

W_s : peso saturado del espécimen en gramos.

Figura 6. Sumersión de cubos de las mezclas durante siete días. Fuente: Elaboración propia

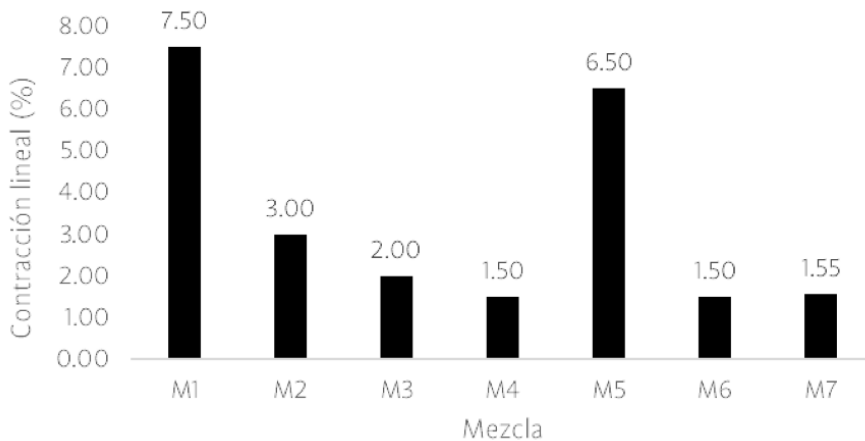


ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1 Resultados de la prueba de contracción lineal por desecación

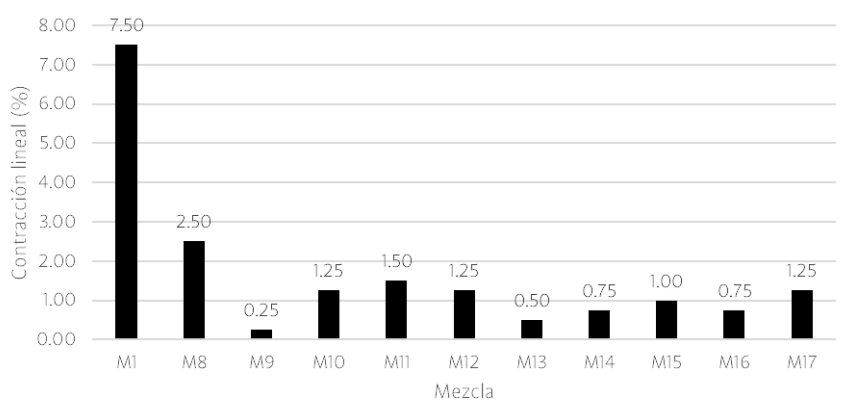
Los resultados de las pruebas de contracción lineal, obtenidos en los especímenes elaborados con combinaciones binarias (CBI) mostrados en la figura 7, revelaron que todas las mezclas evaluadas presentaron cierto porcentaje de contracción por desecación, aunque en diversos grados. Del conjunto de mezclas CBI, la mezcla control (M1) y la mezcla M5 mostraron los resultados más desfavorables, con contracciones superiores a 6.5%. En contraste, el resto de las mezclas mostró contracciones iguales o inferiores a 3.00% de su longitud, es decir, menos de 50% de contracción al compararse con la muestra control. Los mejores resultados se observaron en las mezclas M4 y M6, que mostraron sólo 1.5% de contracción con respecto a la mezcla M1. Cabe destacar que todos los especímenes elaborados con bagazo de maguey en porcentajes mayores a 50% de PPV con respecto al peso volumétrico del suelo presentaron una disminución en su contracción lineal al ser comparados con las mezclas elaboradas sin fibras. Dichos hallazgos están en concordancia con lo concluido por Arteaga, Medina y Gutiérrez (2011), quienes demostraron que mediante la estabilización con fibras se puede controlar la aparición de fisuras en componentes constructivos elaborados con tierra.

Figura 7. Resultados de las pruebas de contracción lineal por desecación en especímenes con combinaciones binarias (CBI), con respecto a la mezcla control (M1). Fuente: Elaboración propia.



En lo que respecta a los resultados de las pruebas de contracción lineal presentadas en la figura 8, obtenidas de las mezclas elaboradas en combinaciones ternarias (CTI), se observa una mejoría evidente en todas las mezclas al compararlas con la muestra control (M1). Un análisis más detallado reveló que la mezcla que presentó mejores resultados fue la M9, que registró una contracción lineal de 0.25%; ésta fue elaborada con 40% de tierra (T1), 20% de bagazo de maguey y 40% de PPV. En contraste, la mezcla M8 registró 2.50% de contracción, siendo la mezcla menos favorable del grupo CTI. Los hallazgos obtenidos en las pruebas de contracción plástica por desecación en ambos grupos de mezclas, CBI y CTI, concuerdan con lo observado por Ghavami et al. (1999), quienes en su investigación concluyeron que la adición de fibras naturales en mezclas de suelo fue benéfica, aunque en diversos grados, para reducir el porcentaje de contracción.

Figura 8. Resultados de las pruebas de contracción lineal por desecación en especímenes con combinaciones ternarias (CTI), con respecto a la mezcla control (M1). Fuente: Elaboración propia.



3.2 Resultados de la prueba de compresión simple

Para la ejecución de las pruebas de resistencia a la compresión, se fabricaron por duplicado cubos de 100 x 100 x 100 mm para cada una de las 16 mezclas. Los resultados mostrados en la figura 9 para combinaciones binarias (CBI) y en la figura 10 para combinaciones ternarias (CTI) revelaron que la incorporación de fibras y polvo de piedra volcánica mostró un efecto adverso en todas las mezclas, reduciendo en diversos grados su resistencia a la compresión en comparación con la muestra control (M1), elaborada con 75% de T1 y 25% de PPV. Un análisis más detallado de las mezclas CBI presentadas en

la figura 9 reveló que la mezcla M5 fue la menos desfavorable, pues mostró una reducción de su resistencia a la compresión de sólo 6.30% en comparación con la mezcla control. Los resultados de las mezclas ternarias (CTI) presentadas en la figura 10 mostraron una reducción de entre 12.3% y 18.95% en todas las mezclas con respecto a la muestra control. Sólo la mezcla M16, elaborada con 20% de TI, 40% de FBM y 40% de PPV, presentó una disminución de 9.4%, siendo ésta la mezcla menos desfavorecida por la incorporación de fibra y PPV. Cabe destacar que los resultados conseguidos están en total concordancia con los obtenidos en las investigación realizadas por Olivera et al. (2018) y Álvarez et al. (2021), en las que se concluye que al incrementarse la proporción de fibras de maguey en los materiales biocompuestos evaluados disminuye la resistencia a la compresión.

Figura 9. Gráfica de resultados de prueba resistencia a la compresión del grupo CBI.
Fuente: Elaboración propia.

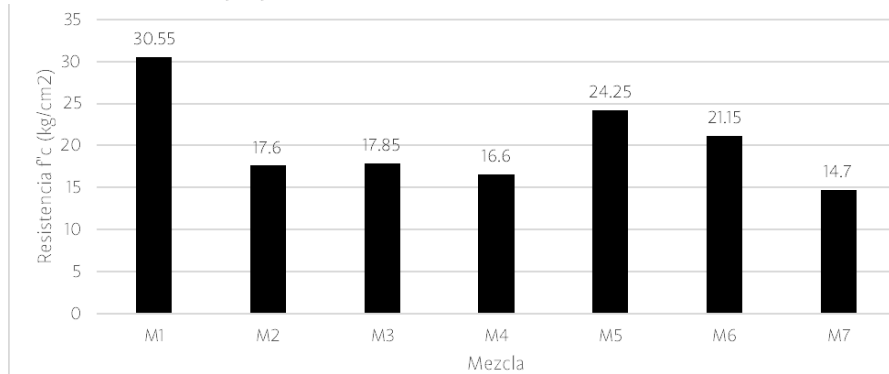
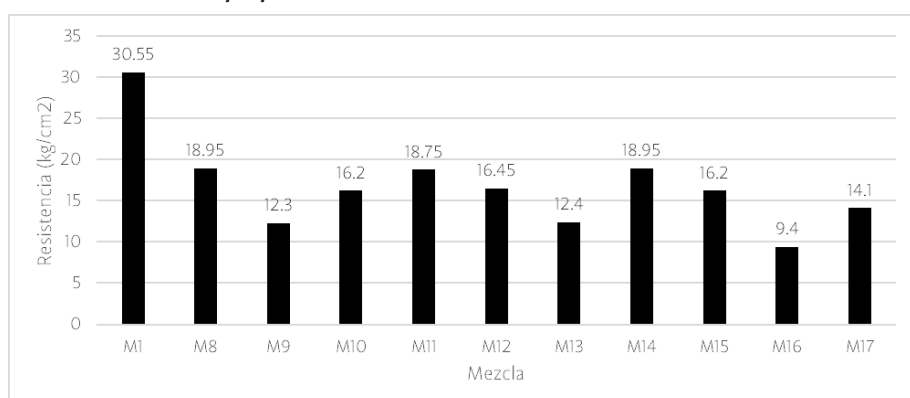


Figura 10. Gráfica de resultados de prueba resistencia a la compresión del grupo CTI.
Fuente: Elaboración propia.



3.3 Resultados de la prueba de pérdida de masa por inmersión

Los resultados de las pruebas de pérdida de masa después de siete días de inmersión revelaron que, en general, los cubos de todas las mezclas sufrieron cierto grado de disminución de masa, cambiando su forma original al redondearse las esquinas, con exposición superficial de fibras y piedras por erosión. Es importante destacar que la mezcla M1 (control) y las mezclas M5, M6 y M7 de la agrupación CBI, las cuales no contenían fibra de bagazo de maguey, se disolvieron totalmente a las pocas horas de haber iniciado la prueba de inmersión, por lo que, como se observa en la figura 11, dichos especímenes fueron descartados del experimento. En contraste, las mezclas M2, M3 y M4, adicionadas con 25%, 50% y 75% de fibras de bagazo de maguey, respectivamente, presentaron pérdidas de masa inferiores a 9% después de siete días de inmersión.

En cuanto a los resultados obtenidos en especímenes del grupo CTI presentados en la figura 12, elaborados con 20% a 30% de bagazo de maguey (FBM), todas las mezclas tuvieron una resistencia adecuada tras siete días de inmersión, con pérdidas de masa inferiores a 15%. Las mezclas M8, M9 y M17 presentaron disminuciones de masa de entre 12% y 13%. Para las mezclas M10, M11, M12 y M15, las reducciones de masa fueron de 8.20% a 4.90%. Finalmente, las mezclas M13, M14 y M16 fueron las más resistentes, registrando pérdidas de masa de 4.0% a 3.10%. En contraste, la mezcla control, preparada únicamente con tierra, se disolvió a las pocas horas de haber iniciado la prueba.

Figura 11: Resultados de la prueba de pérdida de masa por inmersión en especímenes del grupo CBI. Fuente: Elaboración propia.

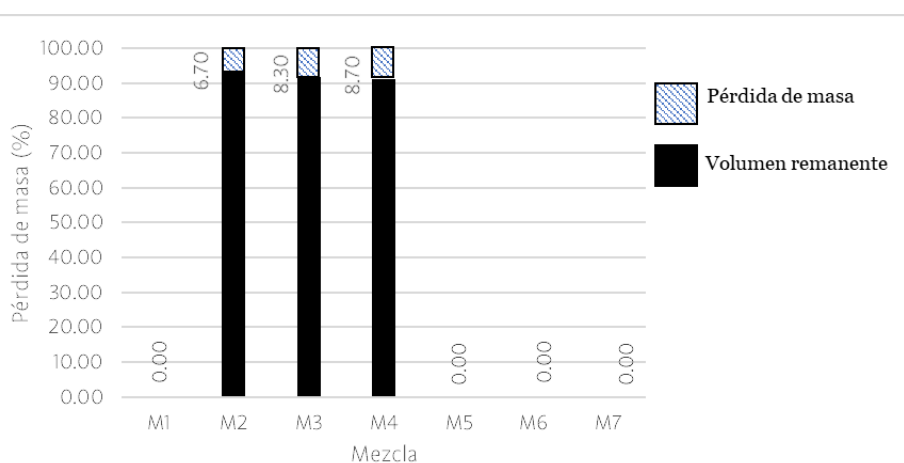
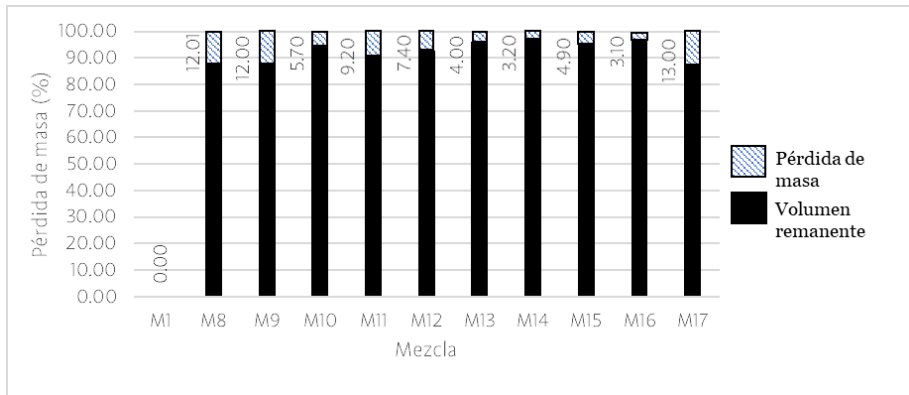


Figura 12: Resultados de la prueba de pérdida de masa por inmersión en especímenes del grupo CTI. Fuente: Elaboración propia.



CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados derivados de la evaluación de las propiedades mecánicas de la tierra arcillosa proveniente de la comunidad de Yagul, Oaxaca estabilizada con bagazo de maguey y polvo de piedra volcánica en combinaciones binarias (tierra-bagazo y tierra-PPV) y combinaciones ternarias (tierra-bagazo-PPV), se puede concluir lo siguiente:

Los resultados de las pruebas de contracción por desecación revelaron que en todos los casos la adición de bagazo de maguey (FBM) y polvo de piedra volcánica (PPV) en los distintos porcentajes evaluados redujo la aparición de grietas provocadas por la pérdida de humedad. Del grupo de mezclas con combinaciones binarias (CBI), la adición de un porcentaje igual o mayor a 25% de fibra de bagazo de maguey fue la mejor opción.

La adición de 50% de PPV mostró resultados satisfactorios en todos los casos; sin embargo, al incrementar el porcentaje de PPV a 75%, los resultados fueron adversos. Con respecto a la tierra con combinaciones ternarias (CTI), se obtuvieron valores de contracción iguales o menores a 2.50 %, por lo que resultados obtenidos permiten concluir que el uso de FBM y PPV en combinaciones ternarias disminuyó considerablemente el porcentaje de contracción lineal.

Los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la compresión revelaron que la incorporación de FBM produjo un efecto adverso en la resistencia a

la compresión. Se constataron disminuciones en su resistencia de entre 24.25 kg/cm² y 14.7 kg/cm² para las mezclas CBI. En cuanto a las mezclas CTI, las disminuciones en su resistencia estuvieron en el orden de 18.95 kg/cm² a 9.4 kg/cm² con respecto a la mezcla control.

Los resultados de la prueba de pérdida de masa por inmersión indican que la mezcla control y las mezclas del grupo binario (CBI) elaboradas con polvo de piedra volcánica (PPV) carecieron de efectividad para resistir la inmersión en agua, pues mostraron una pérdida de masa de 100% en las primeras horas de prueba. Por el contrario, las muestras binarias en las que se adicionó 25%, 50% y 75% de bagazo de maguey mejoraron considerablemente su resistencia ante la inmersión en agua, mostrando pérdidas de masa inferiores a 9%. Sin embargo, el mejor desempeño se observó en las mezclas ternarias (CTI) que contenían 40% de bagazo de maguey (FBM) combinado con 20%, 30% y 40% de polvo de piedra volcánica (PPV), las cuales presentaron pérdidas de masa de 4.0% a 3.10%. Esto permite concluir que la adición de mayores porcentajes de FBM y PPV mejoró notablemente la resistencia de la tierra TI al compararla con la mezcla control, aprovechando así el uso de bagazo de maguey.

Entre las futuras líneas de desarrollo derivadas de esta investigación, se propone el diseño y construcción de prototipos constructivos, ya sea de elementos parciales de una vivienda o de sistemas completos, así como su aplicación práctica en condiciones reales (*in situ*). Asimismo, se recomienda dar continuidad a esta línea de estudio evaluando la tierra arcillosa estabilizada con la incorporación de otros aditivos complementarios. También se sugiere evaluar y analizar el comportamiento del experimento con adiciones de fibra de maguey de otras especies.

REFERENCIAS

- Álvarez Mantilla, H., Ríos Reyes, C. A., y Castellanos Alarcón, O. M. (2021). Propiedades fisicomecánicas, desempeño y durabilidad de morteros geopoliméricos a base de puzolana natural tipo piedra pómez. *INGE CUC*, 17(1), 216-229. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.17>
- Arteaga Medina, K. T., Medina, Ó. H., y Gutiérrez Junco, Ó. J. (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Facultad de Ingeniería*, 20(31),55-68. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=413940770005>
- ASTM C67/C67M-21 - Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile.
- Basha, E. A., Hashim, R., Mahmud, H. B., y Muntohar, A. S. (2005). Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement. *Construction and building materials*, 19(6), 448-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.08.001>
- Caballero, M., Chinas, F., Montes, J. L., Alavéz, R. y Silva, M. E. (2018). Effect on compressive and flexural strength of agave fiber reinforced adobes. *Journal of Natural Fibers*, 15(4), 575-585. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1349709>
- Ghavami, K., Toledo Filho, R. D., y Barbosa, N. P. (1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres. *Cement and concrete composites*, 21(1), 39-48. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00033-X)
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la investigación (6° ed.). Mc Graw-Hill/Interamericana editores, S.A de C.V. ISBN: 978-1-4562-2396-0.
- Hossain, K. M. A., Lachemi, M., y Easa, S. (2007). Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(4), 711-731. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.12.003>
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J. E., Magniont, C., Tribout, C., y Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials:

A review. *Construction and building materials*, 111, 719-734. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>

Lejano, B. A., y Pineda, K. D. (2018). Investigation of the effects of different natural fibers on the strength of compressed stabilized earth blocks (Cseb). *Journal of GEOMATE*, 14(42), 37-43. <https://doi.org/10.21660/2018.42.7142>

Martínez Gutiérrez, G. A., Íñiguez Covarrubias, G., Ortiz-Hernández, Y. D., López-Cruz, J. Y., y Bautista Cruz, M. A. (2013). Tiempos de apilado del bagazo del maguey mezcalero y su efecto en las propiedades del compost para sustrato de tomate. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 29(3), 209-216. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_art-text&pid=S0188-49992013000300007&lng=es&tlng=es

Moreno, A. N., Ponce Palafox, C., Avalos Bemolte, F., y Múzquiz Ramos, E. M. (2022). Marble residues in construction materials: a review of the use of marble dust in mortars, concrete and bricks. *Revista ALCONPAT*, 12(2), 162-183. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i2.522>

NMX-C-073-ONNCCE-(2004). Industria de la Construcción-agregados-masa volumétrica-método de Prueba.

NMX-C-077-ONNCCE-(2022). Industria de la Construcción-Agregados para Concreto-Análisis Granulométrico-Método de Ensayo.

NMX-C-083-ONNCCE-(2005). Industria de la Construcción-Concreto-Determinación de la Resistencia a la Compresión de Especímenes-Método de Ensayo.

NMX-C-416-ONNCCE-(2003). Industria de la Construcción-Muestreo de Estructuras Tírrreas y Métodos de Prueba.

Olivera, A. A., Caballero Caballero, M., Alavéz Ramírez, R., Chiñas Castillo, F., Montes Bernabé, J. L., & Silva Rivera, M. E. (2018). Biocompuesto cemento tepexil reforzado con fibras de *Agave angustifolia* Haw. como mortero ligero. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (21), 4406-4415. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i21.1531>

- Ordóñez, L. (2012). La tierra, un material de construcción sustentable. *Inventio*, 8(16), 41-48. <https://inventio.uaem.mx/index.php/inventio/article/view/385>
- Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., y Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. *Informes de la Construcción*, 67(539), e092. <https://doi.org/10.3989/ic.13.141>
- Vilane, B. R. T. (2010). Assessment of stabilisation of adobes by confined compression tests. *Biosystems Engineering*, 106(4), 551-558. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.06.008>
- Vilela Mora, D. E., y Loaiza Carrión, E. R. (2017). Ensayos preliminares de mezcla suelo-cemento, mejoran la estabilización de adobes para la construcción rural. *Bosques Latitud Cero*, 7(1), 146-156. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/176>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., y Meida, L. O. (2001). Carbon dioxide emissions from the global cement industry. *Annual review of energy and the environment*, 26(1), 303-329. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Sharma, P., Mittal, M., Yadav, A., y Aggarwal, N. K. (2023). Bacterial cellulose: nano-biomaterial for biodegradable face masks—a greener approach towards environment. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 19, 100759. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2022.100759>

Derechos de Autor© 2025 López Calvo, Herwing Zeth; Ángel Pérez, Laura Margarita; Gómez Barranco, Heidy; Rodríguez Sanchez, Luz Cecilia



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Monitoreo de la calidad del aire en viviendas como estrategia para mejorar el bienestar general

Monitoring air quality in homes as a strategy to improve overall well-being.

C.E. Vázquez-Torres^{1*}, E. Vargas Soto², G. Bojorquez-Morales³

**Autor de correspondencia*

DOI: 10.56643/rcia.v4i2.227

Como citar este artículo: Vázquez-Torres et al. (2025). Monitoreo de la calidad del aire en viviendas como estrategia para mejorar el bienestar general. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 4(2). 29-44. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i2.227>

RESUMEN

El descanso adecuado es fundamental para la salud física y mental, y se lleva a cabo principalmente en el entorno residencial. Sin embargo, en regiones con condiciones climáticas extremas, como el sureste mexicano, la calidad del aire interior puede verse comprometida, afectando negativamente el sueño y el bienestar. Ante esta problemática, se desarrolló un sistema de monitoreo ambiental de bajo costo, basado en sensores y tecnologías abiertas, para evaluar variables críticas de calidad del aire en viviendas. La metodología incluyó la selección, calibración y validación de sensores, así como su implementación en una vivienda representativa. Los resultados evidenciaron variaciones significativas de temperatura, humedad, ruido y partículas suspendidas, lo que permitió identificar condiciones que afectan el confort ambiental. Este sistema representa una herramienta accesible y replicable para mejorar la habitabilidad de espacios residenciales en contextos vulnerables.

PALABRAS CLAVE: Calidad del aire; Monitoreo ambiental; Viviendas; Bajo costo; Bienestar.

1 Doctora en arquitectura. Universidad Autónoma de Yucatán y Universidad de Guanajuato. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5388-0780> Correo electrónico: claudia.vazquez@correo.uady.mx

2 Doctora en arquitectura. Universidad de Costa Rica. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4474-1850>.

3 Doctor en arquitectura. Universidad Autónoma de Baja California. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9303-9278>

Recibido: 31/07/2025 | Aceptado: 23/09/2025 | Publicado: 15/12/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

ABSTRACT

Adequate rest is essential for physical and mental health and takes place mainly in the home environment. However, in regions with extreme climatic conditions, such as southeastern Mexico, indoor air quality can be compromised, negatively affecting sleep and well-being. In response to this problem, a low-cost monitoring system based on sensors and open technologies was developed to evaluate critical air quality variables in homes. The methodology included selection, calibration, and validation of sensors, as well as their implementation in a representative home. The results showed significant variations in temperature, humidity, noise, and suspended particles, which made it possible to identify conditions that affect environmental comfort. This system represents an accessible and replicable tool for improving the habitability of residential spaces in vulnerable contexts.

KEYWORDS: air quality, environmental monitoring, healthy housing, low cost, well-being

INTRODUCCIÓN

Las variables relacionadas con la calidad ambiental y el volumen de aire en interiores están intrínsecamente relacionadas con un sueño profundo y, por lo tanto, con el bienestar físico y mental de los usuarios (Orlando-Romero et al., 2023). En los hogares se pasa una cantidad considerable de tiempo, especialmente durante las horas de sueño, cuando el cuerpo se repara y recupera energía. Un ambiente doméstico adecuado es esencial para el desarrollo humano y su productividad.

Desde esta perspectiva, cobran relevancia las iniciativas de monitoreo ambiental, en particular los sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo diseñados para evaluar variables de calidad del aire en viviendas con difícil acceso. El monitoreo ambiental del hogar no sólo contribuye a la creación de un ambiente saludable; además, se relaciona con una mejor calidad de vida y con el bienestar emocional. Los métodos accesibles para el seguimiento de variables ambientales buscan facilitar a investigadores y público interesado elementos para la mejora de las condiciones de vida, generando datos vitales para la salud humana y ambiental (Rodríguez Potes et al., 2018).

La implementación de un sistema de bajo costo es fundamental por su accesibilidad para viviendas que presentan algún tipo de vulnerabilidad (social, económica, ambiental) y por su potencial para ser replicado en otros sectores

o países de América Latina. Equipos sofisticados y costosos muchas veces excluyen a comunidades enteras de participar en la vigilancia de su entorno, debido a su topografía o a la falta de acceso, lo que podría aumentar las disparidades en equidad y justicia energética (Hernández Guerrero, 2020). Vallejo-Sánchez et al. (2024), por ejemplo, midieron variables de confort en un contexto minero con el uso de tecnología con códigos abiertos que facilitó el monitoreo en zonas remotas de Colombia.

En México se han utilizado sensores de bajo costo para monitorear la calidad del agua en plantas de tratamiento (Díaz Ruiz et al., 2022). En áreas rurales de Oaxaca se implementaron sistemas de monitoreo de servicios ambientales que se complementan con tecnología accesible. Uscanga y Perevchtchikova (2020) discutieron cómo en comunidades forestales la percepción social refleja una inclinación por el uso sostenible de recursos y utilizaron sensores que permiten medir variables ambientales cruciales para la agricultura y la gestión forestal. Otro enfoque en el uso de sensores de bajo costo es el monitoreo de la biodiversidad, donde se ejemplifican los usos de sensores en la identificación y el estudio de especies en los bosques de Chiapas (López-Muñoz et al., 2022).

En regiones como el sureste mexicano, caracterizadas por climas cálidos y húmedos, las viviendas suelen construirse con materiales como block de concreto y losas de cemento, lo que influye en la calidad ambiental interior (Robles-Bonilla y Cedano, 2021). Estas condiciones, sumadas a la alta densidad urbana y las limitaciones económicas, afectan directamente el confort térmico y la calidad del sueño de los habitantes. El sistema propuesto se enfoca en la escala interior residencial, considerando variables ambientales dentro de espacios arquitectónicos comunes. Sin embargo, su diseño modular permite una posible expansión hacia la escala urbana, mediante redes de sensores interconectados que podrían generar mapas ambientales en tiempo real (González et al., 2022). Esta visión fortalece el aporte del estudio en términos de salud pública y planificación urbana.

En regiones como Yucatán, la temperatura media anual oscila entre 24 y 28°C, registrándose mínimas diferencias estacionales, lo que genera una demanda constante de confort térmico (Secretaría de Energía, 2020) los climas predominantes en México, la evolución del consumo eléctrico en el sector residencial en los últimos treinta y cinco años, los procesos que determinan la necesidad de usar energía para el confort térmico, las medidas de regulación técnica que se han adoptado en México para su mitigación, las implicaciones en varios aspectos de la vida social y económica del país, y recomendaciones para fortalecer las acciones realizadas a la fecha. Las conclusiones señalan que

el cumplimiento cabal de las regulaciones técnicas (NOM. En climas cálidos húmedos, 95% del tiempo las viviendas de interés social se encuentran fuera de la zona de confort estándar (27°C), lo que afecta directamente el bienestar de los habitantes. Además, en estas zonas el consumo eléctrico residencial ha crecido 6.6 veces desde los años noventa, lo que da cuenta de la presión energética asociada al confort térmico (Secretaría de Energía, 2020) los climas predominantes en México, la evolución del consumo eléctrico en el sector residencial en los últimos treinta y cinco años, los procesos que determinan la necesidad de usar energía para el confort térmico, las medidas de regulación técnica que se han adoptado en México para su mitigación, las implicaciones en varios aspectos de la vida social y económica del país, y recomendaciones para fortalecer las acciones realizadas a la fecha. Las conclusiones señalan que el cumplimiento cabal de las regulaciones técnicas (NOM. Estas condiciones refuerzan la necesidad de sistemas accesibles de monitoreo ambiental que permitan identificar y mitigar factores que afectan la calidad del aire interior y el confort en viviendas vulnerables.

En este contexto se desarrolló un nuevo sistema de monitoreo con variables relacionadas con la calidad del aire y el confort para su aplicación en viviendas, como herramienta para democratizar el acceso a la información ambiental y fomentar la cultura del cuidado del medio ambiente desde desarrollos residenciales. Su diseño unido a tecnologías de código abierto deriva en la posibilidad de expansión y mejora continua para generar un impacto positivo en el Sur global.

El usuario objetivo de este estudio son familias que habitan viviendas de interés social, para las que el monitoreo ambiental puede representar una herramienta clave que mejore su habitabilidad. En este sentido, el sistema se diseñó considerando las condiciones arquitectónicas y climáticas de viviendas comunes en Mérida, Yucatán, una ciudad que experimenta temperaturas extremas y alta humedad relativa (Sistema Meteorológico Nacional, 2020). Ello permitió evaluar el impacto del monitoreo ambiental en espacios donde el descanso puede verse comprometido por la falta de confort y la posible acumulación de contaminantes en el interior.

El objetivo fue el desarrollo de un sistema de monitoreo de bajo costo para atender necesidades específicas de localidades mexicanas con clima extremo, como Mérida, Yucatán. Estas necesidades incluyen la falta de acceso a tecnologías de monitoreo ambiental, la exposición prolongada a condiciones de calor y humedad que afectan el confort térmico y la ausencia de datos locales que permitan tomar decisiones informadas sobre el ambiente interior en viviendas vulnerables.

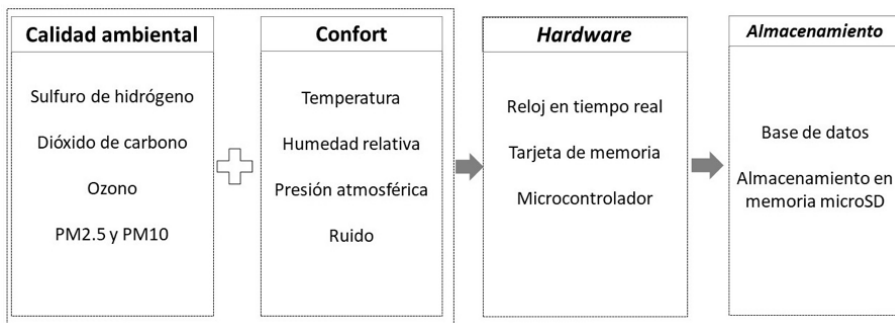
En este contexto, el sistema busca ofrecer una herramienta accesible y relevante para el monitoreo ambiental en entornos domésticos, considerando que el descanso y las horas de sueño son elementos clave para el bienestar de los usuarios.

METODOLOGÍA

El proceso metodológico para el desarrollo del sistema de monitoreo de bajo costo incluyó la revisión de sistemas comerciales diseñados para medir variables similares y la selección de los sensores que finalmente se emplearon para atender necesidades de comunidades mexicanas. La revisión de sistemas comerciales se usó como referencia para establecer los rangos de medición y las funcionalidades requeridas por el sistema propuesto. La eficiencia del sistema podría verse influida por factores contextuales como la ventilación cruzada, los materiales de construcción, los niveles de ocupación y las condiciones climáticas, especialmente en regiones con temperaturas extremas como Mérida, Yucatán.

En la figura 1 se presenta el resultado de esta búsqueda, que sintetiza las variables de medición. El costo total del sistema representa un ahorro de 90% en comparación con la adquisición de sistemas comerciales. Cabe mencionar que estos costos corresponden a la situación financiera global de 2023.

Figura 1. Elementos que conforman el sistema de medición. Elaboración propia.



Etapas del proceso metodológico: (a) selección y adquisición de sensores; (b) configuración del sistema de medición; (c) calibración y validación; (d) elección de caso de estudio para evaluar el sistema de medición; (e) base de datos y análisis de resultados. Uno de los procesos más importantes fue la calibración de los sensores, previamente documentada en Vázquez-Torres et al. (2024) mental, and social welfare. Two limitations to quantifying indoor po-

llutants (gases, chemical compounds, and suspended particles. En este caso, se empleó la referencia calibrada.¹ Para utilizar este método, los instrumentos usados en el proceso de calibración deben contar con un certificado que garantice que fue ajustado siguiendo estándares nacionales o internacionales.

De acuerdo con el proceso documentado previamente, la calibración se lleva a cabo colocando los dispositivos en un mismo ambiente, bajo las mismas condiciones, y se los programa para comenzar a medir simultáneamente. Este proceso se realizó durante cinco días, obteniéndose 1,445 pares de datos que se analizaron y se corrigieron a partir de la siguiente ecuación de corrección.

$$y=1.0476x+12.705 \quad (\text{Ecuación 1})$$

La aplicación de esta ecuación permitió ajustar las mediciones del sensor de bajo costo. En la siguiente ecuación, la “y” representa la variable medida en porcentaje, mientras que la “x” corresponde a la misma variable medida con el sensor de bajo costo. La diferencia entre ambas mediciones es el desfase, que se corrige mediante esta ecuación. Posteriormente, la etapa de validación concluyó al integrar satisfactoriamente este factor de ajuste en el código del microcontrolador.

El caso de estudio seleccionado para realizar mediciones y evaluar el funcionamiento del sistema corresponde a una vivienda localizada en la zona Central de Mérida, Yucatán. Esta vivienda fue edificada con muros de block de concreto, losas de concreto y acabados con mortero cemento-arena.

¹ Método que consiste en comparar las mediciones de un sensor de bajo costo con las de un instrumento ya calibrado previamente.

Figura 2. Distribución arquitectónica y ubicación del sistema de medición de bajo costo. Elaboración propia.



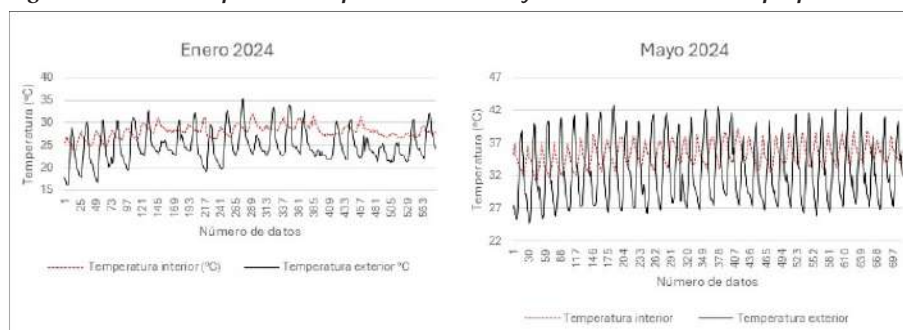
El símbolo rojo observado en la figura 2 indica la ubicación estratégica que se determinó para el sistema de medición y corresponde a la sala, un área común con ventilación cruzada. El sistema de ventilación característico de esta región permite el intercambio constante de aire al interior de este espacio, lo que implica un comportamiento típico de las condiciones ambientales en relación con los espacios arquitectónicos comunes.

Algunos de los componentes del sistema de medición son: sensor de dióxido de carbono (CO₂), sensor de partículas suspendidas (PM_{2.5}, PM₁₀), sensor de sulfuro de hidrógeno (H₂S), sensor de ozono (O₃), sensor de temperatura, sensor de humedad relativa, sensor de presión atmosférica, sensor de sonido, gabinete impreso en 3D, microcontrolador, y fuente de alimentación.

RESULTADOS

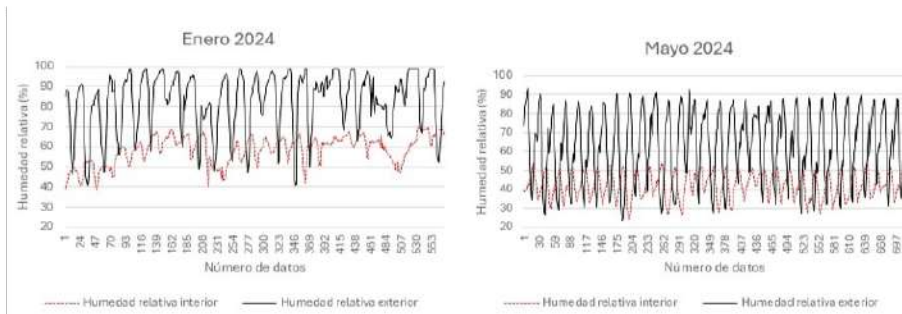
Como resultado se obtuvo una base de datos sólida. Para ejemplificar el funcionamiento de un sistema de medición de bajo costo en el sur de México, se presentan algunas de las variables de medición y su comportamiento para los meses de enero y mayo de 2024. En la figura 3 se presenta el comportamiento de la temperatura interior y exterior. Como se esperaba, la temperatura exterior mostró una oscilación superior respecto de la oscilación de la temperatura en el interior del caso de estudio. Esta variación se debe a la transferencia de calor entre las condiciones exteriores y los elementos de la envolvente, como los sistemas constructivos, el nivel de ocupación o número de habitantes.

Figura 3. Resultados para la temperatura interior y exterior. Elaboración propia.



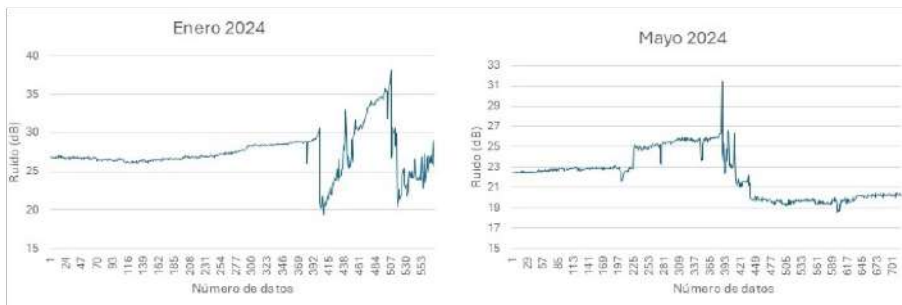
En la figura 4 se presentan los resultados para la humedad relativa en interior y exterior del caso de estudio. Además de la diferencia en la oscilación, se observa un incremento de la humedad para espacios interiores durante la temporada de más calor. Estos datos proporcionan información clave que derivan en estrategias pasivas efectivas.

Figura 4. Resultados para la humedad relativa (interior y exterior). Elaboración propia.



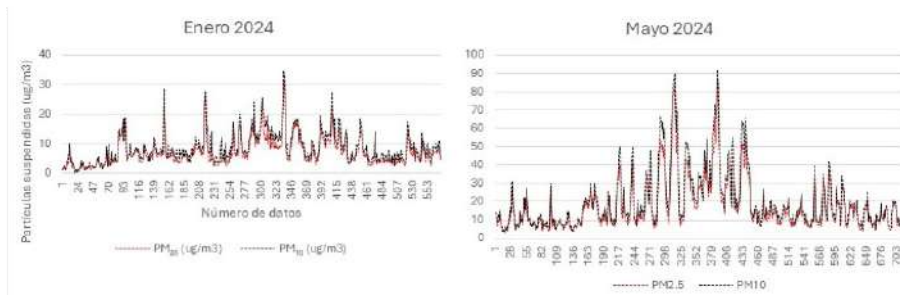
El ruido ambiental, medido en decibeles, se muestra en la figura 5. A lo largo del periodo de medición, esta variable presentó altibajos. Durante la segunda mitad de enero, se registraron niveles más altos, lo que sugiere un aumento en la actividad social en el entorno. Es importante señalar que las mediciones se realizaron mientras la vivienda estaba desocupada, por lo que las variaciones de ruido corresponden únicamente al ambiente exterior. En mayo, se observaron oscilaciones que coinciden con sonidos provenientes del entorno cercano.

Figura 5. Resultados para el ruido interior. Elaboración propia.



Finalmente, la figura 6 muestra el comportamiento de las partículas suspendidas en el aire. Se observó que las partículas de distintos tamaños presentan una presencia similar en el interior de la vivienda. Un aspecto destacado es la variación registrada durante el mes más cálido, cuando los niveles mostraron oscilaciones mayores en comparación con el mes más frío.

Figura 6. Resultados para las partículas suspendidas. Elaboración propia.



DISCUSIÓN

La calidad del aire en el hogar constituye un tema crítico, aunque poco explorado en contextos latinoamericanos, donde las evidencias indican su estrecha relación con el bienestar físico y mental de las personas. Diversos estudios han demostrado que dormir en ambientes mal ventilados o con presencia de contaminantes puede provocar efectos adversos en la calidad del sueño y la salud en general (Cedeño Quijada et al., 2022). En particular, la investigación evidenció que la calidad del aire en interiores puede comprometer las funciones de descanso, reparación y conservación de energía del cuerpo humano, y resaltó la necesidad de aplicar un enfoque más integral en los sistemas de ventilación y monitoreo ambiental (Ramírez Ruiz et al., 2024). La literatura científica indica que contaminantes como el dióxido de carbono (CO₂) pueden provocar somnolencia y afectar la concentración (Kang et al., 2024), mientras que las partículas PM_{2.5} y los compuestos orgánicos volátiles (voc) están asociados a la irritación respiratoria y a alteraciones en la arquitectura del sueño. El ozono (O₃) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) también pueden influir negativamente en la calidad del descanso, especialmente en personas con afecciones respiratorias. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de monitorear dichos contaminantes en espacios residenciales, para prevenir impactos en la salud del sueño. Diversos estudios han demostrado que la exposición prolongada a contaminantes como CO₂, PM_{2.5} y voc puede alterar los ciclos circadianos, reducir la duración del sueño profundo y aumentar la probabilidad de despertares nocturnos (Sun et al., 2024). Estas alteraciones afectan directamente la capacidad de recuperación física y mental durante el descanso. Por ello, el monitoreo ambiental en espacios residenciales representa una herramienta preventiva para mejorar la calidad del sueño en contextos vulnerables. El desarrollo de sistemas de monitoreo ambiental accesibles se presenta como una estrategia clave para visibilizar problemáticas cotidianas que afectan el confort en los hogares.

Los resultados obtenidos evidencian impactos relevantes en términos de accesibilidad tecnológica, posibilidad de mejora del confort ambiental y potencial de replicabilidad en contextos vulnerables. El sistema puede contribuir a la educación ambiental doméstica y generar datos útiles para el diseño de políticas públicas enfocadas en la salud y la habitabilidad. Además de los beneficios tecnológicos y educativos, se espera que el sistema contribuya directamente a mejorar el descanso nocturno en viviendas vulnerables. La identificación de condiciones ambientales adversas permite a los usuarios tomar decisiones informadas para mejorar la ventilación, reducir la exposición a contaminantes y optimizar el confort térmico, lo cual puede traducirse en una mejora en la calidad del sueño y, por ende, en la salud física y mental.

La incorporación de sensores de bajo costo en espacios residenciales incluye protocolos científicos y, sobre todo, aporta información clave para conocer el estado actual de la calidad del aire en los hogares mexicanos. A partir de esta base de datos, es posible generar estrategias individuales, regionales o nacionales enfocadas en el mejoramiento de políticas que favorecen la salud de los usuarios. Es importante señalar que el uso de sistemas de bajo costo en un sector social clave (el residencial), posee el potencial de incrementar el porcentaje de educación ambiental nacional y de uso de herramientas que en su origen suponen la democratización en el acceso a la información. Ambos elementos son indispensables para el desarrollo científico nacional en temas multidisciplinarios relacionados con las ciencias ambientales, sociales y humanas a través de la promoción del autocuidado doméstico (Paniagua Ríos y Vélez Pliego, 2022).

En muchos casos, el desarrollo tecnológico alcanzado en países de Primer Mundo no corresponde a las necesidades de la sociedad en América Latina. Por este motivo, se buscó integrar el sistema de bajo costo presentado en este manuscrito a la realidad del contexto social y espacial para el que fue desarrollado en el sur de México. En este sentido, Ramírez Ruiz et al., (2024) encontraron que el abordaje de aspectos enfocados en particular en el caso de estudio puede incrementar su impacto positivo en la salud pública. La generación de bases de datos en contextos locales siguiendo criterios científicos contribuye al fortalecimiento de redes de investigación locales y permite la toma de decisiones robustas y con mejores posibilidades de éxito.

Los resultados de este estudio iniciaron con un proyecto piloto aplicado a viviendas para mostrar el potencial y la replicabilidad efectiva como alternativa de mejora de las condiciones de salud en espacios domésticos a través de la mejora de la calidad del aire interior. Este proyecto se visualiza además

como una herramienta de educación ambiental en contacto directo con los usuarios de diferentes contextos.

Como línea de investigación futura, se considera pertinente evaluar el impacto de los sistemas de ventilación existentes (natural y mecánica) sobre la variabilidad de contaminantes en espacios de descanso, particularmente en dormitorios. Esta evaluación, complementada con datos estacionales y longitudinales, permitiría fortalecer la pertinencia del sistema desarrollado y ampliar su aplicación en estudios sobre salud ambiental.

CONCLUSIONES

Este estudio se centró en el desarrollo de un sistema de medición de bajo costo para cuantificar variables de la calidad ambiental y como herramienta necesaria para mejorar las condiciones de vida en Latinoamérica. Las largas jornadas laborales enfrentadas en los países latinoamericanos requieren un descanso adecuado que permita conservar la salud física y mental. Por este motivo, los espacios residenciales representaron un eje clave de atención de las condiciones ambientales, en aras de lograr el bienestar integral de los usuarios.

Se demostró que los sistemas de bajo costo representan una herramienta confiable y accesible con potencial para responder a necesidades regionales y nacionales inherentes a espacios arquitectónicos saludables. A escala nacional, la integración de bases de datos permite dimensionar las condiciones actuales y diseñar estrategias de mejora determinadas para una localidad o una región. Este enfoque, complementado con la participación ciudadana, determina una guía para el cuidado personal y la promoción de espacios residenciales que integren en su diseño elementos que promuevan la salud del sueño.

Finalmente, mediante la aplicación de este proyecto a entornos urbanos residenciales en México se buscó integrar soluciones factibles ante los retos ambientales enfrentados a nivel global. En paralelo, este sistema de recolección de datos ambientales aporta elementos de gobernanza e información al alcance de todo aquel interesado en la adaptación y mitigación del cambio climático a través de la envolvente. Como área de oportunidad, se considera una red interconectada de sensores en diferentes puntos de la ciudad objetivo, que integren resultados robustos para fortalecer y/o revisar políticas urbanas regionales.

AGRADECIMIENTOS

La autora agradece el apoyo de la SECIHTI a través de una beca posdoctoral al cvu 181807. Este manuscrito fue resultado de la colaboración en red con número de referencia LINGG25032 del programa LINGGLOBAL2025.

REFERENCIAS

- Cedeño Quijada, M., Solano, T., Mora, D., y Chen Austin, M. (2022). Evaluación del desempeño de sistemas de ventilación en salones de clase: Estudio numérico en edificios universitarios en Panamá. *Novasinerгия, Revista Digital de Ciencia, Ingeniería y Tecnología*, 5(1), 100-127. <https://doi.org/10.37135/ns.01.09.07>
- Díaz Ruiz, A. N., Arenas Taborda, A., Hoyos Bastidas, O., Ramírez Guerrero, D. F., Niño García, J. P., y García Chaves, M. C. (2022). Dinámica funcional de la comunidad bacteriana del lodo activado de una planta de tratamiento de agua residual y su relación con variables ambientales y de operación. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 24(2), 26-35. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v24n2.101036>
- Gonzalez, V., Peralta, M., Faxas-Guzmán, J., y Frómata, Y. G. (2022). Real-Time Environmental Monitoring Platform for Wellness and Preventive Care in a Smart and Sustainable City with an Urban Landscape Perspective: The Case of Developing Countries. *Land*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/land11101635>
- Hernández Guerrero, J. A. (2020). Valoración del paisaje urbanoambiental de Juriquilla y Santa Rosa Jáuregui, Querétaro, México. *Economía, Sociedad y Territorio*, 20(64), 633-666. <https://doi.org/10.22136/est20201608>
- Kang, M., Yan, Y., Guo, C., Liu, Y., Fan, X., Wargocki, P., y Lan, L. (2024). Ventilation causing an average CO2 concentration of 1,000 ppm negatively affects sleep: A field-lab study on healthy young people. *Building and Environment*, 249(800), 111118. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111118>
- López-Muñoz, E. C., Enríquez, P. L., Saldaña-Vázquez, R. A., Hernández-Morales, F., y Vandame, R. (2022). Diversidad avifaunística y gremios tróficos en tres condiciones diferentes de cobertura vegetal selvática, al sur-

este de Chiapas, México. *Acta Zoológica Mexicana* (N.S.), 1-36. <https://doi.org/10.21829/azm.2022.3812434>

Orlando-Romero, L., Vives-Vergara, A., Valdebenito, R., Cortinez-O’Ryan, A., Baeza, F., y Rasse, A. (2023). “Mi vida va a ser mucho mejor de lo que ha sido”: estudio cualitativo sobre el vínculo entre regeneración de viviendas sociales, calidad de vida y salud. *Cadernos de Saúde Pública*, 39(5). <https://doi.org/10.1590/0102-311xes149822>

Paniagua Rios, J., y Vélez Pliego, F. (2022). Sostenibilidad y gobernanza ambiental. Análisis crítico del discurso de desarrollo sostenible planteado en la política pública sobre calidad del aire en Bogotá (2010-2020). *Trabajo Social*, 24(2), 181-214. <https://doi.org/10.15446/ts.v24n2.98790>

Ramírez Ruiz, J. L., Bustos Fonseca, M. E., Gomez Moyano, J. A., y Jimenez Cazar, B. N. (2024). Análisis de contaminantes atmosféricos como indicadores de la calidad del aire en comercios de insumos químicos agrícolas en el cantón Quevedo, Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(5), 1291-1307. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i5.13552

Robles-Bonilla, T., y Cedano, K. G. (2021). Addressing thermal comfort in regional energy poverty assessment with nussbaumer’s mepi. *Sustainability* (Switzerland), 13(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/su13010352>

Rodríguez Potes, L. M., Osorio Chavez, H., Villadiego Bernal, K. D. C., y Padilla-Llano, S. (2018). Arquitectura y urbanismo sostenible en Colombia. Una mirada al marco reglamentario. *Bitácora Urbano Territorial*, 28(3), 19-26. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v28n3.52051>

Secretaría de Energía (2020). *Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México*.

Sistema Meteorológico Nacional (2020). Climatic conditions. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/normales-climatologicas-por-estado>

- Sun, J., Gui, C., Xiao, Y., Ma, R., Liu, C., He, L., Zhao, H., y Luo, B. (2024). Association between Exposure to Volatile Organic Compounds and the Prevalence of Sleep Problems in US Adults. *Toxics*, 12(3), 1–13. <https://doi.org/10.3390/toxics12030222>
- Uscanga Morales, L. A., y Perevochtchikova, M. (2020). De Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos a Fondos Concurrentes: estudio de percepción social en una comunidad forestal de Oaxaca, México. *Sociedad y Ambiente*, 23, 1-31. <https://doi.org/10.31840/sya.vi23.2161>
- Vallejo-Sanchez, D., Muñoz-García, A., Chaverra-Zuleta, E., Correa-Casas, J., Londoño, L. F., y Bustamante-Rúa, O. (2024). Desarrollo de una Arquitectura IoT para monitoreo ambiental: integración de tecnologías de código abierto con proyección de aplicación en el sector minero. *DYNA*, 91(231), 163-168. <https://doi.org/10.15446/dyna.v91n231.112093>
- Vázquez-Torres, C. E., Quijano-Cetina, R. G., Sánchez-Domínguez, I., y Ali, B. (2024). Potencial de un sistema de bajo costo para medir la calidad ambiental interior en climas extremos latinoamericanos hacia la equidad energética. *Revista Hábitat Sustentable*, 14(2), 76-85. <https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.06>

Derechos de Autor © 2025 Vázquez Torres, Claudia Eréndira; Vargas Soto, Emily;
Bojorquez Morales, Gonzalo.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciente o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Red neuronal artificial para determinar la condición ecofisiológica de los helechos espada a partir de una imagen

Artificial neural network to determine the ecophysiological condition of sword ferns from an image

U. López Hernández^{2*}, E.M. Silva Cruz³, L.F. Barcelos Mendoza⁴

**Autor de correspondencia*

DOI: 10.56643/rcia.v4i2.224

Como citar este artículo: López Hernández et al. (2025). Red neuronal artificial para determinar la condición ecofisiológica de los helechos espada a partir de una imagen. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 4(2). 45-73. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i2.224>

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en analizar diversas técnicas de inteligencia artificial, como mnist, el aumento de datos, dropOut y, principalmente, la red neuronal convolucional (cnn) aplicada al campo de la ecofisiología en helechos. Esta investigación parte de reconocer la necesidad de ocupar herramientas tecnológicas que ayuden a identificar de forma automática el estado de salud de los helechos espada, debido a los cambios climáticos que han tenido lugar en los últimos años, pues han afectado a las especies endémicas de Oaxaca. Se identificó que el análisis de imágenes puede ser clave para detectar signos de estrés o deterioro de la vegetación.

En este artículo se presenta una metodología para el modelado de una red neuronal empleando Python en el entorno de trabajo de Google Colab y utilizando diferentes características para el cálculo de parámetros de las capas convolucionales.

2 Estudiante de Ingeniería de Software y Sistemas Computacionales. Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3628-6079>. Correo de correspondencia: 014430576@ulsaoaxaca.edu.mx

3 Doctor en Electrónica. Docente en Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0496-9682>. Correo electrónico: eric.silva@ulsaoaxaca.edu.mx

4 Maestro en Educación. Docente en Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-650X>. Correo electrónico: ludwig.barcelosme@ulsaoaxaca.edu.mx
Recibido: 23/07/2025 | Aceptado: 09/09/2025 | Publicado: 15/12/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés. .

Ello hace necesaria la implementación de filtros y estructuras propias del aprendizaje profundo, como también explicar cada etapa de la configuración. Los modelos diseñados fueron entrenados mediante un set de datos (*dataset*) de imágenes de helechos con distintos estados de salud, durante la época de estiaje.

Entre los resultados más relevantes se destaca la correcta construcción de una arquitectura de red neuronal, así como la adecuada compilación y ejecución de modelos, lo que permitió alcanzar una precisión de 96% y hace posible replicar y escalar el objetivo de este proyecto. Una de las aportaciones principales de la presente investigación es la integración de la inteligencia artificial como herramienta de apoyo para la realización de estudios ecofisiológicos, lo que puede mejorar el monitoreo del estado de las plantas endémicas de Oaxaca, por ejemplo, el helecho tipo espada, de forma automatizada.

PALABRAS CLAVE: Capas, Ecofisiología, Helecho espada, Inteligencia artificial, Modelos, Red neuronal.

ABSTRACT

This paper focuses on the analysis of various artificial intelligence techniques, such as MNIST, data augmentation, dropOut, and primarily the convolutional neural network (CNN), applied to the field of fern ecophysiology. This research stems from the recognition of the need for technological tools that help automatically identify the health status of sword ferns, especially due to the climate changes that have occurred in recent years and are affecting the endemic species of Oaxaca. It was identified that image analysis can be key to detecting signs of stress or vegetation deterioration.

A methodology is presented for modeling a neural network using Python in the Google Colab framework, applying different features to calculate the parameters of the convolutional layers. The implementation of filters and structures specific to deep learning was necessary, explaining each stage of the configuration. The models were trained using a *dataset* of images taken of ferns in different health states during the dry season.

Among the most significant results, the successful construction of a neural network architecture stands out, as well as the successful compilation and execution of models, achieving an accuracy of 96%, which allows for the replication and scaling of this project's objective. One of the main contributions of this research is the integration of artificial intelligence as a support tool for

ecophysiological studies, improving the automated monitoring of the status of endemic plants in Oaxaca, such as the Sword Fern.

KEYWORDS: Artificial Intelligence, Ecophysiology, Layers, Models, Neural Network, Sword Fern.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha producido un gran avance en el desarrollo de la inteligencia artificial. Según lo expuesto por Villagomez (2025), esta tecnología se ha consolidado como una fuerza innovadora, dando lugar a un impacto significativo en la sociedad. Su capacidad para desarrollar sistemas y ejecutar tareas que antes requerían de habilidades humanas responde, en gran parte, al aumento de la capacidad de procesamiento, al diseño de algoritmos cada vez más sofisticados y a la disponibilidad masiva de datos generados por la humanidad.

Actualmente, la mayoría de las personas hacen uso de la inteligencia artificial al emplear diferentes modelos creados por distintas empresas, como Chatgpt, Copilot, Claude, etc. Cada uno de estos modelos ayudó a las personas a solucionar problemas rápidamente, resolviendo las dudas que surgen en su quehacer diario y, cuando se trata de investigaciones, llegando a un punto en el que es posible resolver en unas cuantas horas el trabajo que antes se elaboraba en días. Un claro ejemplo se evidencia en la educación, como señalan Kroff, Coria y Ferrada (2024); ahora, los docentes universitarios cuentan con la posibilidad de ofrecer retroalimentación inmediata y personalizada a sus estudiantes. Asimismo, el uso de chatbots en los procesos administrativos permite a los alumnos automatizar tareas repetitivas, lo que libera tiempo para que los profesores se enfoquen en labores más estratégicas y orientadas a la enseñanza.

Las redes neuronales constituyen un componente esencial de la inteligencia artificial. De acuerdo con ibm (2021), pueden definirse como modelos computacionales de Machine Learning diseñados para emular la toma de decisiones del cerebro humano. Su funcionamiento se basa en procesos que reproducen la interacción de las neuronas biológicas, permitiéndole identificar patrones, evaluar distintas alternativas y formular conclusiones de manera autónoma.

Un ejemplo claro de cómo la inteligencia artificial ha contribuido significativamente en el ámbito científico se observa en el campo de la ecofisiología. Ejemplo de ello es el caso mencionado en Gole, Bedi, Marwaha, Haque y Kumar (2023), en el que se desarrolló TrIncNet, un Vision Transformer ligero que

logra identificar enfermedades en plantas a partir de imágenes de sus hojas. Dicho modelo fue entrenado con dos tipos de conjuntos de datos de plantas y demostró mayor precisión que otros modelos existentes, haciendo posible clasificar de manera eficiente los síntomas de estrés biótico en las plantas.

Debido a las necesidades ecofisiológicas de la flora endémica oaxaqueña, en la presente investigación se propone el estudio y aplicación de técnicas de inteligencia artificial mencionadas en la bibliografía, que poseen diferentes características y cuyas áreas de aplicación son diversas, para hacer frente a la problemática de cambio climático y la afectación que provoca en la flora de la ciudad de Oaxaca. En este caso, se pretende evaluar el estado de salud y la forma en que se ve afectada la condición ecofisiológica de los helechos espada.

Para alcanzar este propósito, se plantea como objetivo específico analizar distintos tipos de redes neuronales a fin de seleccionar la que mejor se adapte a este proyecto; en este caso se realizarán pruebas iniciales de detección de números que permitan validar el funcionamiento de los modelos, para posteriormente aplicarlos a imágenes de plantas. Con la intención de validar el modelo en plantas, se escogió el helecho espada como especie referente de la flora oaxaqueña, por lo que se creará un *dataset* de imágenes que será entrenado y se evaluará el modelo seleccionado, a fin de que pueda aportar una estimación sobre el estado de salud de las plantas.

El presente proyecto se divide en dos partes; la primera implica la creación de redes neuronales que identifiquen los números 0 al 9 escritos por el ser humano; con estos códigos podremos realizar uno nuevo que nos ayude a identificar la calidad de vida de los helechos espada a partir de ciertas características. En este caso, nosotros, como seres pensantes, ya tenemos el entrenamiento para relacionar figuras y colores, lo que nos permite asignarles un significado, pues desde pequeños, en la escuela o en la vida diaria hemos aprendido a formar diferentes patrones para ir conformando toda nuestra inteligencia; sin embargo, la computadora requiere empezar de cero, mandando una base de datos y diciendo qué proceso tendrá que realizarse a partir de ésta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco teórico

Para iniciar el desarrollo de una red neuronal es necesario establecer las bases de conocimiento, a fin de que pueda entenderse lo que se pretende hacer. En este caso debemos entender en primer lugar qué es inteligencia ar-

tificial (ia). La empresa ibm (2024) refiere que es una herramienta capaz de ayudar a los computadores o a cualquier otra máquina a tener la capacidad de hacer una simulación del aprendizaje humano; ésta comprende la resolución de problemas, la toma de decisiones, la comprensión de diferentes entornos, la creatividad y, especialmente, la autonomía para que ella misma genere sus propias conclusiones. Para ello, con diferentes herramientas, la inteligencia artificial puede lograr grandes cosas, por ejemplo, identificar objetos, aprender de nuevas experiencias, entender el lenguaje humano y tomar decisiones en momentos críticos.

Otro concepto relevante es el Machine Learning, también conocido como aprendizaje automático, el cual constituye una rama fundamental de la inteligencia artificial. En los últimos años, éste ha experimentado un notable crecimiento y reconocimiento debido a la gran cantidad de datos que han surgido; ello hace posible que la computadora identifique patrones respecto a ciertos parámetros y tome una decisión sin la necesidad de que esté programada, mejorando el rendimiento de diferentes procesos, lo que puede resultar en ahorro de tiempo y esfuerzo para los usuarios (Forero-Corba y Forero-Corba, 2024).

Teniendo claridad sobre estos dos conceptos es necesario profundizar en cómo las computadoras pueden llegar a tomar decisiones. Para ello, es necesario simular que opera como si fuera un cerebro humano, por lo que se crean redes neuronales artificiales. Como señalan Castañeda Sánchez, Polo Escobar y Vega Huincho (2023), éstas se han consolidado como una herramienta tecnológica de gran relevancia gracias a su aporte a la resolución de problemas que requieren procesos de aprendizaje, simulando el proceso de aprendizaje que tiene lugar en el cerebro humano. Mediante el uso de algoritmos o de programas informáticos se logra el propósito de que aprendan. Asimismo, los autores mencionan que la parte principal de una red son las neuronas. Una neurona biológica funciona como un sistema encargado de procesar señales y adquirir conocimiento mediante procesos sinápticos. Dichos procesos implican la conexión entre dos o más neuronas, mediante la cual la información es interpretada y tratada por medio de mecanismos electroquímicos.

En cambio, como exponen Garduño, Sagols y Wolf (2025), una neurona artificial, a la que también se puede llamar perceptrón, representa un modelo simplificado de neuronas cerebrales. Éstas no derivaron de estudios neurológicos, sino de nociones básicas sobre las neuronas y de la necesidad de implementarlas en computación. Los perceptrones adoptan la idea de recibir múltiples entradas, procesándolas en cada una de sus terminales de entrada y generando una salida.

Las neuronas pueden organizarse de diferentes formas, dando lugar a diversas arquitecturas de red, también conocidas como topologías, como el perceptrón simple o las redes neuronales multicapa. El perceptrón simple representa la estructura más básica, ya que solamente posee una capa de entrada que se conecta directamente con la salida. Por otro lado, las redes multicapa incorporan una o más capas ocultas ubicadas entre la entrada y salida, lo que permite realizar transformaciones más complejas de la información Vorobioff, Cerrotta, Morel y Amadio (2022).

De acuerdo con Chollet (2021), se han diseñado diversas tecnologías que facilitan el aprendizaje profundo, entre las cuales destaca Keras. Esta api de Deep Learning para Python, construida sobre TensorFlow, proporciona herramientas prácticas para diseñar y entrenar diferentes tipos de modelos, con el objetivo principal de lograr una experimentación más ágil. Keras incluye buenas prácticas que llegan a reducir la complejidad para los usuarios, ofreciendo flujos de trabajo consistentes y sencillos. Actualmente, numerosas empresas y organizaciones como Google, Uber, cern, Netflix y la nasa emplean Keras, aprovechando su flexibilidad y la variedad de patrones de uso que ofrece de manera eficiente y confiable.

Tecnologías por ocupar

La planeación para la realización del proyecto implica, en primer lugar, crear las diferentes redes neuronales y sus respectivos entrenamientos, para verificar la tasa de validación.

La programación se realizó en la plataforma de Google Colab, que ofrece herramientas para hacer entrenamientos de *Machine Learning* y brinda cierta cantidad de almacenamiento y de memoria ram de forma gratuita.

Para realizar nuestra red neuronal nos apoyaremos en TensorFlow, que sirve para el modelado de redes neuronales. A través de la página oficial de TensorFlow (2025) se pueden ver las características básicas que debe tener nuestro sistema; las versiones aceptadas de Python son de la 3.9 a la 3.12; esto debe tomarse en cuenta, ya que si se utiliza una versión de Python diferente, no se podrá instalar TensorFlow y no se podrá ejecutar el programa para realizar las diferentes predicciones.

También se ocuparán las siguientes librerías:

-*numpy*: para realizar operaciones numéricas y manejo de arrays.

-PIL (*Pillow*): para trabajar con imágenes (abrir, convertir, mostrar imágenes, etc.).

-*matplotlib*: para crear gráficos y visualizaciones.

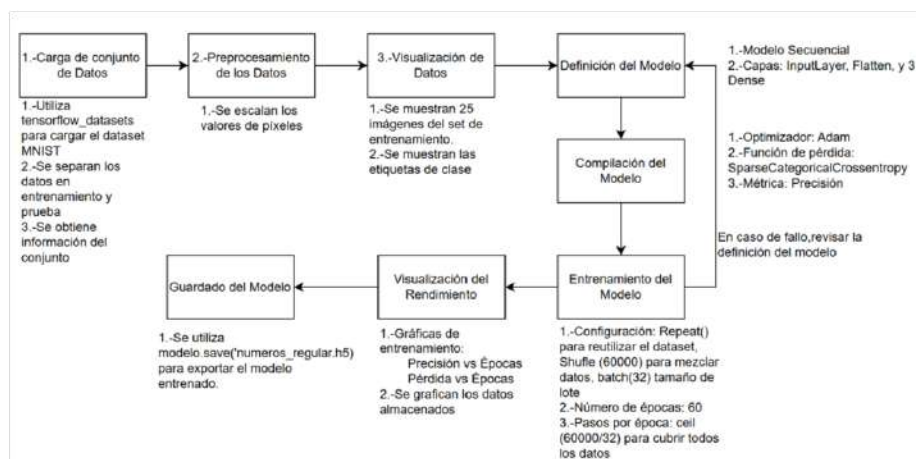
Creación de redes neuronales para la detección de números

Empleando el video Ringa Tech (2021), fue posible desarrollar diferentes redes neuronales capaces de detectar números escritos a mano. Ringa Tech explica tres estilos de desarrollo de redes neuronales: Red Neuronal Regular, Red Neuronal Convolutiva y otra con aumento de datos. Las diferencias entre una y otra estriban en que cada una es mejor que la anterior; la segunda posibilita el manejo de capas, mientras que la última permite realizar diferentes transformaciones a la imagen, por ejemplo, su rotación y traslación, haciendo que la predicción sea más efectiva.

Creación de Red Neuronal Regular

A partir de la primera red neuronal desarrollada, se realizó el diagrama metodológico presentado en la figura 1, que simplifica el entendimiento de la red. En López (Números Red Neuronal Regular, 2025) se puede apreciar todo el código explicado.

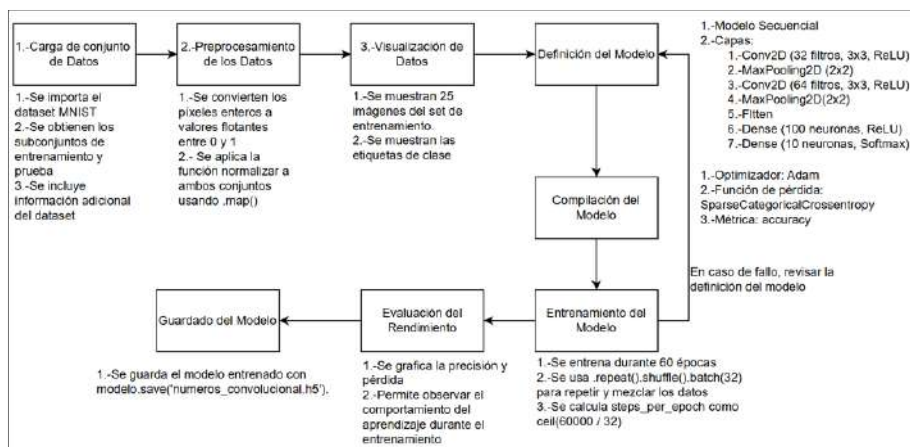
Figura 1. Diagrama metodológico para la creación de una Red Neuronal Regular para detección de números. Fuente: Elaborada por los autores.



Creación de Red Neuronal Convolutacional

Al crear la red neuronal convolutacional se modificó la definición del modelo, agregando más capas, como se puede apreciar en el diagrama metodológico de la figura 2. En López (Números Red Neuronal Convolutacional, 2025) se puede apreciar todo el código realizado.

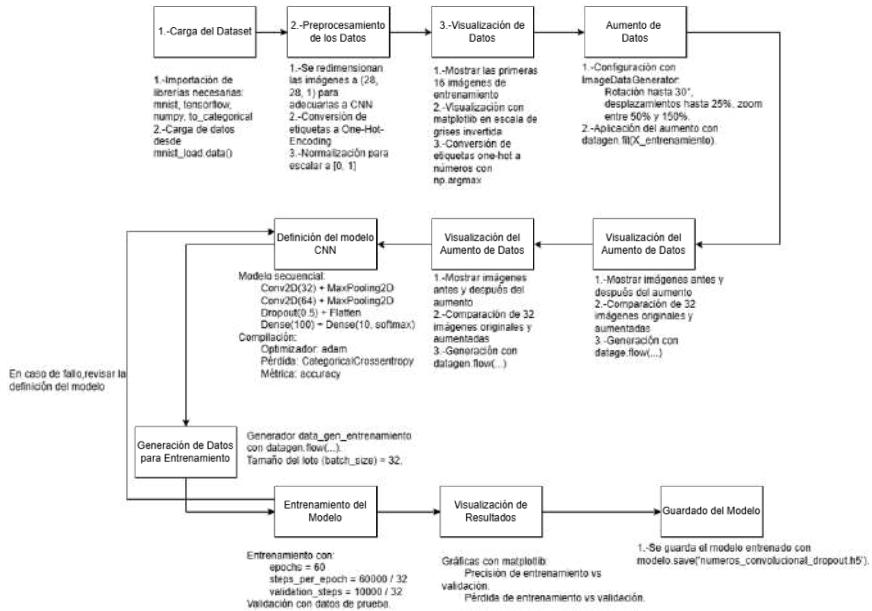
Figura 2. Diagrama metodológico para la creación de una Red Neuronal Convolutacional para detección de números. Fuente: Elaborada por los autores.



Creación de Red Neuronal Convolutacional con aumento de datos y Dropout

Retomando el código de la anterior red neuronal convolutacional, se procedió a agregar características para realizar diferentes transformaciones de las imágenes, por ejemplo, la rotación y la traslación, extendiendo el diagrama metodológico, como puede apreciarse en la figura 3. En López (Números Red Neuronal Convolutacional con Dropout, 2025) se puede ver el código explicado con todas las características implementadas.

Figura 3. Diagrama metodológico para la creación de una Red Neuronal Convolutional con aumento de datos y Dropout. Fuente: Elaborada por los autores



Selección de la planta endémica de Oaxaca

Para diseñar una red neuronal que detecte la salud de una planta endémica de Oaxaca, primero fue necesario elegir entre la gran diversidad existente. A través de diferentes investigaciones se eligió el helecho espada, debido a que, en Oaxaca, como documenta Molfino (2022), existe una riqueza excepcional de helechos, lo que hace que este estado sea un entorno privilegiado para su estudio, ya que alberga a más de 600 especies.

El helecho espada posee características muy particulares de acuerdo con el color de su hoja y su forma. Como menciona Pur Plant (2024), el color de sus hojas dice mucho sobre la salud de la planta; cuando la planta tiene un color muy verde y sus hojas no muestran deformaciones se considera que su estado es muy saludable; si la planta se está tornando amarilla y la forma de sus hojas está cambiando, se considera que se está enfermando; cuando el helecho tiene hojas café o marchitas, se considera que la planta ha muerto, como se aprecia en la figura 4, que muestra la transformación desde el estado saludable al muerto.

Figura 4. Estados de salud de los helechos (PictureThis, 2025; Craftologia, 2025)



Los principales factores que determinan que la planta cambie su estado de salud son el riego incorrecto, el suelo inadecuado, enfermedades y, principalmente, las excesivas temperaturas que se han presentado durante los últimos años.

Creación de *dataset* de fotografías del helecho espada

Después de elegir la planta que se ocuparía, se le tomaron fotos desde diferentes ángulos, con diferentes intensidades de luz y diferentes calidades, para lograr mejorar la capacidad de entrenamiento de nuestra red neuronal. Sólo se consiguieron dos plantas con diferentes estados de salud, saludable y muerta, por lo que, para contar con fotos del helecho enfermo, se recurrió a internet.

El *dataset* se cargó en la plataforma de almacenamiento Google Drive, que puede encontrarse en López, *Dataset de fotografías del helecho espada* (2025), clasificado en carpetas de acuerdo con el estado de salud.

Helecho enfermo: en la figura 5 se puede observar la carpeta en la que están almacenadas las imágenes del helecho, existiendo un total de 99 fotografías.

Helecho saludable: en la figura 6 se muestra la carpeta del helecho saludable, del cual se tomaron 373 fotografías.

Helecho muerto: en la figura 7 se muestra la carpeta del helecho muerto, del cual se tomaron 707 fotografías.

Figura 5. Fotografías del helecho espada enfermo. Fuente: Elaborada por los autores

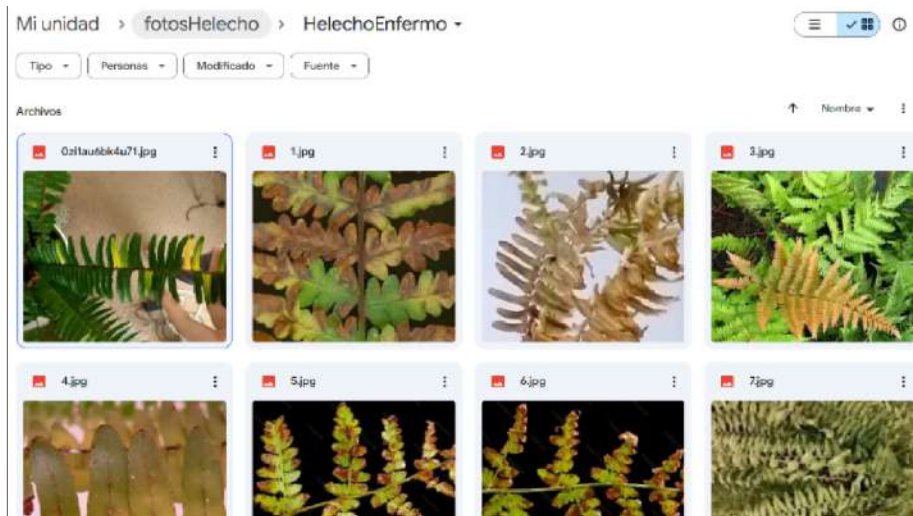


Figura 6. Fotografías del helecho espada muerto. Fuente: Elaborada por los autores

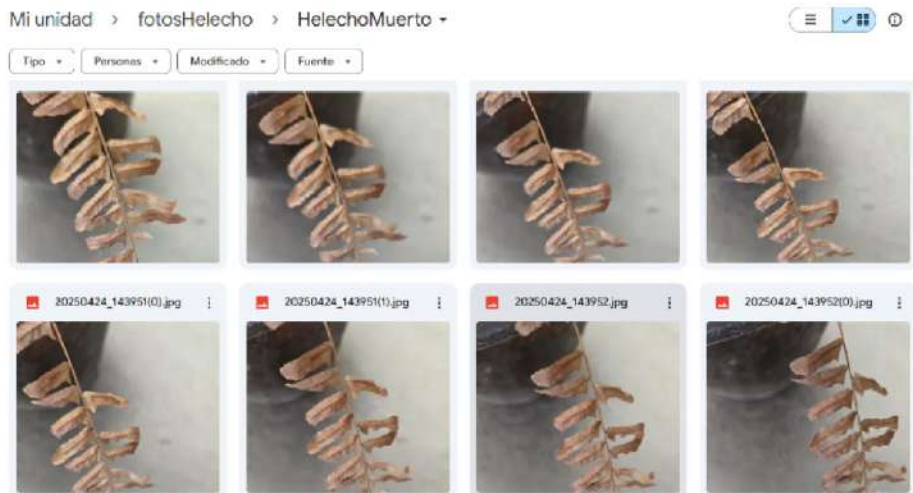
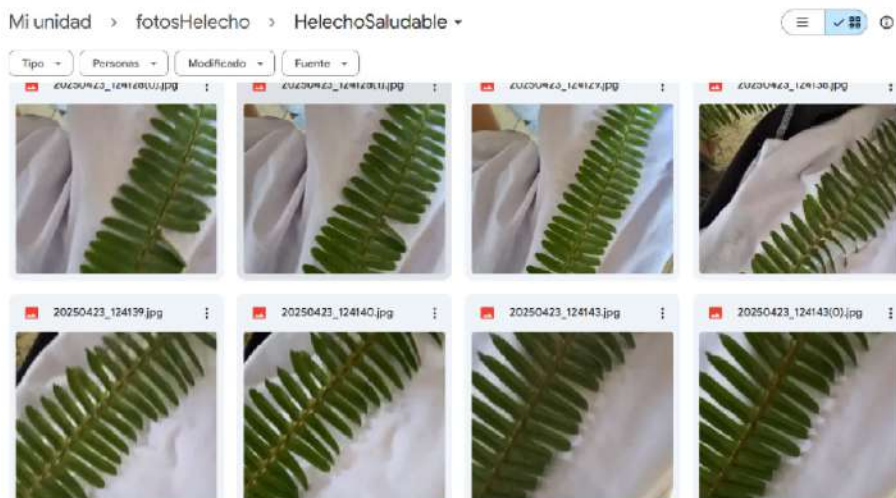


Figura 7. Fotografías del helecho espada saludable. Fuente: Elaborada por los autores



Creación de Red Neuronal Convolutiva para la detección de la salud de los helechos

A partir del análisis previo, se propone la creación de una red neuronal para la detección de la salud de los helechos espada. En este caso se decidió implementar una Red Neuronal Convolutiva, ya que el aumento del número de capas posibilita una mayor capacidad de aprendizaje y una mejor flexibilidad en comparación con una Red Neuronal Regular, que funciona mejor con datos tabulares. Esto responde a que, al trabajar con imágenes, es necesario tomar en cuenta la posición y los patrones de los píxeles, lo que hace que el aprendizaje computacional sea más eficiente.

Esta red fue alimentada con imágenes organizadas en tres categorías, helechos saludables, helechos enfermos y helechos muertos. Las imágenes fueron recolectadas y clasificadas manualmente y almacenadas en Google Drive para su acceso desde el entorno de Google Colab.

1.-Preprocesamiento de imágenes y aumento de datos

Para realizar el preprocesamiento de las imágenes, se empleó la clase `ImageDataGenerator` proporcionada por Keras, incluyendo:

Normalización de los píxeles a un rango [0,1]

Aumento de datos mediante transformaciones aleatorias

Rotaciones de hasta 30°

Desplazamientos horizontales y verticales

Escalamiento con zoom

Volteo horizontal

División del conjunto de datos en entrenamiento (80%) y validación (20%) mediante el parámetro `validation_split`

Se ajustaron las dimensiones de las imágenes a 224x224 píxeles y se las organizó en lotes de 32.

2.-Visualización de datos

Para verificar la correcta lectura y etiquetado de las imágenes cargadas, se implementó una función que muestra las imágenes de cada clase con su respectiva etiqueta, permitiendo observar la diversidad de los datos.

3.-Arquitectura del modelo

El modelo cnn fue construido secuencialmente, con la siguiente arquitectura:

Entrada: imágenes rgb de 224x224x3 píxeles.

Capas convolucionales y de pooling

Conv2D con 32 filtros y MaxPooling2D

Conv2D con 64 filtros y MaxPooling2D

Conv2D con 128 filtros y MaxPooling2D

Regularización: Dropout de 50% después de la última capa convolucional y la capa densa intermedia.

Capas densas finales:

Una capa Dense con 128 neuronas (ReLU)

Una capa Dense con tres salidas y la aplicación de la función *softmax* para la clasificación en escenarios multiclase

4.-Compilación

El modelo se compiló utilizando el optimizador Adam

Se empleó la función de pérdida categorical crossentropy (apropiada para clasificación multiclase con one-hot encoding)

La métrica utilizada para evaluar el modelo fue la precisión (accuracy)

5.-Entrenamiento

Se realizó durante 30 épocas, utilizando el generador de datos con aumento para el conjunto de entrenamiento

Generador normalizado para el conjunto de validación

6.-Evaluación del modelo

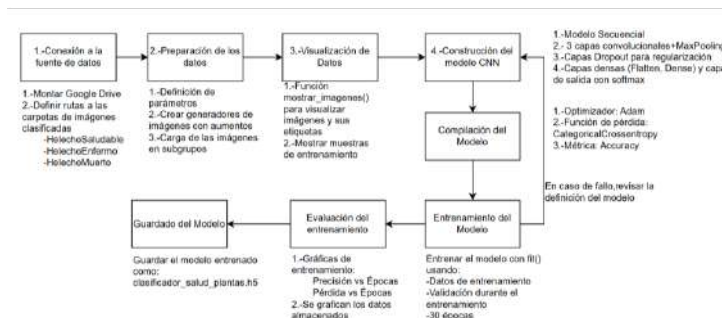
Se representaron gráficamente las curvas de precisión y de pérdida correspondientes al entrenamiento y validación, con el propósito de analizar el rendimiento del modelo a lo largo de las épocas.

7.-Guardado del modelo

El modelo se guarda en formato HDF5, el cual permite su posterior carga y reutilización sobre nuevos datos de helechos.

A continuación, en la figura 8 se puede apreciar el diagrama metodológico y en López (Detector de salud de helechos espada, 2025) se puede encontrar el código creado.

Figura 8. Diagrama metodológico del primer modelo de detección de salud en helechos. Fuente: Elaborada por los autores.



Creación de Red Neuronal Convolutiva mejorada a partir de la aplicación de filtros a las imágenes

A raíz de que existen áreas de mejora en el anterior código expuesto, se implementó la aplicación de diferentes filtros a la imagen para que tuviera un mejor desempeño al momento de predecir.

1.-Montaje del entorno y adquisición de datos

Se realizó la misma configuración que en el caso del anterior código explicado.

2.-Preprocesamiento de datos

Se establecieron dimensiones de 224x224 píxeles, acordes a las necesidades del modelo MobileNetV2. A continuación, se aplicó un preprocesamiento dual:

Se normalizaron las imágenes, estableciendo un rango de píxel de [0, 1]

Se transformaron las imágenes del espacio rgb al espacio hsv (Matiz, Saturación, Valor), más adecuado para el análisis de vegetación. Además, se calcularon histogramas normalizados de cada canal, generando un vector de características por imagen. Este vector de características puede ser útil para futuras tareas de análisis.

3.-Aumento de datos

Para optimizar la capacidad de generalización del modelo o mitigar el sobreajuste ocasionado por el tamaño reducido de datos, se aplicó un aumento de datos.

Rotaciones aleatorias (hasta 30°)

Desplazamientos horizontales y verticales (hasta 25%)

Zooms variables (0.5-1.5)

Inversión horizontal

Alteraciones en el brillo (0.7-1.3)

4.-Visualización y análisis exploratorio

Se implementó una función de visualización que, para un subconjunto de imágenes, muestra tanto la imagen original como sus canales hsv individuales. Esto facilitó el análisis visual de patrones de color y de degradación foliar asociada con las clases enfermas y muertas.

5.-Arquitectura del modelo

Para el núcleo del modelo se utilizó MobileNetV2, una red convolucional ligera preentrenada en ImageNet, la cual ayuda a los dispositivos cuyos recursos son limitados. Se empleó la arquitectura sin su capa de clasificación final (include_top=False), utilizando sus características internas como extractor de rasgos de forma y textura.

Las capas superiores del modelo fueron adaptadas con:

Una capa de GlobalAveragePooling2D para reducir dimensionalidad

Dos bloques Dense + *BatchNormalization* + *Dropout* para agregar capacidad de aprendizaje específica:

256 unidades (para integrar características visuales generales)

128 unidades (enfocadas en detalles más finos)

Capa de salida compuesta por tres neuronas con función de activación *softmax*, diseñada para realizar clasificación multiclase.

Las primeras 100 capas del modelo base se congelaron para preservar los patrones visuales básicos previamente aprendidos.

6.-Compilación

Se compiló utilizando el optimizador Adam y la función de pérdida categorical crossentropy, apropiada para tareas de clasificación multiclase con etiquetas codificadas mediante el esquema one-hot.

Durante el entrenamiento se utilizaron dos callbacks

Early stopping: interrumpe el entrenamiento cuando la pérdida en validación deja de mejorar después de cinco épocas consecutivas.

ReduceLRonPlateau: disminuye la tasa de aprendizaje si el modelo no mejora durante tres épocas consecutivas

7.-Entrenamiento

El entrenamiento se llevó a cabo durante un máximo de 30 épocas, empleando lotes de 32 imágenes.

8.-Evaluación del entrenamiento

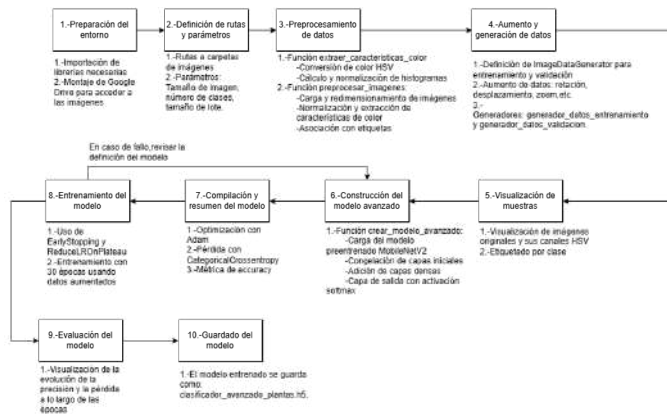
Se muestra un gráfico que da cuenta de la precisión y de la pérdida en los conjuntos de entrenamiento y validación.

9.-Guardado del modelo

Por último, el modelo entrenado fue guardado en formato hdf5, para permitir su reutilización o integración en sistemas de predicción.

A continuación, en la figura 9 se puede apreciar el diagrama metodológico y en López (Detector de salud de helechos espada mejorado, 2025) se encontrará el código realizado.

Figura 9. Diagrama metodológico del segundo modelo de detección de salud en helechos.
Fuente: Elaborada por los autores.



RESULTADOS

La creación de redes neuronales para el reconocimiento de números permitió identificar el modelo que mejor se adapta a las necesidades de esta investigación. Se seleccionó la Red Neuronal Convolutiva, debido a su capacidad para detectar patrones incluso en datos que no se encuentran explícitamente en el conjunto de entrenamiento.

En este caso, se eligió al helecho espada, una planta representativa de la flora oaxaqueña que presenta características particulares en sus distintos estados ecofisiológicos. Estos estados se reflejan directamente en el color y la forma de sus hojas, lo que facilitó su análisis e identificación.

Para el entrenamiento se recopilaron 1 179 fotografías, que fueron clasificadas en tres categorías: saludable, enferma y muerta. Además, las imágenes se tomaron con distintas calidades, con el objetivo de que la red fuera capaz de reconocerlas sin importar la resolución o las condiciones de captura.

Finalmente, se construyó la Red Neuronal Convolutiva, incorporando como principales variables la detección de color y la morfología de las hojas, a fin de garantizar un modelo para la identificación de los estados de la planta.

Red Neuronal Convolutiva (primera versión)

Cuando se empezó a ejecutar, la primera red neuronal convolutiva pudo cargar exitosamente las imágenes y etiquetarlas en los tres distintos tipos previstos (saludable, enferma, muerta). Asimismo, en este caso se agregó una función para visualizar cómo se etiquetaban las imágenes, lo que se aprecia en la figura 10; además, éstas se normalizaron a cierto tamaño con algunas transformaciones.

Figura 10. Fotografías de los helechos correctamente cargadas y etiquetadas. Fuente: Elaborada por los autores



Posteriormente se hizo la compilación del modelo, por lo que la plataforma nos devolvió un resumen que muestra una descripción detallada de la arquitectura de la red neuronal convolucional construida. La tabla incluye información sobre cada capa del modelo, como el tipo, el tamaño de la capa de salida y la cantidad de parámetros entrenables, como se aprecia en la figura 11.

Layer (Type): indica el nombre y el tipo de la capa

Output Shape: da cuenta de la forma de los datos que salen en cada capa. Por ejemplo, None, 111, 111, 32 indica que esa capa produce un volumen de salida de 111x111 píxeles con 32 filtros o canales. None indica que el tamaño del lote (batch size) es variable.

Param # (Parámetros): es el número total de parámetros entrenables en esa capa. Para una capa Conv2D, se calcula:

$$(\text{filtro}_{\text{ancho}} * \text{filtro}_{\text{alto}} * \text{canales}_{\text{entrada}} + 1) * \text{número}_{\text{de filtros}}$$

Donde + 1 representa al término de sesgo (bias)

Al final se presenta un resumen global del modelo:

Total params: representa la suma de todos los parámetros del modelo, tanto los entrenables como los no entrenables

Trainable params: son aquellos parámetros que se modifican y optimizan durante el proceso de entrenamiento

Non-trainable params: son los parámetros que se mantienen fijos, generalmente por capas congeladas

Figura 11. Resumen de la compilación del primer modelo. Fuente: Elaborada por los autores.

Model: "sequential"

Layer (type)	Output Shape	Param #
conv2d (Conv2D)	(None, 222, 222, 32)	896
max_pooling2d (MaxPooling2D)	(None, 111, 111, 32)	0
conv2d_1 (Conv2D)	(None, 109, 109, 64)	18,496
max_pooling2d_1 (MaxPooling2D)	(None, 54, 54, 64)	0
conv2d_2 (Conv2D)	(None, 52, 52, 128)	73,856
max_pooling2d_2 (MaxPooling2D)	(None, 26, 26, 128)	0
dropout (Dropout)	(None, 26, 26, 128)	0
flatten (Flatten)	(None, 86528)	0
dense (Dense)	(None, 128)	11,875,712
dropout_1 (Dropout)	(None, 128)	0
dense_1 (Dense)	(None, 3)	387

Total params: 11,169,347 (42.61 MB)
 Trainable params: 11,169,347 (42.61 MB)
 Non-trainable params: 0 (0.00 B)

Después empezó el entrenamiento, que concluyó satisfactoriamente, como se puede observar en la figura 12, llegando a las 30 épocas con una exactitud de 97%.

Figura 12. Entrenamiento del primer modelo concluido satisfactoriamente. Fuente: Elaborada por los autores.

```

Epoch 25/30
30/30 ----- 143s 5s/step - accuracy: 0.9804 - loss: 0.0884 - val_accuracy: 0.9828 - val_loss: 0.0536
Epoch 26/30
30/30 ----- 140s 5s/step - accuracy: 0.9894 - loss: 0.0414 - val_accuracy: 0.9612 - val_loss: 0.0736
Epoch 27/30
30/30 ----- 159s 5s/step - accuracy: 0.9798 - loss: 0.0772 - val_accuracy: 0.9267 - val_loss: 0.1462
Epoch 28/30
30/30 ----- 149s 5s/step - accuracy: 0.9717 - loss: 0.0966 - val_accuracy: 0.9612 - val_loss: 0.0930
Epoch 29/30
30/30 ----- 138s 5s/step - accuracy: 0.9725 - loss: 0.0838 - val_accuracy: 0.9569 - val_loss: 0.1045
Epoch 30/30
30/30 ----- 141s 5s/step - accuracy: 0.9798 - loss: 0.0740 - val_accuracy: 0.9784 - val_loss: 0.0703
    
```

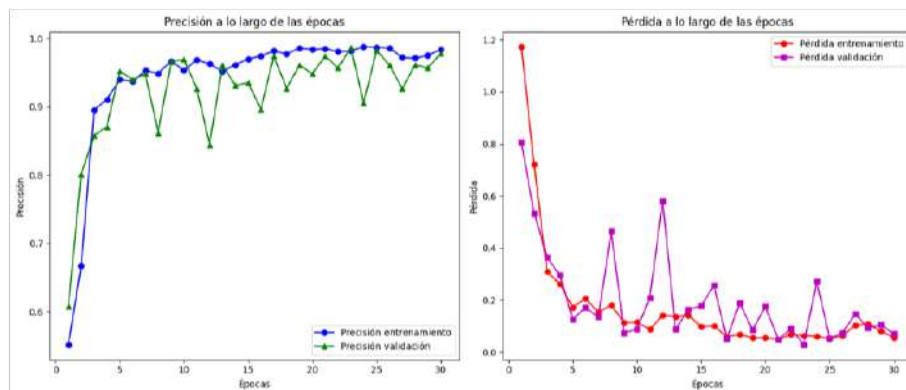
Por último, en la figura 13 se muestran dos gráficas que comparan la precisión y la pérdida a lo largo de las épocas del entrenamiento. Se observa que, aunque en general la precisión va en aumento y la pérdida tiende a disminuir, existen algunos picos irregulares. Estos picos indican que, durante algunas épocas, en el modelo no se generalizó correctamente, lo que puede deberse a varios factores:

Sobreajuste: el modelo aprende detalles propios del conjunto de entrenamiento que no se presentan en los datos de validación.

Complejidad del conjunto de datos: la alta variabilidad entre las imágenes puede dificultar que el modelo aprenda

Tamaño del *dataset*: conjunto de datos pequeños o balanceados (Google for Developers, 2025)

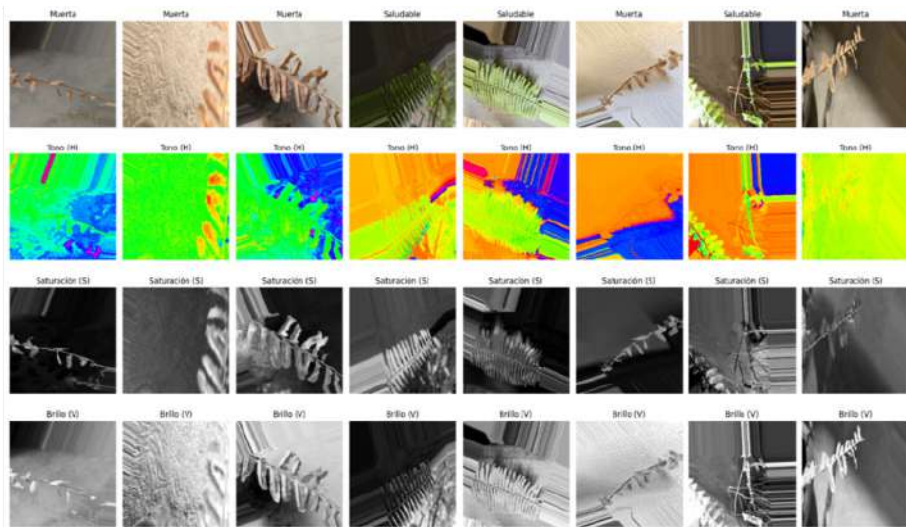
Figura 13. Gráfica de precisión y pérdida durante el entrenamiento del primer modelo.
Fuente: Elaborada por los autores.



Red Neuronal Convolutiva Mejorada

En el caso anterior se pudo apreciar que hubo picos irregulares durante el entrenamiento, por lo que se mejoró el código para que detectara más características a fin de definir mejor la curva de precisión y la de pérdida. Tras recuperar nuevamente las imágenes, se las transformó al canal hsv, como se puede apreciar en la figura 14, que muestra ejemplos de fotografías en sus diferentes canales.

Figura 14. Fotografías de helechos en canales HSV. Fuente: Elaborada por los autores.



La compilación del modelo se realizó en un modelo funcional, retomando la arquitectura basada en MobileNetV2 preentrenada sobre ImageNet. La tabla que muestra el resumen incluye información sobre cada capa del modelo, como el tipo, la dimensión de salida, la cantidad de parámetros entrenables y la capa a la que se encuentra conectada, como se aprecia en la figura 15.

En la tabla se pueden ver las siguientes columnas:

Layer (Type): nombre de la capa y tipo

Output Shape: la forma del tensor de salida que genera esa capa

Param #: números de parámetros entrenables (y no entrenables) en la capa

Connected to: qué capa entrega su salida como entrada a esta capa

Al final se presenta un resumen global del modelo:

Total params: es el total de parámetros entrenables y no entrenables del modelo

Trainable params: son los parámetros que se ajustan durante el entrenamiento

Non-trainable params: son los parámetros que se mantienen fijos, generalmente por capas congeladas

Figura 15. Resumen de la compilación del segundo modelo. Fuente: Elaborada por los autores.

Layer (type)	Output Shape	Params #	Connected to			
input_layer (InputLayer)	(None, 224, 224, 3)	0	-	block_16_project (Conv2D)	(None, 7, 7, 320)	307,200
Conv1 (Conv2D)	(None, 112, 112, 32)	368	input_layer[0][0]	block_16_project_BN (BatchNormalizati...	(None, 7, 7, 320)	1,280
bn_Conv1 (BatchNormalizati...	(None, 112, 112, 32)	0	Conv1[0][0]	Conv_1 (Conv2D)	(None, 7, 7, 1280)	488,600
Conv2_relu (Conv2D)	(None, 56, 56, 32)	8	bn_Conv1[0][0]	Conv_1_bn (BatchNormalizati...	(None, 7, 7, 1280)	5,120
expanded_conv_dept... (DepthwiseConv2D)	(None, 56, 56, 32)	384	Conv2_relu[0][0]	out_relu (ReLU)	(None, 7, 7, 1280)	0
expanded_conv_dept... (BatchNormalizati...	(None, 56, 56, 32)	0	expanded_conv_dept...	global_average_poo... (GlobalAveragePool...	(None, 1280)	0
expanded_conv_dept... (Conv2D)	(None, 56, 56, 32)	128	expanded_conv_dept...	dense (Dense)	(None, 256)	327,856
expanded_conv_dept... (BatchNormalizati...	(None, 56, 56, 32)	0	expanded_conv_dept...	batch_normalization (BatchNormalizati...	(None, 256)	1,824
block_1_expand (Conv2D)	(None, 112, 112, 32)	1,280	expanded_conv_dept...	dropout (Dropout)	(None, 256)	0
block_1_expand_BN (BatchNormalizati...	(None, 112, 112, 32)	0	block_1_expand[0][0]	dense_1 (Dense)	(None, 128)	32,896
block_1_expand_relu (ReLU)	(None, 112, 112, 32)	8	block_1_expand_BN[0][0]	batch_normalizatio... (BatchNormalizati...	(None, 128)	512
block_1_pool (MaxPooling2D)	(None, 56, 56, 32)	0	block_1_expand_relu[0][0]	dropout_1 (Dropout)	(None, 128)	0
block_1_depthwise... (DepthwiseConv2D)	(None, 56, 56, 32)	384	block_1_pool[0][0]	dense_2 (Dense)	(None, 3)	387
block_1_depthwise... (BatchNormalizati...	(None, 56, 56, 32)	0	block_1_depthwise...	Total params: 3,620,739 (10.80 MB) Trainable params: 2,223,479 (8.48 MB) Non-trainable params: 357,312 (1.52 MB)		
block_1_depthwise... (Conv2D)	(None, 56, 56, 32)	8	block_1_depthwise...			
block_1_project	(None, 56, 56, 32)	3,384	block_1_depthwise...			

Posteriormente se realizó el respectivo entrenamiento, como se muestra en la figura 16, no generándose ningún tipo de error y llegando a una exactitud de 96%.

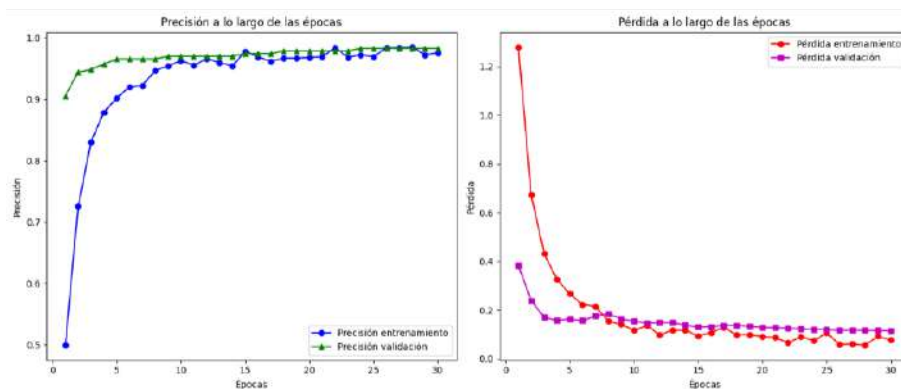
Figura 16. Entrenamiento del segundo modelo concluido satisfactoriamente. Fuente: Elaborada por los autores.

```

Epoch 1/100: 239s 8s/step - accuracy: 0.4700 - loss: 0.3289 - val_accuracy: 0.9530 - val_loss: 0.2282 - learning_rate: 1.0000e-04
Epoch 5/100: 235s 8s/step - accuracy: 0.9017 - loss: 0.2731 - val_accuracy: 0.9573 - val_loss: 0.2063 - learning_rate: 1.0000e-04
Epoch 6/100: 234s 8s/step - accuracy: 0.9396 - loss: 0.1653 - val_accuracy: 0.9487 - val_loss: 0.2785 - learning_rate: 1.0000e-04
Epoch 7/100: 232s 8s/step - accuracy: 0.9385 - loss: 0.1675 - val_accuracy: 0.9487 - val_loss: 0.2818 - learning_rate: 1.0000e-04
Epoch 8/100: 229s 7s/step - accuracy: 0.9516 - loss: 0.1579 - val_accuracy: 0.9487 - val_loss: 0.3061 - learning_rate: 1.0000e-04
Epoch 9/100: 230s 8s/step - accuracy: 0.9035 - loss: 0.1357 - val_accuracy: 0.9530 - val_loss: 0.2362 - learning_rate: 5.0000e-05
Epoch 10/100: 217s 7s/step - accuracy: 0.9632 - loss: 0.1188 - val_accuracy: 0.9530 - val_loss: 0.2018 - learning_rate: 5.0000e-05
    
```

Tras los cambios realizados, la figura 17 muestra que la gráfica registra una curvatura sin tanta irregularidad; ello permite inferir que el modelo está recibiendo datos consistentes y bien preprocesados.

Figura 17. Gráficas de precisión y de pérdida durante el entrenamiento del segundo modelo. Fuente: Elaborada por los autores.



CONCLUSIONES

Este trabajo permitió integrar conceptos teóricos y prácticos de la inteligencia artificial para aplicaciones en el ámbito de la ecofisiología, específicamente en la evaluación del estado de salud de los helechos espada, mediante la creación de una red neuronal convolucional. Partiendo de los primeros modelos creados para la detección de números (mnist), se logró adaptar esta metodología al reconocimiento de patrones en imágenes de plantas de manera de realizar su monitoreo.

En el modelo desarrollado fue necesario construir un *dataset* con imágenes de la planta que escogimos para representar a la flora oaxaqueña, el helecho espada. Se recopilaron 1 179 imágenes, utilizadas para el entrenamiento de la red neuronal.

En el caso de los helechos enfermos, el número de imágenes disponibles fue reducido, porque las mismas tuvieron que obtenerse de internet al no contar con ejemplares en esa condición. En contraste, para los demás estados se disponía de la planta físicamente, por lo que se tomaron fotografías propias desde distintos ángulos y con diversas calidades. Esta estrategia permitió que la red neuronal aprendiera a reconocer la planta en diferentes condiciones y con diversas características visuales.

El primer modelo de red neuronal se basó en una arquitectura secuencial sencilla y un conjunto limitado de imágenes, logrando alcanzar una precisión

de validación de 97%. Sin embargo, se observaron irregularidades durante el entrenamiento, reflejadas en las gráficas en que se visualizan la pérdida y la precisión; esto responde, sobre todo, a la cantidad limitada de datos, su variabilidad y la presencia de posibles sesgos en el conjunto de entrenamiento. Además, se identificó que, ante imágenes no contenidas en el *dataset*, el modelo podía generar predicciones erróneas, lo cual enfatiza la necesidad de contar con un *dataset* limpio y balanceado.

Las limitantes de la primera red neuronal llevaron a implementar el análisis de color hsv, lo que permitió extraer características más representativas de las imágenes, especialmente en los aspectos relacionados con el color y la iluminación. Esta mejora redujo las irregularidades observadas durante el entrenamiento, logrando una precisión de 96%, con mayor estabilidad y generalización.

Asimismo, el cambio de la arquitectura secuencial a un modelo funcional hizo posible una mayor versatilidad en el diseño estructural de la red, lo que ayudó a la adaptación del modelo. Además, esta modificación facilitó la incorporación de múltiples entradas o ramas en futuras versiones.

PRÓXIMOS AVANCES

Como próximas mejoras a este proyecto se estará realizando el diseño de una interfaz que permita ocupar los entrenamientos realizados para predecir la calidad de vida de la planta; además, se podrá mejorar el código y el *dataset* para que sea capaz de determinar con mayor exactitud.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación, Desarrollo e Innovación-GI+D+i Aplicaciones steam de la Universidad La Salle Oaxaca, por su colaboración y respaldo en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Castañeda Sánchez, W. A., Polo Escobar, B. R., y Vega Huincho, F. (2023). Redes neuronales artificiales: una medición de aprendizajes de pronósticos como demanda potencial. *Universidad, Ciencia y Tecnología*, 27(118), 51-60. doi:<https://doi.org/10.47460/uct.v27i118.686>
- Chollet, F. (2021). *Deep Learning with Python*. MANNING. ISBN: 9781617296864
- Craftologia (2025). *Helecho enfermo [imagen]*. Obtenido de Craftologia: <https://www.craftologia.com/tips/hogar/jardineria/como-quitar-el-hongo-de-un-helecho-sin-marchitarlo>
- Forero-Corba, W., y Forero-Corba, W. (2024). Técnicas y aplicaciones del Machine Learning e Inteligencia Artificial en educación: una revisión sistemática. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia*, 27(1), 209-253. doi:<https://doi.org/10.5944/ried.27.1.37491>
- Garduño Alvarado, T., Sagols Troncoso, F., y Wolf, G. (2025). Las neuronas artificiales y su papel central en la inteligencia artificial. *CViencia*, 76(1), 68-75. Obtenido de https://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/76_1/PDF/13_76_1_1582_NeuronasArtificiales.pdf
- Gole, P., Bedi, P., Marwaha, S., Haque, A., y Kumar, C. (2023). TrIncNet: a lightweight vision transformer network for identification of plant diseases. *Frontiers in Plant Science*, 14. doi:<https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1221557>
- Google for Developers (2025). Sobreajuste: Interpretación de curvas de pérdida. Obtenido de Conceptos de AA: <https://developers.google.com/machine-learning/crash-course/overfitting/interpreting-loss-curves?hl=es-419>
- IBM (2021). *¿Qué son las redes neuronales?* Obtenido de ibm: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/neural-networks>
- IBM (2024). *¿Qué es la inteligencia artificial (IA)?* Obtenido de ibm: <https://www.ibm.com/mx-es/think/topics/artificial-intelligence>

- Kroff, F., Coria, D., y Ferrada, C. (2024). Inteligencia Artificial en la educación universitaria: Innovaciones, desafíos y oportunidades. *Revista Espacios*, 45(5), 120-135. doi:<https://doi.org/10.48082/espacios-a24v45n05p09>
- López, U. (2025). *Dataset de fotografías del helecho espada*. Obtenido de Google Drive: <https://drive.google.com/drive/folders/1SIJ7wtH42b97UZn0iy-IDp-mCRvdEXIbZ?usp=sharing>
- López, U. (2025). *Detector de salud de helechos espada*. Obtenido de Google Colab: https://colab.research.google.com/drive/16ShNUuKSG_3kKMqlkFwbYnd-nVmJZDvCJ?usp=sharing
- López, U. (2025). *Detector de salud de helechos espada mejorado*. Obtenido de Google Colab: <https://colab.research.google.com/drive/1jrvORMeuNI8F-BUY-nUnygE3qrigyORs9?usp=sharing>
- López, U. (2025). *Números Red Neuronal Convolutiva*. Obtenido de Google Colab: <https://colab.research.google.com/drive/17CSsuN5NjWDsKrR9IU-oZSkSOL-nM3eKN?usp=sharing>
- López, U. (2025). *Números Red Neuronal Convolutiva con Dropout*. Obtenido de Google Colab: https://colab.research.google.com/drive/1gmW_f3uym-M7ce_aaaQ4XLIYbRQBOENxG?usp=sharing
- López, U. (2025). *Números Red Neuronal Regular*. Obtenido de Google Colab: <https://colab.research.google.com/drive/1DKUKTabHyPFSIIRNhjW69Z-0JMv6UxafW?usp=sharing>
- Molfino, F. (2022). Oaxaca, el destino menos imaginado donde abundan los helechos. Obtenido de Travesías: <https://www.travesiasdigital.com/destinos/mexico/el-universo-oaxaqueno-que-fascino-a-oliver-sacks/>
- PictureThis (2025). Helecho espada [imagen]. Obtenido de PictureThis: https://www.picturethisai.com/es/care/Nephrolepis_exaltata.html
- Pur Plant. (2024). Problemas comunes en plantas helechos. Obtenido de Pur Plant: <https://www.purplant.es/guia-problemas-plantas/helecho/?srsltid=AfmBOoq-Z4MDi5q9kqC6p6yZzxXr9uslMEGu-0qskbzOqu6VvAoxw- ma>

Ringa Tech (2021). *Redes Neuronales Convolucionales - Clasificación avanzada de imágenes con IA / ML (cnn)* [Video]. Obtenido de YouTube: <https://www.youtube.com/watch?v=4sWhhQwHqug&list=LL&index=7&t=1275s>

TensorFlow (2025). *Instalar TensorFlow con pip*. Obtenido de TensorFlow: <https://www.tensorflow.org/install/pip?hl=es>

Villagomez Palacios, A. H. (2025). El impacto de la Inteligencia Artificial en la Sociedad: Una Revisión Sistemática de su Influencia en Ámbitos Sociales, Económicos y Tecnológicos. *Ciencia Latina*, 9(1), 8150-8172. doi:https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16468

Vorobioff, J., Cerrotta, S., Morel, N. E., y Amadio, A. (2022). *Inteligencia Artificial y Redes Neuronales: Fundamentos, Ejercicios y Aplicaciones con Python y Matlab*. edUTecNe. ISBN 978-987-4998-82-8

Derechos de Autor© 2025 López Hernández, Uziel; Silva Cruz, Eric Mario; Barcelos Mendoza, Ludwig Federico.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Clasificación del estado de salud de la Lantana camara mediante redes neuronales y extracción de características

Health status classification of Lantana camara through neural networks and feature extraction

J.A. Celaya Ramírez^{1*}, E.M. Silva Cruz², L.F. Barcelos Mendoza³

**Autor de correspondencia*

DOI: 10.56643/rcia.v4i2.229

Como citar este artículo: Celaya Ramírez et al. (2025). Clasificación del estado de salud de la Lantana camara mediante redes neuronales y extracción de características. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 4(2). 74-96. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i2.229>

RESUMEN

El cambio climático ha alterado significativamente los patrones de desarrollo y los ciclos de vida de diferentes especies vegetales, tanto a nivel regional como mundial. En la región de los Valles Centrales de Oaxaca se carece de herramientas tecnológicas que permitan evaluar objetivamente el estado de salud de Lantana camara, especie nativa de la región, lo que limita el desarrollo de estrategias de conservación basadas en evidencia. La evaluación tradicional depende de observaciones visuales subjetivas, las cuales pueden llegar a ser inconsistentes y difícilmente escalables para el monitoreo continuo requerido en este contexto. Para abordar esta problemática, se desarrolló un sistema automatizado de clasificación del estado de salud de la Lantana camara empleando redes neuronales. La metodología consistió en extraer 181 características numéricas por imagen: 180 valores del histograma de tonos del modelo hsv y un valor de diámetro de inflorescencia obtenido mediante segmentación automática con OpenCV. Estas características fueron procesadas en una red neuronal tipo perceptrón multicapa (mlp) con arquitectura de tres capas ocultas (256, 128, 64 neuronas con activación ReLU) y capa de salida

1 Estudiante de Ingeniería de Software y Sistemas Computacionales. Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3628-6079>. Correo de correspondencia: 014431233@ulsaoaxaca.edu.mx

2 Doctor en Electrónica. Docente en Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0496-9682>. Correo electrónico: eric.silva@ulsaoaxaca.edu.mx

3 Maestro en Educación. Docente en Grupo GIDi de aplicaciones STEAM, Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0285-650X>. Correo electrónico: ludwig.barcelosme@ulsaoaxaca.edu.mx

Recibido: 16/08/2025 | Aceptado: 03/10/2025 | Publicado: 15/12/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

softmax, clasificando cuatro estados: florecimiento pleno, cambio de flores, palidez por falta de luz y planta seca. El entrenamiento se realizó durante 30 épocas utilizando un optimizador Adam, la función de pérdida *categorical crossentropy*, la regularización mediante Dropout (0.3) y early stopping. Para prevenir clasificaciones incorrectas, se implementó un sistema de filtrado dual con umbral de confianza del 65%. El modelo final alcanzó una precisión de 97.78%, superando significativamente el objetivo inicial de 80% y demostrando la efectividad del enfoque basado en la extracción de características específicas para la clasificación del estado de salud de especies vegetales nativas.

PALABRAS CLAVE: Estado de salud, Extracción de características, Histograma hsv, Lantana camara, Perceptrón multicapa (mlp), Redes neuronales.

ABSTRACT

Climate change has significantly altered the development patterns and life cycles of different plant species, not only regionally but globally. In the Central Valleys region of Oaxaca, Lantana Camara, a species native to the region, lacks technological tools that allow for an objective evaluation of its health status, limiting the development of evidence-based conservation strategies. Traditional assessment relies on subjective visual observations that can be inconsistent and difficult to scale for the continuous monitoring necessary in this context. To address this problem, an automated system was developed to classify the health status of Lantana Camara using neural networks. The methodology consisted of extracting 181 numerical features per image: 180 values from the Hue histogram of the HSV model and 1 value for inflorescence diameter obtained through automatic segmentation with OpenCV. These features were processed using a Multilayer Perceptron (MLP) neural network with an architecture of three hidden layers (256, 128, 64 neurons with ReLU activation) and a *softmax* output layer, classifying four states: full bloom, changing flowers, paleness due to lack of light, and dry plant. Training was carried out for 30 epochs using the Adam optimizer, *categorical_crossentropy* loss function, regularization through Dropout (0.3), and early stopping. A dual filtering system with a 65% confidence threshold was implemented to prevent incorrect classifications. The final model achieved an accuracy of 97.78%, significantly exceeding the initial goal of 80% and demonstrating the effectiveness of the approach based on specific feature extraction for classifying the health status of native plant species.

KEYWORDS: Health status, feature extraction, HSV histogram, lantana camara, multilayer perceptron (MLP), neural networks.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el planeta ha enfrentado con mayor frecuencia e intensidad los efectos del fenómeno conocido como cambio climático, provocado por el calentamiento global. Entre los factores que catalizan sus efectos se encuentra la contaminación de la atmósfera, causada sobre todo por maquinaria industrial, estaciones productoras de energía, motores de combustión y automóviles. Los automóviles son los que contribuyen en mayor medida a la contaminación del aire, provocando aproximadamente 80% de la contaminación atmosférica total (Manisalidis et al., 2020). La liberación creciente de diversos contaminantes atmosféricos, tales como hidrocarburos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y trióxido de azufre (SO₃) (Manisalidis et al., 2020), contribuye sustancialmente al cambio climático. El dióxido de carbono (CO₂), en particular, da lugar a más de 60% del calentamiento global debido a su elevado volumen de emisión (Singh et al., 2021). Sin embargo, éste no es el único factor determinante, ya que el cambio de temperatura también se ve influenciado por la radiación solar, la temperatura del aire y los patrones de uso del suelo (Suthar et al., 2024).

Estas condiciones afectan significativamente a la flora sensible a las variaciones climáticas y del suelo, manifestándose principalmente en su desplazamiento o en la desaparición del hábitat que han ocupado tradicionalmente. Este fenómeno altera los ecosistemas de múltiples formas: permite la llegada de especies que hasta ahora no se habían encontrado en determinadas regiones, lo cual puede generar desequilibrios cuando compiten por recursos con especies nativas; provoca la desaparición de especies vegetales, obligando a que ciertos herbívoros deban migrar en busca de alimento o tengan que enfrentar escasez alimentaria. En consecuencia, los carnívoros ven limitadas sus fuentes de alimentación, lo que los fuerza a adentrarse en territorios ajenos a ellos, en los que enfrentan condiciones adversas, lo que finalmente altera toda la cadena alimenticia. La evidencia de este fenómeno es documentada en Estados Unidos, donde datos del Departamento de Agricultura revelan que durante el periodo 1960-2018 ocurrió una migración hacia el norte de las zonas climáticas aptas para diferentes especies vegetales, lo que facilita el establecimiento de plantas en regiones donde históricamente no solían prosperar (Deng et al., 2020).

Esta problemática cobra especial relevancia en la región de los Valles Centrales de Oaxaca, cuando se consideran especies nativas como la Lantana camara, cuya respuesta a las variaciones climáticas actuales ha sido escasamente documentada. Aunque se trata de una especie abundante, que forma parte del gran abanico de flora del estado, no existen herramientas tecnológicas que

permitan evaluar de manera objetiva y sistemática su estado de salud, lo cual limita considerablemente la capacidad de los especialistas para desarrollar estrategias de conservación basadas en evidencia. Los métodos tradicionales de evaluación del estado de salud de las plantas dependen de observaciones visuales, que pueden resultar subjetivas en tanto son realizadas por diferentes expertos; además, suponen un proceso lento, inconsistente y difícilmente escalable para el monitoreo continuo que demanda el contexto de cambio climático acelerado. Esta carencia metodológica impide la detección temprana de afectaciones en la especie y la documentación sistemática de sus patrones de respuesta a las variaciones ambientales. Por ello, surge la necesidad de desarrollar un sistema automatizado basado en redes neuronales, capaz de clasificar el estado de salud de la Lantana camara mediante el análisis de imágenes, para contar con una herramienta objetiva, replicable y accesible que contribuya a la toma de decisiones informadas para la conservación de esta especie frente a los desafíos planteados por el cambio climático en la región.

La necesidad de desarrollar este sistema de clasificación automatizado se justifica desde múltiples perspectivas. Desde el ámbito científico, la generación de datos objetivos y cuantificables sobre el estado de salud de la Lantana camara permitirá documentar sistemáticamente los patrones de respuesta de esta especie a las variaciones ambientales, contribuyendo al conocimiento sobre la adaptabilidad de la flora nativa al cambio climático. Desde la perspectiva de conservación, la disponibilidad de una herramienta automatizada facilitará el monitoreo continuo y escalable de poblaciones de Lantana camara en diferentes zonas de los Valles Centrales, permitiendo detectar tempranamente afectaciones e implementar estrategias de protección basadas en evidencia. Además, la metodología desarrollada establecerá un precedente replicable para el estudio de otras especies nativas de la región, ampliando el impacto del trabajo más allá de la especie analizada específicamente.

El presente trabajo tiene como objetivo desarrollar un modelo de predicción basado en redes neuronales, capaz de identificar y clasificar el estado de salud de la Lantana camara mediante el análisis de fotografías individuales proporcionadas por el usuario, estableciendo así una metodología replicable que contribuya al monitoreo sistemático de especies vegetales nativas de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Fundamentos de la metodología

Seleccionar la técnica apropiada de red neuronal para clasificar el estado de salud vegetal requiere la comprensión de las capacidades y los límites propios de cada una de las arquitecturas de las que se dispone actualmente. En este caso, las redes neuronales convolucionales (cnn) representan una arquitectura diseñada específicamente para el procesamiento directo de imágenes mediante la extracción automática de características jerárquicas empleando capas de convolución que detectan patrones visuales progresivamente más complejos, bordes y texturas, desde un nivel básico hasta uno alto (Ahmed et al., 2021). Sin embargo, su enfoque implica algunos requisitos significativos en términos de volúmenes de datos de entrenamiento y recursos computacionales, resultando particularmente problemático cuando se trata de trabajar con especies vegetales que carecen de un conjunto de datos públicos, lo que hace necesaria la construcción manual de un *dataset*.

En contraste con la arquitectura convolucional, el perceptrón multicapa (mlp) constituye una alternativa más eficiente cuando el problema que se busca resolver involucra el procesamiento de características numéricas previamente extraídas y cuantificadas de manera específica. El modelo mlp posee antecedentes que documentan su efectividad en la clasificación de estados vegetales; en ellos se combinan con descriptores específicos de forma, textura y distribución cromática, logrando precisiones superiores a 90% en tareas de identificación de especies y en la evaluación de condiciones de salud vegetal (Ersin et al., 2024). Para el caso particular de la clasificación del estado de salud de la Lantana camara, en el que las características distintivas de cada estado pueden ser medidas conforme parámetros específicos de color y forma de sus flores, la arquitectura mlp se presenta como una opción viable que permite que los entrenamientos se realicen de forma eficiente, aun cuando se cuente con conjuntos de datos limitados; esto es relevante cuando la documentación fotográfica de este tipo de especies es escasa.

La extracción de características fundamentada en el modelo de color hsv (Hue-Saturation-Value) consta de una aproximación robusta y sólida para el análisis de estructuras vegetales. La fundamentación del modelo en el hsv proporcionó muchas otras ventajas, sobre todo frente al modelo rgb de uso tradicional, ya que los componentes H (tono) y S (saturación) separan de forma explícita la información cromática de la intensidad lumínica, lo cual reduce sustancialmente el efecto provocado por variaciones de iluminación, proyección de sombras y afectaciones de las condiciones ambientales sobre la robustez de los métodos de segmentación y análisis (Okyere et al., 2023). El

tono permite identificar de manera precisa los cambios cromáticos asociados a diferentes fenómenos fisiológicos, como el estrés vegetal, la falta de nutrientes o la transición entre estados característicos, mientras que la saturación proporciona información sobre la intensidad de los pigmentos fotosintéticos de los tejidos de las plantas. La distinción entre estos dos componentes cromáticos hace que el modelo hsv sea menos sensible a condiciones variables de iluminación en comparación con el modelo rgb, lo cual es particularmente ventajoso para el análisis de imágenes tomadas en diferentes ambientes, momentos del día y condiciones meteorológicas, sin tener la necesidad de utilizar equipo especializado para reproducir escenarios precisos bajo entornos de iluminación controlada (Mardanisamani y Eramian, 2022).

Los histogramas de distribución de tonos son descriptores matemáticos efectivos para la caracterización cuantitativa del estado cromático de los tejidos vegetales y de las flores. Dentro de los trabajos científicos se ha documentado de manera extensa que los histogramas de color, sobre todo cuando se construyen en el espacio hsv, permiten medir con alta precisión la presencia de pigmentos vegetales y detectar patrones sintomáticos de diferentes enfermedades, diferencias en sus nutrientes o estados de estrés de una amplia gama de especies vegetales. El análisis de características cromáticas empleando histogramas hsv, aunado al uso de técnicas apropiadas de segmentación, ha demostrado una efectividad notable para clasificar estados de salud en plantas, logrando precisiones superiores a 95% en estudios recientes de detección automática de enfermedades foliares mediante el procesamiento de características de color y textura (Rajagopal et al., 2024). La combinación de los descriptores cromáticos derivados del análisis de histogramas con características cuantificables de sus formas, como el diámetro de inflorescencia, el área floral o la densidad de estructuras reproductivas, proporciona un conjunto de parámetros complementarios que mejoran de manera sustancial la capacidad de selección rigurosa del modelo de clasificación, al capturar simultáneamente información de composición cromática y de estructura física y dimensiones de los órganos vegetales analizados.

Las técnicas de segmentación de imágenes implementadas empleando la biblioteca OpenCV hacen posible el aislamiento automatizado de regiones de interés específicas dentro de imágenes complejas que contienen múltiples elementos; ello facilita la extracción precisa y reproducible de características específicas, sin requerir la intervención manual de especialistas en las imágenes procesadas. La segmentación fundamentada en umbrales cromáticos aplicados en el espacio de color hsv ha sido ampliamente utilizada en aplicaciones de agricultura de precisión y análisis fenológico para la detección automática de estructuras florales, foliares y frutales en condiciones de campo (Chenxu et

al., 2022). Aunque estudios recientes han documentado que los métodos tradicionales de segmentación implementados en OpenCV pueden presentar ciertas limitaciones cuando se enfrentan a la segmentación de estructuras vegetales morfológicamente complejas o en presencia de fondos altamente heterogéneos (Miao et al., 2024), estos métodos resultan suficientemente efectivos y eficientes de manera computacional al combinarse estratégicamente con algoritmos complementarios de detección de contornos, análisis morfológico y filtrado de regiones para la extracción automática de parámetros dimensionales específicos, como el diámetro característico de flores en condiciones estandarizadas de captura fotográfica.

Con base en estos fundamentos teóricos, se diseñó la metodología específica que se describe a continuación, priorizando la eficiencia computacional y la precisión de la clasificación mediante la extracción de características cuantificables del espacio de color hsv y el uso de arquitecturas de redes neuronales tipo mlp, apropiadas para el procesamiento de datos estructurados.

Identificación del sujeto de estudio y sus estados

De toda la variedad de plantas presentes en la región, se eligió la especie *Lantana camara* como modelo de estudio, debido a su alta disponibilidad, a la facilidad para adquirirla y a que no requiere condiciones climáticas específicas o de temporadas particulares para observar sus continuos procesos de florecimiento. En la fase inicial se identificaron tres estados característicos en la planta: florecimiento pleno, cambio de flores y palidez por falta de luz.

Desarrollo y prueba del modelo preliminar

Previamente al desarrollo del modelo principal, se realizó una prueba de concepto con la implementación inicial de un modelo de clasificación de alimentos utilizando el *dataset* Food101 de TensorFlow, que contiene aproximadamente 4.5 GB de imágenes. Luego, se creó un *dataset* personalizado de gastronomía oaxaqueña, con 319 imágenes distribuidas en cuatro categorías: pan de yema, tamales oaxaqueños, tejate y tlayudas, contando con aproximadamente 80 imágenes por categoría.

La arquitectura del modelo preliminar utilizó como base una red neuronal convolucional con MobileNetV2 mediante transferencia de aprendizaje. Se incorporaron pesos preentrenados de ImageNet, una capa de GlobalAveragePooling2D, una capa de Dropout de 30% y una capa densa con activación *softmax*.

Las técnicas de aumento de datos incluyeron rotaciones de máximo 20°, zoom máximo de 20%, desplazamientos horizontales y verticales del 10% y volteos horizontales aleatorios.

La configuración del entrenamiento empleó imágenes de píxeles, lotes de 32 imágenes, entrenamiento de 10 épocas y decisión motivada. El uso de un número más bajo sólo haría que el modelo tuviera un entrenamiento incompleto. Si bien sería ideal el uso de más épocas, éste se descartó pues sólo supondría desperdiciar tiempo valioso que podría utilizarse en otros procesos; además, ello podría llegar a causar un sobreajuste que lo llevara a perder la capacidad de reconocer las imágenes de manera correcta. Aunado a ello, se empleó la optimización Adam con pérdida de entropía cruzada categórica y la división de los datos en 80% para entrenamiento y 20% para validación.

Desarrollo del modelo de predicción para la Lantana camara

Para el desarrollo del modelo específico de Lantana camara, se realizó la captura de imágenes de cada estado de la planta; las imágenes se organizaron en carpetas específicas de Google Drive. Posteriormente, se trabajó en la extracción de determinadas características empleando la función *extract_flower_features*, que captura múltiples parámetros distintivos, incluyendo el histograma de distribución de colores utilizando 180 valores del componente de tono del modelo hsv, el diámetro de inflorescencia, la densidad floral, la saturación media, el brillo medio y varianzas de saturación y tono.

El procesamiento de las imágenes se realizó mediante segmentación del espacio de color hsv utilizando OpenCV, con extracción automática del diámetro de las flores por medio de algoritmos de segmentación y normalización con StandardScaler, a fin de asegurar escalas uniformes. Se implementó un sistema de filtrado dual que combina la detección cromática basada en el análisis de distribución de tonos verdes y marrones, con un umbral de confianza mínimo de 65% para prevenir la clasificación incorrecta de imágenes que no correspondan a alguno de los estados de Lantana camara.

Tipo de red neuronal y técnicas de entrenamiento

El modelo de clasificación final implementó una arquitectura de red neuronal tipo perceptrón multicapa (MLP), con una capa de entrada de 181 características (180 correspondientes al histograma de tonos y una al diámetro), seguida de tres capas ocultas completamente conectadas con 256, 128 y 64 neuronas respectivamente, todas activadas con ReLU. Finalmente, una capa de salida con activación *softmax* para clasificar los estados de salud.

Se incorporaron capas de Dropout con tasa de 0.3 para evitar sobreajuste, se utilizó *categorical_crossentropy* como función de pérdida, el optimizador Adam, técnicas de regularización mediante *early stopping* y se entrenó durante 30 épocas.

Entorno de desarrollo y herramientas utilizadas

El entorno de desarrollo fue Google Colab, utilizando notebooks de Jupyter con lenguaje Python para desarrollar el *dataset* y el modelo de entrenamiento. En esta plataforma se emplearon principalmente las librerías TensorFlow para el modelado de redes neuronales, OpenCV para el procesamiento y segmentación de imágenes HSV, y *scikit-learn* para la normalización de datos.

Con la aplicación de `gc.collect()` y el procesamiento por lotes se implementó una gestión eficiente de memoria, para resolver problemas de consumo excesivo de recursos. La interfaz gráfica se desarrolló en Visual Studio Code utilizando PyQt5 con funciones interactivas que incluían la carga de imágenes en formatos jpg, jpeg y png, la visualización de histogramas de saturación y brillo, y análisis automático con máscaras de segmentación y contornos detectados.

Estrategias de evaluación y validación del modelo

El sistema de validación se estableció utilizando la matriz de confusión para evaluar la capacidad de clasificación del modelo, un sistema de conversión de escala para mantener las proporciones adecuadas entre la imagen visualizada y las dimensiones originales, y el análisis estadístico del *dataset* para el manejo de casos especiales de plantas marchitas, asignando un valor predefinido de 5.0 píxeles cuando no se detectan flores, con base en el análisis estadístico del conjunto de datos.

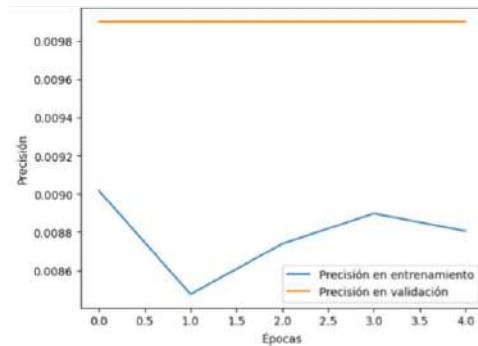
RESULTADOS

Desarrollo del modelo de prueba y ajustes de optimización

Inicialmente, el primer modelo de clasificación de alimentos que utilizaba el *dataset* Food101 presentó problemas significativos de rendimiento. Las limitaciones técnicas incluían el uso de caché en disco, el cual generaba posibles fugas de memoria, operaciones intensivas de entrada/salida, el mantenimiento del modelo base MobileNetV2 completamente congelado, la ausencia de técnicas de aumento de datos, la utilización de imágenes de resolución baja (píxeles) y la falta de implementación de un sistema de limpieza periódica de

memoria durante el entrenamiento. La ilustración 1 muestra los resultados de los ajustes aplicados.

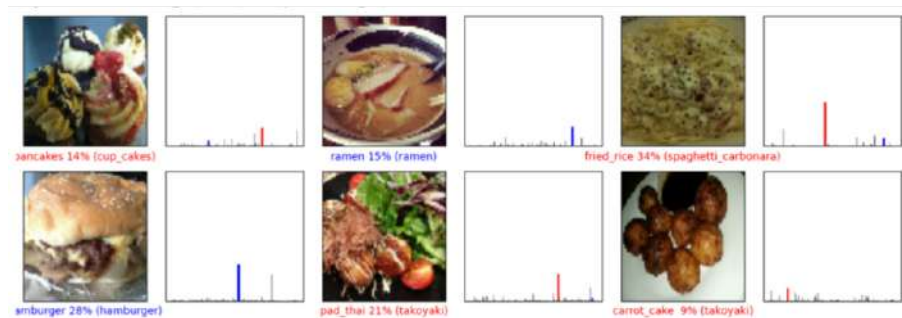
Ilustración 1 los resultados muestran *underfitting* severo (precisión ~0.9%) constante en cuatro épocas, indicando falta de aprendizaje. Fuente: elaborado por los autores



Estos inconvenientes provocaron fallos constantes en la plataforma Google Colab, además de la pérdida constante de conexión con el servidor debido a la eliminación incorrecta de los resultados generados durante la reejecución.

Para resolver estas limitaciones se implementaron diversas técnicas de optimización: eliminación del caché de disco para reducir problemas de memoria, descongelamiento de las últimas 30 capas del modelo base, sustitución de MobileNetV2 por EfficientNetB0, incorporación de técnicas avanzadas de aumento de datos, incremento de la resolución de imágenes a píxeles, diseño de una arquitectura más profunda con regularización adicional, implementación de funciones de limpieza de memoria después de cada ciclo de entrenamiento, ajuste dinámico de la tasa de aprendizaje, utilización de precisión mixta (float16) para acelerar los cálculos de gpu y reducción del *dataset* en 30% para las pruebas iniciales. Finalmente, esta metodología consiguió producir algunas predicciones. Con un valor tan bajo de precisión sólo pudo obtenerse una serie de resultados incorrectos y limitados, los que pueden observarse en la ilustración 2.

Ilustración 2 La precisión baja sólo causó que el modelo no pueda estar seguro de sus predicciones. Fuente: elaborado por los autores.



Las mejoras implementadas representaron una mejora considerable en el funcionamiento del proceso de entrenamiento y en el consumo estable de memoria de la plataforma, eliminando los problemas técnicos que habían aparecido durante esta etapa. Sin embargo, no se logró alcanzar la precisión esperada de 85%, debido a que los tiempos de entrenamiento fueron excesivamente largos, lo que impidió completar el proceso debido a las limitaciones de recursos de la plataforma.

Ilustración 3 Ejemplos de los resultados obtenidos de diferentes entrenamientos en los que se demuestra su inconsistencia de precisión. Fuente: Elaborado por los autores

```
# Evaluate the model
test_loss, test_acc = model.evaluate(test_ds)
print(f"Test accuracy: {test_acc:.2%}")
```

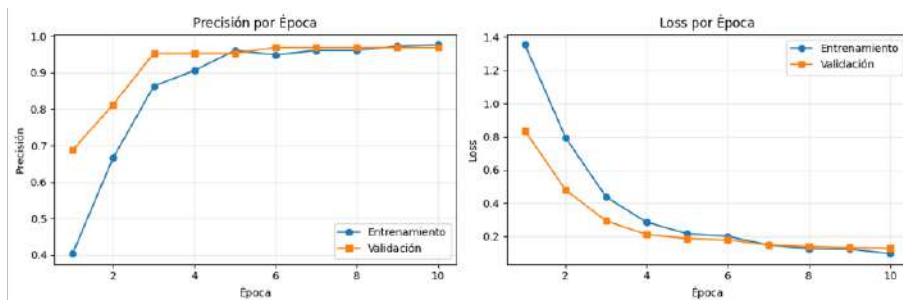
316/316 ————— 150s 472ms/step - accuracy: 0.3357 - loss: 2.7546
Test accuracy: 34.61%

Tras reflexionar sobre las dificultades encontradas, y en vista de la inconsistencia de los resultados, principalmente en la precisión, que oscilaba entre valores de 34.61% (imagen superior) y 44.69% (imagen inferior) mostrados en la ilustración 3, se optó por desarrollar un *dataset* personalizado, enfocado por completo en gastronomía oaxaqueña, con aproximadamente 80 imágenes para cada una de las cuatro categorías seleccionadas: pan de yema, tamales oaxaqueños, tejate y tlayudas. El proceso de elaboración del *dataset* se automatizó empleando un programa desarrollado en Python que generó un archivo csv; se obtuvo un *dataset* de 319 imágenes distribuidas entre las cuatro ca-

tegorías. Su sistema de identificación consistía en un identificador numérico en el que el pan de yema recibió el id 0, los tamales oaxaqueños el id 1, el tejate el ID 2 y las tlayudas el ID 3.

El modelo final de clasificación de alimentos basado en MobileNetV2 con transferencia de aprendizaje mostró un desarrollo positivo constante, comenzando con una precisión de validación de 60.94% en la primera época y culminando con una precisión final de 96.88% en la última época, lo que demostró que su proceso de aprendizaje y generalización se desarrollaba correctamente. Este proceso puede verse en la ilustración 4, en la que se observa la evolución de la precisión (*accuracy*) a la izquierda y la función de pérdida (*loss*) para datos de entrenamiento y validación a lo largo de 10 épocas a la derecha. El alto nivel de precisión del modelo se atribuye a un adecuado proceso de selección, organización y limpieza del *dataset*, como también a la eficiencia del proceso de transferencia de aprendizaje combinado con técnicas de aumento de datos implementadas. El modelo final, con 5,124 parámetros entrenables junto a los 2,257,984 parámetros congelados del backbone, culminó con una solución efectiva que logró mantener el equilibrio entre precisión, eficiencia de recursos y generalización.

Ilustración 4 Evolución del rendimiento del modelo MobileNetV2 durante el entrenamiento. Fuente: Elaborado por los autores

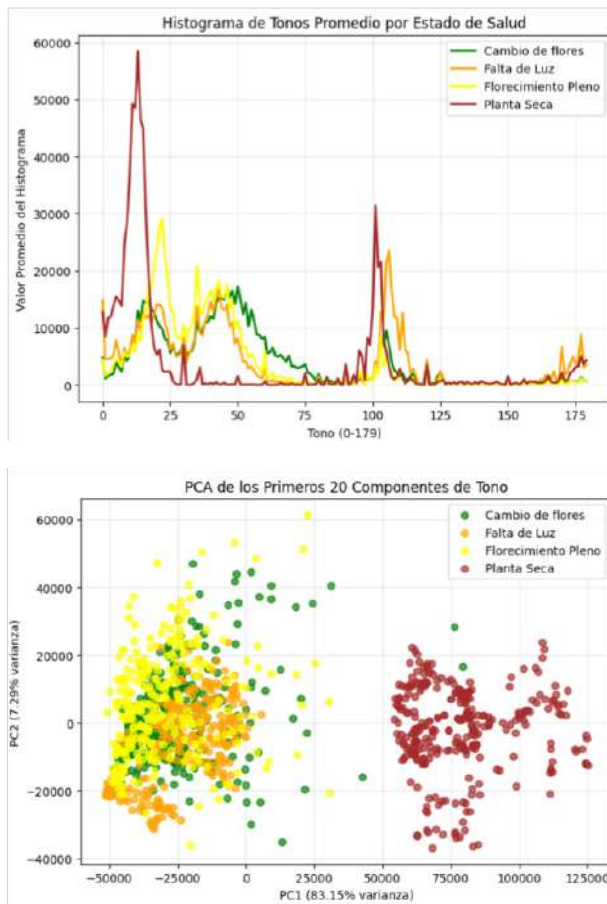


Resultados del modelo de clasificación del estado de salud de la Lantana camara

El desarrollo del modelo de clasificación del estado de salud de Lantana camara tuvo un enfoque diferente respecto al modelo inicial de prueba, basándose en la extracción de características específicas en lugar de en el procesamiento directo de imágenes mediante redes neuronales convolucionales. Se procesaron las imágenes para generar histogramas de distribución de co-

lor mediante el componente de tono del modelo hsv (Hue-Saturation-Value), junto con medidas de diámetro de las flores, obteniendo 181 valores numéricos característicos: 180 valores del histograma de tonos y un valor adicional del diámetro de las flores. Como se observa en la ilustración 5, la imagen superior muestra los patrones de tonos promedio por estado de salud, donde cada clase presenta una firma de color característica; en la imagen inferior, el análisis de componentes principales (pca) muestra la clara separabilidad entre los cuatro estados de salud de la planta, validando la efectividad de las características extraídas para la tarea de la clasificación.

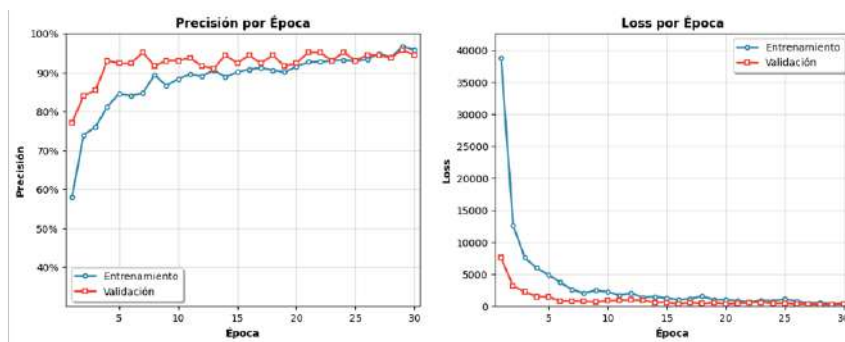
Ilustración 5 Características extraídas para clasificación del estado de salud de la Lantana cámara. Fuente: Elaborado por los autores



La implementación de una red neuronal tipo perceptrón multicapa (mlp) con arquitectura de capas completamente conectadas incluyó 256 neuronas activadas con ReLU en la primera capa oculta, seguida por 128 neuronas activadas por ReLU, una tercera capa de 64 neuronas con activación ReLU y una capa final de salida con activación *softmax* para las tres clases de estados de salud. El modelo incorporó capas de Dropout con tasa de 0.3 para prevenir el sobreajuste y la aplicación de *categorical_crossentropy* como función de pérdida con el optimizador Adam.

Tras 30 épocas de entrenamiento, el modelo alcanzó una precisión de 97.78%, con una capacidad de clasificación adecuada según los resultados obtenidos en la matriz de confusión. Como se observa en la ilustración 6, a la izquierda se muestra la evolución de la precisión durante el entrenamiento, evidenciándose una convergencia progresiva con un máximo de 97.78% en validación; a la derecha, la función de pérdida (loss) muestra una disminución constante para ambos conjuntos de datos, lo que indica un aprendizaje estable sin signos de sobreajuste. El grado de precisión obtenido da cuenta de que el modelo fue capaz de distinguir efectivamente los estados de salud definidos: florecimiento pleno, cambio de flores y palidez por falta de luz, utilizando las características extraídas de los histogramas de color y las medidas dimensionales de las flores.

Ilustración 6 Curvas de aprendizaje de la red neuronal MLP durante el entrenamiento.
Fuente: Elaborado por los autores



Proceso de mejoras en versiones posteriores

Las mejoras implementadas de la primera a la segunda versión del modelo involucraron diferentes aspectos del proyecto. En el procesamiento de imágenes se incorporó un algoritmo mejorado con OpenCV para la extracción automáti-

ca del diámetro de las flores mediante segmentación del espacio de color hsv, lo que posibilitó el aislamiento y la medición precisa de las regiones florales y complementó los histogramas de tonos con datos dimensionales cuantitativos.

Los problemas emergentes vinculados al consumo de memoria fueron resueltos con la implementación del procesamiento por lotes, la liberación explícita de recursos mediante `gc.collect()`, la reducción de visualizaciones almacenadas, el redimensionamiento de las imágenes y la reorganización del código en funciones modulares orientadas a mejorar su eficiencia y futuro mantenimiento.

El modelado se enriqueció con la integración de los histogramas de tonos hsv y la información del diámetro de las flores como entrada combinada, aplicando normalización con `StandardScaler` para asegurar el manejo de escalas uniformes. Se implementaron técnicas de regularización mediante *early stopping* (ilustración 7), configurado para monitorear la pérdida de validación (*val_loss*) con una paciencia de cinco épocas, lo que permite detener automáticamente el entrenamiento cuando el modelo deja de mejorar y restaurar los mejores pesos obtenidos durante el proceso, evitando así el sobreajuste y optimizando el rendimiento final. Adicionalmente, se desarrolló un modelo secundario basado exclusivamente en el diámetro de las flores para análisis comparativo.

La interfaz gráfica cambió considerablemente con la incorporación de la medición en tiempo real del diámetro de las flores desde la imagen. Se agregaron elementos de control como checkboxes para activar y desactivar el modo de medición, y retroalimentación visual, que muestra los resultados de las mediciones sobre la imagen procesada. Como se observa en la ilustración 8, la interfaz permite al usuario cargar imágenes de la Lantana camara mediante botones de selección y, tras realizar el análisis, despliega los resultados de clasificación del estado de la planta junto con su nivel de confianza, la medición del diámetro de la flor en píxeles y el histograma de tonos hsv utilizado para la caracterización, proporcionando una visualización completa del proceso de análisis.

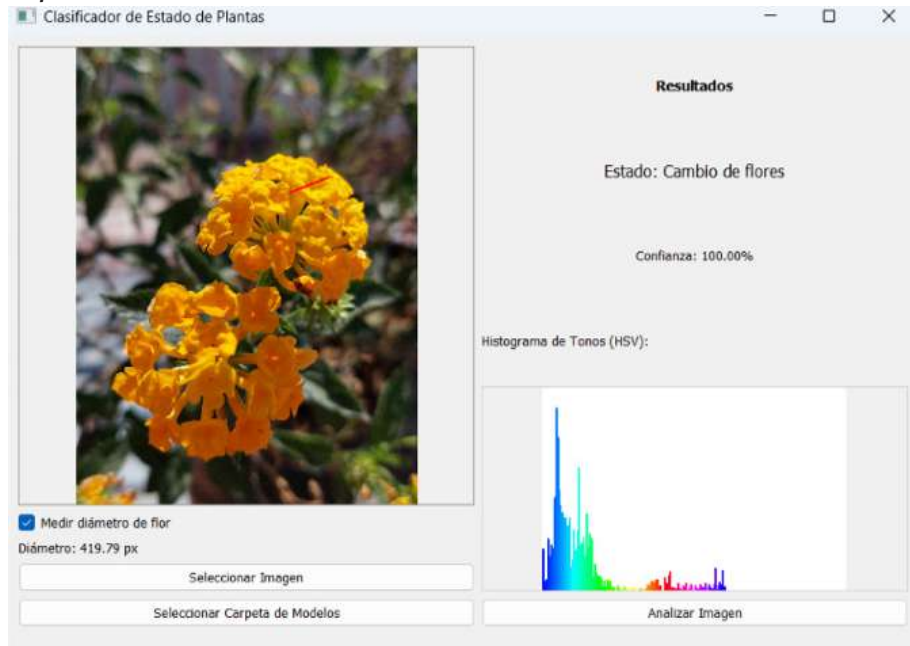
Ilustración 7 Configuración de *early stopping* para control del entrenamiento. Fuente: Elaborado por los autores

```

1 # Añadir early stopping para evitar sobreajuste
2 early_stopping = EarlyStopping(
3     monitor='val_loss',
4     patience=5,
5     restore_best_weights=True,
6     verbose=1
7 )

```

Ilustración 8 Interfaz del sistema de clasificación de estado de salud. Fuente: Elaborado por los autores



Versión final del sistema

La tercera y última versión del modelo de clasificación de los estados de salud de *Lantana camara* produjo un sistema que incorporó mejoras en el sistema de filtrado basado en la detección cromática con referencia en la distribución de tonos verdes y marrones con un umbral de confianza mínimo de 65%, logrando prevenir la clasificación incorrecta de imágenes que no contienen plantas.

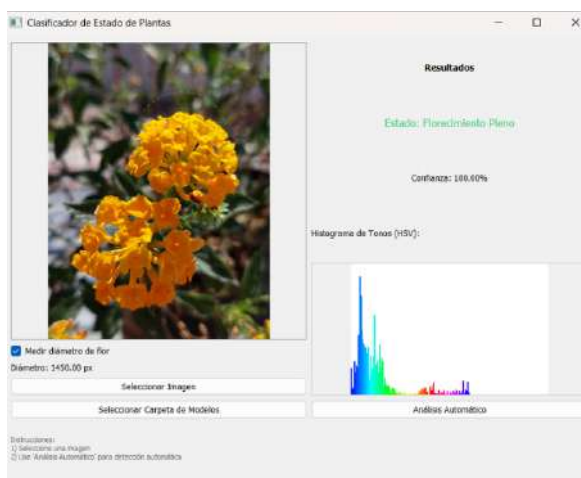
La extracción de características se modificó empleando la función *extract_flower_features()*, que captura múltiples parámetros distintos de cada imagen, incluyendo el diámetro de inflorescencia, la densidad floral, la saturación media, el brillo medio, así como varianzas de saturación y tono. El aumento de características permitió diferenciar de manera más precisa entre estados con características similares, como “florecimiento pleno” y “falta de luz”, los cuales comparten características morfológicas similares, pero muestran diferentes tonos de color. Esto fue posible mediante medidas específicas de saturación y densidad floral, lo cual ayudó a que el modelo diferenciara entre ellas de mejor manera.

Para el manejo de plantas marchitas se implementó una solución específica que asigna un valor predeterminado de 5.0 píxeles cuando no se detectan flores, basado en el análisis estadístico del *dataset*. El procesamiento del *dataset* se amplió creando el archivo *dataset_plantas_con_caracteristicas.txt*, con un encabezado expandido que almacena todas las características extraídas, organizando el almacenamiento de manera estructurada.

La interfaz gráfica se optimizó implementando la medición interactiva; ésta permite que el usuario trace líneas sobre las imágenes para determinar los diámetros de las flores cuando sea necesario. Asimismo, se incorporó un sistema de conversión escalar que mantiene las proporciones entre la imagen visualizada y la imagen original. El sistema de visualización realiza un análisis detallado con máscaras de segmentación, contornos detectados, círculos de medición, histogramas de saturación y brillo. La interfaz se simplificó eliminando funciones redundantes y manteniendo el botón de “Análisis automático” que proporciona resultados precisos, reduciendo la complejidad del flujo de trabajo y enfocándose en ser más efectivo para la clasificación de los diferentes estados. Como se observa en la ilustración 9, la interfaz muestra un ejemplo de clasificación exitosa del estado “florecimiento pleno” con un nivel de confianza del 100%, acompañado de la detección automática del diámetro de la flor (1,450.00 píxeles) y el histograma de tonos hsv correspondiente, demostrando la capacidad del sistema para proporcionar resultados completos y precisos de manera automática.

Ilustración 9 Interfaz optimizada del sistema de clasificación con análisis automático.

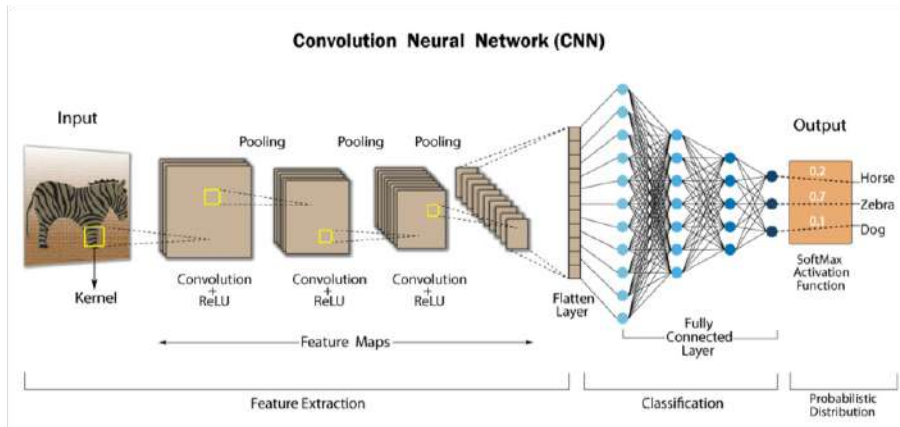
Fuente: Elaborado por los autores



Comparación entre arquitecturas de redes neuronales

El método de funcionamiento de una red neuronal convolucional (cnn) implica el procesamiento de una gran cantidad de datos y la extracción de un número variado de características como las mostradas en la ilustración 10; éstas funcionan para identificar formas, patrones o bordes en su área especializada, que es el procesamiento de imágenes y su clasificación para proporcionar un resultado concreto. El punto negativo radica en la gran cantidad de datos que puede llegar a necesitar o en la enorme cantidad de recursos que puede llegar a consumir debido a esto (Ahmed et al., 2021). En el trabajo realizado sobre el modelo de reconocimiento de comida oaxaqueña, el uso de la cnn se justificó y no se vio afectado, pues detectó los parámetros visuales generales dentro de las fotografías, como formas, colores, texturas y composición global; sus decisiones se basaron en la apariencia general de la imagen, lo que puede asemejarse a la forma en que los seres humanos reconocen características específicas.

Ilustración 10 Ilustración de la manera en la que las Redes Neuronales Convolucionales se comunican y procesan información (cnn). Fuente: Elaborado por los autores



Además, el uso limitado de una pequeña cantidad de imágenes no constituyó un impedimento, pues se apoyó en MobileNetV2, el cual ya fue entrenado con un gran número de imágenes para reconocer las características antes mencionadas, y en el procesamiento de los datos de las imágenes del *dataset* empleando Data Augmentation, lo cual multiplicó la cantidad total de imágenes y las convirtió en una multitud de variaciones que favorecieron este proceso.

Como cnn utiliza múltiples parámetros para el análisis de imágenes, resulta más laborioso extraer características específicas para su análisis. En cambio, el análisis del estado de salud de la planta necesita detectar características específicas y cuantificables basadas en el color de las flores o en su diámetro preciso; por lo tanto, su proceso de decisión se fundamenta en métricas determinadas y en umbrales para realizar una predicción basada en estos datos. En este caso, el manejo de datos exactos de la escala hsv relacionados con los estados de salud y tamaños en píxeles transforma el problema, ya que no se trata de un proceso de reconocimiento visual sino del análisis de datos estructurados, de la medición y la clasificación para proporcionar un resultado.

La arquitectura de perceptrón multicapa (mlp) es más apropiada para la realización de este tipo de análisis, porque está diseñada específicamente para procesar datos numéricos estructurados, como los 181 valores característicos extraídos (180 valores del histograma de tonos hsv y un valor del diámetro floral). A diferencia de las cnn, que requieren aprender a extraer características visuales de imágenes completas, el mlp puede enfocarse directamente en el análisis y la clasificación de características ya identificadas y cuantificadas, lo que resulta en un proceso más eficiente y preciso para la determinación del estado de salud de la Lantana camara.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar un sistema de reconocimiento del estado de salud de Lantana camara mediante la implementación de técnicas de inteligencia artificial. Los resultados obtenidos en los procesos implementados y el entrenamiento del modelo demuestran que el objetivo se cumplió satisfactoriamente. El modelo final desarrollado alcanzó una precisión de 97.78%, superando significativamente el objetivo inicial planteado en 80%. Esto valida la efectividad de la metodología utilizada, que combina las técnicas de extracción de características específicas (181 valores numéricos derivados del histograma de tonos y el diámetro floral) con arquitecturas de redes neuronales tipo perceptrón multicapa (MLP). Los principales resultados obtenidos incluyen el desarrollo exitoso de un modelo de prueba de gastronomía oaxaqueña que alcanzó 96.88% de precisión, la implementación de un sistema de filtrado dual con detección cromática y umbral de confianza de 65% y la demostración de la capacidad del sistema para distinguir efectivamente entre los cuatro estados de salud definidos: florecimiento pleno, cambio de flores, palidez por falta de luz y planta seca. Este proceso contribuye al desarrollo de herramientas tecnológicas para la conservación y el monitoreo de especies nativas frente a los efectos del cambio climático, proporcionando una metodología replicable y objetiva que reduce la subjetividad propia de las

evaluaciones manuales y facilita la toma de decisiones por los especialistas en botánica. Los resultados obtenidos proporcionan un punto de partida para futuras investigaciones que busquen incrementar la confiabilidad del sistema mediante la adición de un conjunto de datos más extenso, la mejora del análisis longitudinal de las plantas y la adaptación de la metodología para las demás especies nativas de la región de los Valles Centrales de Oaxaca.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Escuela de Ingenierías y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca y a su Grupo de Investigación, Desarrollo e Innovación (gidi steam) por el apoyo brindado para la realización de este proyecto de investigación.

REFERENCIAS

- Ahmed, A., Mohamed, A., Amar, F., Basma, M., Omar, M., Mohamed, S., y Nehal, F. (2021). Image Classification Based On cnn: A Survey. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 6(1), 18-50. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4897990>
- Celaya Ramírez, J. A. (2025, junio 30). *Datasets-Entrenamientos*. Github: <https://github.com/Arkl30/Datasets-Entrenamientos>.git
- Chenxu, S., Chongyu, Y., Yongchao, X., Sumei, L., Hong, H., Hui, Y., y Xianzhong, F. (2022). Algorithm for acquiring multi-phenotype parameters of soybean seed based on OpenCV. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 38(20), 156-163. <https://dx.doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2022.20.018>
- Deng, S.-Z., Jalaludin, B., Antó, J. M., Hess, J. J., y Huang, C.-R. (2020). Climate change, air pollution, and allergic respiratory diseases: a call to action for health professionals. *Chinese Medical Journal*, 1552-1560. <https://doi.org/10.1097/CM9.0000000000000861>
- Ersin, E., Ahmet E., T., Elda, C., Aymen I., Z., Ahmed, S., Chamseddine, Z., y Wiem, A. (2024). Enhanced Plant Leaf Classification over a Large Number of Classes Using Machine Learning. *Applied Sciences*, 14(22). <https://doi.org/10.3390/appl42210507>
- Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., y Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and Health Impacts of Air Pollution: A Review. *Public Health*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
- Mardanisamani, S., y Eramian, M. (2022). Segmentation of vegetation and microplots in aerial agriculture images: A survey. *The Plant Phenome Journal*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/ppj2.20042>
- Miao, Y., Wang, R., Jing, Z., Wang, K., Tan, M., Li, F., . . . Han, Y. (2024). CT image segmentation of foxtail millet seeds based on semantic segmentation model VGG16-UNet. *Plant Methods*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s13007-024-01288-y>

- Okyere, F., Cudjoe, D., Sadeghi-Tehran, P., Virlet, N., Riche, A., Castle, M., . . . Hawkesford, M. (2023). Machine Learning Methods for Automatic Segmentation of Images of Field- and Glasshouse-Based Plants for High-Throughput Phenotyping. *Plants*, 12(10), 2035. <https://doi.org/10.3390/plants12102035>
- Rajagopal, M., Abbas, M., y Sivasakthivel, R. (2024). A Novel Technique for Leaf Disease Classification Using Legion Kernels with Parallel Support Vector Machine (LK-PSVM) and Fuzzy C Means Image Segmentation. *Helicon*, 10(4). <https://doi.org/10.1016/j.helicon.2024.e32707>
- Singh, P., Yadav, D., y Pandian E, S. (2021). Link between air pollution and global climate change. *Global Climate Change*, 79-108. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822928-6.00009-5>
- Suthar, G., Kaul, N., Khandelwal, S., y Singh, S. (2024). Predicting land surface temperature and examining its relationship with air pollution and urban parameters in Bengaluru: A machine learning approach. *Urban Climate*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101830>

Derechos de Autor© 2025 Celaya Ramírez, José Arturo; Silva Cruz, Eric Mario; Barcelos Mendoza, Ludwig Federico.



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Migración del sistema de control de prácticas profesionales y servicio social (SC-PPySS) de la escuela de ingenierías y arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca: una aplicación práctica

Practical application of migrating the Professional Practices and Social Service Control System (SC-PPySS) at the School of Engineering and Architecture, Universidad La Salle Oaxaca

A.D. Alonso-Tovar^{1*}, B. García-Jarquín²

**Autor de correspondencia*

DOI: 10.56643/rcia.v4i2.230

Como citar este artículo: Alonso-Tovar y García-Jarquín (2025). Migración del sistema de control de prácticas profesionales y servicio social (SC-PPySS) de la escuela de ingenierías y arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca: una aplicación práctica. Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura. 4(2). 97-112. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v4i2.230>

RESUMEN

Actualmente, existe un sistema de control de prácticas profesionales y servicio social para los alumnos de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad La Salle Oaxaca. Éste lleva funcionando varios años y, con el paso del tiempo, ha mostrado evidentes problemáticas que afectan el entorno de ejecución local (on-premises), principalmente: disponibilidad limitada, actualizaciones nulas y falta de respaldos. Con el objetivo de resolver dichas problemáticas, se propone un marco de migración de on-premises a la nube. La metodología experimental y el marco de migración consisten en: (1) identificar los elementos del sistema local, (2) identificar componentes equivalentes en la nube, (3) definir la versión del sistema que se migrará, (4) implementar la estrategia de migración lift-and-shift en el sistema, y (5) comparar el estado del entorno on-premises con el entorno de nube. Se definieron las siguientes métricas: tiempo fuera de línea del sistema, versiones de hardware y software, número de licenciaturas a las que da servicio y número de respaldos. Los

¹ Licenciado en Ingeniería en Software y Sistemas Computacionales. Universidad La Salle Oaxaca, Estudiante de Maestría en Gestión de Tecnologías de la Información. ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5184-3495>. Correo electrónico: angel_dan_alonso@hotmail.com

² Doctora en Ingeniería en Sistemas, Maestra en Ingeniería Industrial. Docente de la Universidad La Salle Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7192-2342>. Correo electrónico: brenda.garciaja@ulsaoaxaca.edu.mx

Recibido: 28/08/2025 | Aceptado: 10/10/2025 | Publicado: 15/12/2025

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

resultados obtenidos después de implementar el marco de migración (como prueba de concepto) muestran la mejora de la mayoría de las métricas respecto al entorno on-premises. El tiempo fuera de línea se reduce 99.84%, el hardware y software son más recientes, el número de licenciaturas permanece igual y el número de respaldos incrementa de una a tres copias. Se concluye que, tras migrar el sistema a la nube, se logran mejoras en las métricas. Si bien la métrica de licenciaturas no mejoró, se determinó que ello responde a un problema de administración y no técnico. Se recomienda que la universidad retome este proyecto y lo aplique al sistema real, que amplíe las licenciaturas a las que se da servicio, como también que se hagan análisis de riesgos y de beneficios económicos.

PALABRAS CLAVE: Cómputo en la nube, cómputo local, lift-and-shift, Microsoft Azure, migración, sistemas de información, software.

ABSTRACT

A management system for internships and social service of students exists at the School of Engineering and Architecture of the Universidad La Salle Oaxaca. This system has been in operation for several years, and over time, problems affecting the on-premises execution environment have become evident, mainly: limited availability, lack of updates, and lack of backups. A migration framework from on-premises to the cloud is proposed to solve these problems. The experimental methodology and migration framework consist of: (1) identifying the elements of the local system, (2) identifying equivalent components on the cloud, (3) defining the version of the system to be migrated, (4) implementing the lift-and-shift strategy to the system, and (5) comparing the state of the on-premises environment with the cloud environment. The following metrics were defined: system downtime, hardware and software versions, number of university programs served, and number of backups. The results obtained after implementing the migration framework (as a proof of concept) improved most metrics compared to the on-premises environment. Downtime was reduced by 99.84%, the hardware and software were updated and are more recent, the number of supported programs remained the same, and the number of backups increased from one to three copies. It was concluded that there were improvements in the metrics after migrating the system to the cloud. Although the programs metric did not improve, it was determined to be an administrative issue rather than a technical one. It is recommended that the university resumes this project and applies it to the real system, expands the number of supported programs, and conducts risk and economic benefit analysis.

KEYWORDS: Cloud computing, information systems, *lift-and-shift*, Microsoft Azure, migration, on-premises computing, software.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha hecho evidente la rápida adopción de tecnologías de la información (tic) en todos los aspectos de la vida cotidiana. Como mencionan Ruiz-Lázaro et al. (2025): “[las generaciones] actuales han crecido utilizando herramientas digitales, Internet, dispositivos móviles y otros medios sociales y tecnológicos lo que les permite estar en constante contacto con el resto de iguales” (p. 141). El entorno escolar y académico no es la excepción en lo que tiene que ver con la adopción de las TIC:

Las TIC se han introducido en los más disímiles campos, entre ellos, la enseñanza, donde han determinado la aparición de nuevos roles para las instituciones educativas, los docentes y los estudiantes, así como en el desarrollo de materiales de apoyo al proceso de enseñanza-aprendizaje (Prieto Díaz et al., 2011, p. 97).

Éste también es el caso de la Universidad La Salle Oaxaca y, en particular, de la Escuela de Ingenierías y Arquitectura (la Escuela).

En 2016 se realizó una entrevista con el director de la Escuela, cuyo objetivo fue identificar las problemáticas que se presentaban allí, para resolverlas a mediante la implementación de *software*. Se constató que la Escuela experimentaba un problema de administración en los procesos de prácticas profesionales y servicio social de los alumnos. El control de dichas actividades se realizaba con hojas de cálculo y en hojas de papel, un método que probó ser ineficiente e insuficiente para satisfacer las necesidades existentes en ese momento. Ello desencadenó el desarrollo del sistema que hoy se conoce como: Sistema de Control de Prácticas Profesionales y Servicio Social (SC-PPySS). El sistema se encuentra en uso desde 2017 y da cuenta de lo efectivo que ha sido para el manejo, optimización y mejora de los procesos.

El SC-PPySS se montó en los servidores físicos de la universidad, utilizando la infraestructura y las instalaciones ya existentes, es decir, en un entorno local u on-premises. On-premises se puede definir como un modelo: “en el modelo local, la organización adquiere e instala el software [y hardware] en los centros de datos locales” (Amazon Web Services, 2024, párr. 2).

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A partir del diagnóstico realizado al SC-PPySS y de entrevistas semiestructuradas y exploratorias realizadas con los usuarios del sistema (egresados,

administrativos y docentes), a lo largo de los años se identificaron los siguientes problemas:

Disponibilidad limitada: la disponibilidad se ve afectada cuando los alumnos reinician o apagan los servidores (3 a 10 días al mes durante varios meses). En algún momento el servidor se quemó y el sistema estuvo fuera de línea durante cinco meses.

Actualizaciones nulas: el *hardware* y el *software* no se han actualizado en mucho tiempo.

Alcance limitado: actualmente sólo se da servicio a licenciaturas de la Escuela.

Ausencia de un respaldo: se almacenan los datos en un solo disco duro.

El cómputo en la nube constituye una alternativa que puede resolver estas problemáticas e incluso traer beneficios adicionales. Google Cloud (2024a) define el cómputo en la nube como la “disponibilidad a pedido de recursos de procesamiento (por ejemplo, infraestructura y almacenamiento), como servicios a través de Internet. Elimina la necesidad de que personas y empresas administren ellas mismas los recursos físicos y sólo paguen por lo que usan” (párr. 4).

1.2 ANTECEDENTES

Antes de explicar cómo resolver los problemas del SC-PPySS, resulta lógico investigar los procesos y resultados obtenidos con anterioridad por otras personas en el mismo contexto que este artículo (instituciones educativas de nivel superior en Oaxaca, México, que quieren aprovechar el cómputo en la nube).

Con este objetivo, se identificó un caso en el que se implementaron tecnologías en la nube en el estado de Oaxaca, específicamente en Instituciones de Educación Superior del Tecnológico Nacional de México (TecNM). García-Orozco (2020) señala que “en las instituciones de educación superior se requiere acceso a diversos dispositivos de cómputo con diferentes sistemas operativos para ayudar en el proceso de enseñanza-aprendizaje de diversas áreas” (p. 5). El autor también hace referencia a OpenStack, una tecnología que “se presenta como una solución al proporcionar recursos de hardware y un mecanismo para administrar y distribuir máquinas virtuales específicas [...] permitiendo, además, el crecimiento horizontal al poder agregar más nodos de cómputo [...] según se requiera” (p. 5). Sin embargo, no explica en su publicación si, finalmente, en los TecNM pudo implementarse la solución de nube. Lo

que puede rescatarse de esta publicación es que en el estado de Oaxaca se han realizado esfuerzos en esta misma rama (universidades) para tratar de integrar el cómputo en la nube, con el propósito de resolver problemas reales.

Ampliando el contexto al resto del mundo, se constata la existencia de más esfuerzos dirigidos a implementar soluciones de nube en universidades. Chihi et al. (2015) resaltan que uno de los factores más importantes para impulsar el cambio, la adopción y la migración a la nube son los procesos organizacionales de las universidades (p. 4); esto se correlaciona directamente con el tema de este trabajo, ya que propone la adopción y migración a la nube de un proceso organizacional de la Escuela. Chihi et al. (2015) plantean un marco de migración adaptado a universidades de Túnez y basado en la plataforma Apache CloudStack; éste posee un enfoque amplio, pues considera todos los niveles organizacionales de dichas universidades, incluyendo desde alumnos hasta administradores de TIC (p. 5). En este artículo se propone un marco de migración adaptado al proceso administrativo de prácticas y servicio de los alumnos.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los beneficios aportados por esta propuesta trascienden la resolución de los problemas planteados. De acuerdo con Google Cloud (2024b), la utilización de la nube conlleva algunas ventajas adicionales, a saber: (1) tiempo de salida al mercado más rápido, (2) escalabilidad y flexibilidad, (3) ahorro de costos, (4) colaboración mejorada, (5) seguridad avanzada y (6) prevención de pérdida de datos (párr. 9-16). Una combinación de los puntos 2, 5 y 6 ayudaría a resolver los problemas del sc-ppyss.

1.4 OBJETIVOS

El objetivo general es definir un marco de migración para el sc-ppyss, de un entorno on-premises a un entorno de nube que corrija los problemas identificados. Asimismo, se enlistan los siguientes objetivos específicos:

- Reducir el tiempo fuera de línea del sistema para mejorar su disponibilidad
- Modernizar el hardware y el software que soportan al sc-ppyss
- Facilitar la escalabilidad del sc-ppyss a más licenciaturas
- Reducir el riesgo de pérdida de información del sc-ppyss
- Implementar una prueba de concepto que valide el marco de migración

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología experimental que define este marco de migración consiste en:

Analizar los elementos que conforman el entorno local del sc-ppyss.

Determinar qué elementos de la nube son equivalentes a los elementos del entorno local.

Definir una versión reducida del sc-ppyss que sirva para llevar a cabo una prueba de concepto de este marco de migración.

Implementar la estrategia *lift-and-shift* como prueba de concepto con la versión reducida del sc-ppyss.

Comparar las condiciones del entorno local con las condiciones del entorno de nube.

Para lograrlo, es imperativo el uso de la estrategia de migración *lift-and-shift*, que define las pautas para migrar las aplicaciones de un entorno fuente (local en este caso) a un entorno de nube, sin realizar cambios a las aplicaciones o a la arquitectura en general (Amazon Web Services, 2025, p. 16). Considerando los objetivos específicos establecidos y las problemáticas a resolver, se realizó una investigación cuantitativa, definiendo los siguientes indicadores: tiempo que el sistema está fuera de línea, versiones de hardware y software que soportan el sistema, número de licenciaturas que soporta el sistema y número de copias existentes de los datos del sistema.

3. RESULTADOS

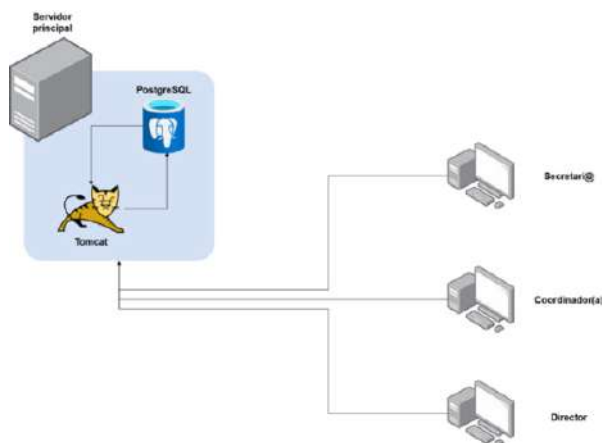
3.1 ELEMENTOS DEL ENTORNO LOCAL

A partir de la observación y la realización de entrevistas se determinó que el sc-ppyss está conformado por cuatro elementos: el *servidor físico*, los *servidores virtuales*, la *infraestructura de red* y los *usuarios*.

El *servidor físico* posee las siguientes características: procesador Intel Core i5 de tercera generación con cuatro núcleos, 8 GB de ram y 500 GB de disco duro. El sistema operativo del servidor es Windows 10. Se cuenta con dos servidores virtuales: un servidor Apache Tomcat 9 (código Java/Groovy), en el que se ejecuta el código con la lógica de negocio, y la base de datos relacional PostgreSQL 10. Los dos servidores virtuales interactúan entre sí mediante el conector JDBC (Java Database Connectivity) de PostgreSQL. En dicha base de datos se almacenan, principalmente, detalles de los alumnos, sus procesos, las empresas y los usuarios. En cuanto a *infraestructura de red* de la univer-

sidad, lo esencial es que el servidor físico se encuentra en la red interna, siendo accesible a los usuarios desde la subred de la Escuela. Los *usuarios* están distribuidos entre las personas que llevan a cabo la labor administrativa de la Escuela: secretarios(as), coordinadores y directores. En la figura 1 se ilustra la arquitectura local del sc-ppyss.

Figura 1. Diagrama de arquitectura del SC-PPySS (on-premises). Fuente: Elaboración propia



Como se observa en la figura 1, la arquitectura consta de pocos elementos: es un servidor físico con dos servidores virtuales embebidos; los usuarios se conectan directamente al servidor Tomcat, ingresando la dirección web del sistema en un navegador y todo se ejecuta dentro de esta subred de la universidad.

3.2 ELEMENTOS EN LA NUBE

La universidad tiene un contrato con Microsoft para utilizar sus servicios de nube. Estos servicios incluyen: gestión de correos electrónicos, almacenamiento, mensajería instantánea, videoconferencias, entre otros. Para aprovechar los servicios existentes, se decidió utilizar Microsoft Azure con una cuenta educativa. Azure es:

Una plataforma de informática en la nube. [...] Ofrece una amplia gama de servicios [...] como análisis, almacenamiento, redes e inteligencia artificial. Los clientes eligen entre estos servicios para desarrollar y escalar nuevas aplicaciones, o ejecutar sus aplicaciones existentes, en la nube (Microsoft, 2025a, párr. 51).

Debido a su correspondencia casi exacta con el entorno local, para la prueba de concepto de la migración se escogieron los siguientes componentes: IP pública, balanceador de cargas, redes virtuales y máquinas virtuales. Cada componente cumple funciones distintas, las cuales son descritas en la sección 3.4 (implementación), en la que también se detalla el contraste de la infraestructura local de la universidad con lo que se construyó en la nube. Existe una correlación directa entre cada uno de los componentes de la infraestructura on-premises y los componentes de la infraestructura en la nube.

3.3 VERSIÓN REDUCIDA DEL SC-PPySS

Las políticas de privacidad y seguridad de la Escuela determinaron que el acceso al ambiente de producción del SC-PPySS esté restringido. Por esta razón se decidió trabajar con una versión reducida del sistema. Ésta posee la misma funcionalidad, la misma estructura de base de datos y los mismos flujos de trabajo que el sistema real, con la crucial diferencia de que no se incluyen datos de los estudiantes, procesos, empresas o dependencias de gobierno, ni de los usuarios existentes en el entorno de producción. Básicamente, se trata de un esqueleto que funciona igual, pero sin los datos del entorno de producción.

Si se desea implementar este marco de migración al sistema completo, la única diferencia es la información en la base de datos. Tendría que migrarse la información del servidor PostgreSQL on-premises a su contraparte en la nube.

3.4 IMPLEMENTACIÓN LIFT-AND-SHIFT DE ON-PREMISES A LA NUBE

En cuanto a los servidores “físicos”, se utilizaron dos en total. Se escribe “físicos” entre comillas pues son dos instancias de máquinas virtuales: una instancia para la aplicación y otra para la base de datos. Estas máquinas virtuales ejecutan el sistema operativo Ubuntu Server 24.04 LTS. Cada una tiene dos núcleos de procesador y 4 GB de ram (SKU Standard B2als v2). En total, los recursos son equivalentes a los del servidor físico on-premises. Es importante utilizar dos instancias, porque si un componente falla, sólo se cae ese componente. Se podría, por ejemplo, tener la base de datos funcionando, aunque se caiga la aplicación o viceversa.

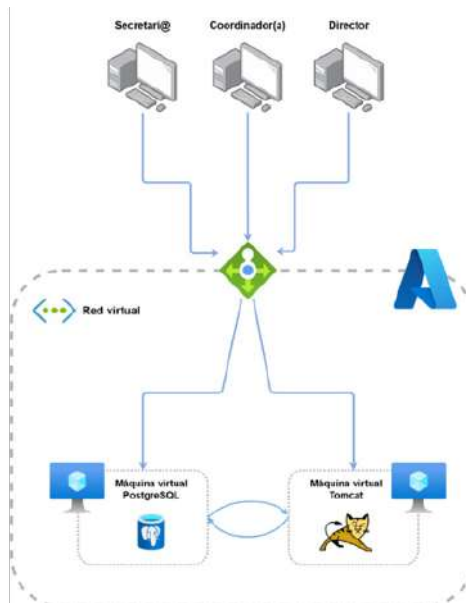
Los servidores virtuales no cambiaron en absoluto. Se sigue teniendo un servidor de base de datos y un servidor de aplicación, uno en cada máquina virtual. Éstos siguen comunicándose entre sí aunque estén en máquinas separadas.

La infraestructura de red es el elemento que experimentó más cambios.

Para poder comunicar el nuevo entorno de nube con el internet, son necesarios los siguientes componentes: una red virtual (virtual network), una subred (subnet), reglas de acceso (network security group), una IP pública y un balanceador de cargas (load balancer). De forma resumida, la IP pública es la cara del entorno de nube, a través de la cual los usuarios pueden acceder. La IP pública está vinculada con el balanceador de cargas, el cual rutea las peticiones hacia la red virtual y la subred en la que residen las máquinas virtuales. Las reglas de acceso definen qué tráfico es permisible en la subred y cuál no lo es.

Los usuarios no experimentaron cambios. Lo único diferente es el vínculo que se utiliza para acceder al SC-PPySS. En la figura 2 se muestra cómo los usuarios deben acceder al entorno de nube, resumiéndose también toda la arquitectura descrita en los últimos párrafos.

Figura 2. Diagrama de arquitectura del sc-ppyss (cloud). Fuente: Elaboración propia



La figura 2 es una sobresimplificación de la arquitectura de la nube, cuyo objetivo es propiciar el buen entendimiento de las audiencias que carecen de conocimiento técnico. La lista completa de recursos de la nube se muestra en la figura 3.

Figura 3. Listado de componentes (cloud). Fuente: Elaboración propia.

Name	Type	Location
ip-default	Public IP address	Mexico Central
key-vm	SSH key	Mexico Central
lb-default	Load balancer	Mexico Central
nsg-default	Network security group	Mexico Central
vm-app	Virtual machine	Mexico Central
vm-app738	Network interface	Mexico Central
vm-app_OsDisk--	Disk	Mexico Central
vm-dt	Virtual machine	Mexico Central
vm-dt519	Network interface	Mexico Central
vm-dt_OsDisk--	Disk	Mexico Central
vn-default	Virtual network	Mexico Central

En la figura 3 aparecen algunos elementos adicionales, los cuales son creados automáticamente por Azure cuando se instancian máquinas virtuales o redes virtuales, por lo que cualquier persona que implemente este marco de migración debería obtener una lista de componentes similar.

3.5 COMPARACIÓN DEL ENTORNO LOCAL CON LA NUBE

A continuación, se describe el contraste entre el estado inicial del sistema y el estado alcanzado tras la implementación del marco de migración como prueba de concepto.

En el *primer problema*, la disponibilidad se vio beneficiada ampliamente por el entorno de nube. Microsoft (2025b) ofrece una disponibilidad de más de 99.99% en sus máquinas virtuales (p. 93). En otras palabras, durante todo el año las interrupciones no superarían 52 minutos.

Para el *segundo problema*, la prueba de concepto modernizó tanto el *hardware* como el *software*. En la parte de *hardware*, y de acuerdo con la documentación de Microsoft (2025c), la máquina virtual se ejecuta sobre un procesador más rápido y nuevo: el AMD EPYC 7763v. Las máquinas virtuales escogidas tienen dos núcleos dedicados cada una de este procesador (párr. 5). En cuanto al *software*, las máquinas virtuales también proveen un sistema operativo más seguro y moderno: Ubuntu Server 24.04 LTS, siendo éstos los elementos más actuales a finales de 2025 (fecha de redacción).

En el *tercer problema*, dada la naturaleza de prueba de concepto, no se agregaron nuevas licenciaturas para utilizar el sistema. Con las facilidades que provee la nube es más sencillo crear nuevas instancias o incrementar los recursos de las máquinas virtuales que hacerlo en servidores físicos en la universidad. Si el marco de migración se aplicara al SC-PPySS completo, facilitaría la escalabilidad a otras licenciaturas.

En el *cuarto y último problema*, los discos administrados ofrecidos por Azure cuentan con al menos tres réplicas dentro del mismo centro de datos. Esto ayuda a que la disponibilidad de los datos sea de 99.999%, incluso si una o hasta dos de estas réplicas fallan (Microsoft, 2025d, párr. 5). Esto resuelve el problema de que el disco duro carezca de respaldo en el servidor físico de la universidad. La tabla 1 resume todos los puntos, incluyendo el antes y el después de la implementación.

Tabla 1. Comparación del estado antes y después de la prueba de concepto.

Indicador	Entorno local	Entorno de nube	Implicación
Tiempo fuera de línea	Aproximadamente 24 días al año (los datos históricos son poco confiables, por lo que se fijó de forma optimista en tres días al mes por ocho meses durante el año)	Máximo 52 minutos al año	El tiempo fuera de línea se redujo en 99.84%
Versiones de <i>software</i>	Sistema Operativo: Windows 10 (el soporte terminó en octubre de 2025)	Ubuntu Server 24.04 (soporte hasta 2036)	Se tiene un sistema operativo más nuevo, seguro y moderno, con soporte hasta 2036
Versiones de <i>hardware</i>	Procesador Intel Core i5 de tercera generación (2012)	Procesadores amd epyc 7763v (2021)	El procesador en la nube es más nuevo, moderno y con arquitectura mejorada
Alcance a más licenciaturas	seis licenciaturas	seis licenciaturas	No se agregan más licenciaturas, pero se facilita la escalabilidad
Copias de la información	una copia	tres copias	Se reduce el riesgo de pérdida de datos del sistema
Notas: Elaborado por los autores			

Otro punto a considerar en la migración a la nube es el costo. Para esta prueba de concepto el costo fue de aproximadamente \$ 1,031.78 pesos mexicanos por mes (véase figura 4).

Figura 4. Costos de la nube. Fuente: calculadora de Azure.

Your Estimate

Resource	Configuration	Uplift	Monthly Cost
Virtual Machines	2 B1ms (1 Core, 2 GB RAM) x 730 Hours (Pay as you go), Lin...	\$0.00	\$30.22
Virtual Network	East US (Virtual Network 1): 0 GB Outbound Data Transfer, ...	\$0.00	\$0.00
Load Balancer	Standard Tier: 4 Rules, 10 GB Data Processed	\$0.00	\$18.30
Managed Disks	Managed Disks, Standard SSD, LRS Redundancy, E4 Disk Ty...	\$0.00	\$5.00
IP Addresses	Basic (Classic), 0 Dynamic IP Addresses X 730 Hours, 1 Stati...	\$0.00	\$2.63

Support

Support: Basic (Included) \$0.00

Select your program/offer

Licensing program: Microsoft Customer Agreement (MCA) [Link to see your Azure agreement pricing.](#)

Show Dev/Test Pricing

Estimated upfront cost \$0.00

Estimated monthly cost \$56.15

4. CONCLUSIONES

Después de completar la prueba de concepto, se probó que es factible implementar el marco de migración en la versión reducida del sistema, lo que abre la posibilidad a que también pueda implementarse al sistema completo. Se resolvieron todas las problemáticas planteadas y se cumplieron todos los objetivos específicos.

La disponibilidad de los recursos es un compromiso que Microsoft asume con el cliente, por lo que está prácticamente garantizado que el tiempo fuera de línea sea igual o menor a 52 minutos anuales. En cuanto al hardware, Microsoft se encarga de mantener actualizado el hardware subyacente de las máquinas virtuales; en consecuencia, el procesador siempre será reciente. Hablando del software, los administradores del sistema pueden mantener al día las herramientas y el sistema operativo simplemente ingresando de forma periódica a las máquinas virtuales y aplicando las actualizaciones automáticas. Finalmente, las tres copias de seguridad de los datos derivan de un compromiso asumido por Microsoft con el cliente, por lo que siempre estarán ahí esos respaldos en caso de cualquier eventualidad.

El número de licenciaturas soportadas no aumentó, pues la prueba de concepto se realizó únicamente para demostrar que es posible implementar el marco de migración. Éste es más un problema administrativo que del marco

de migración, en el que la universidad no ha expandido el uso del SC-PPySS a otras licenciaturas. El SC-PPySS ya cuenta con la funcionalidad para soportar alumnos de otras licenciaturas.

Para implementar este marco de migración es necesario tener conocimientos especializados en informática, desarrollo de *software*, infraestructura de nube, redes y diseño de arquitectura de sistemas.

4.1 RECOMENDACIONES

Para investigaciones próximas, se recomienda realizar estudios de beneficios o perjuicios económicos en los que se incurra al aplicar este marco de migración a la nube. Es posible que ese gasto se vea compensado por la reducción de costos de mantenimiento de hardware/software y la mejora de la productividad del personal administrativo, que tendrá el sistema disponible durante más tiempo.

También se recomienda analizar los riesgos de la migración a la nube, tales como: dependencia del proveedor y seguridad de la información. En el caso particular de la universidad, depender completamente de un solo proveedor (Microsoft), puede dar lugar a problemas planteados por otros autores, entre ellos: capacidad limitada para adaptarse a las necesidades cambiantes, no poder aprovechar ofertas competitivas o afectar la rentabilidad y la innovación (Alhosban et al., 2024, p. 3).

REFERENCIAS

- Alhosban, A., Pesingu, S., y Kalyanam, K. (2024). CVL: A Cloud Vendor Lock-In Prediction Framework. *Mathematics*, 12(3), 387. <https://doi.org/10.3390/math12030387>
- Amazon Web Services (2024). ¿Cuál es la diferencia entre SaaS y el modelo local? Centro de conceptos de computación en la nube. https://aws.amazon.com/es/compare/the-difference-between-saas-and-on-premises/?ncl=h_ls
- Amazon Web Services (2025). Guide for aws large migrations. aws Prescriptive Guidance. <https://docs.aws.amazon.com/pdfs/prescriptive-guidance/latest/large-migration-guide/large-migration-guide.pdf#migration-strategies>
- Chihi, H., Chainbi, W., y Ghdira, K. (2015, noviembre 17-20). Cloud computing architecture and migration strategy for universities and higher education [Presentación de conferencia]. 2015 IEEE/ACS 12th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA), Marrakech, Marruecos. <https://doi.org/10.1109/AICCSA.2015.7507140>
- García-Orozco, D. (2020). OpenStack: una alternativa de Infraestructura como servicio para instituciones de educación superior. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información*, 8(15), 1-7. <https://doi.org/10.36825/RITI.08.15.001>
- GoogleCloud (2024a). ¿Qué es la computación en la nube? Temas de Google Cloud. <https://cloud.google.com/learn/what-is-cloud-computing?hl=es-419>
- Google Cloud (2024b). Ventajas y desventajas de la computación en la nube. Temas de Google Cloud. <https://cloud.google.com/learn/advantages-of-cloud-computing>
- Microsoft (2025a). ¿Qué es Azure? Preguntas más frecuentes. <https://azure.microsoft.com/es-mx/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-azure/#FAQ-8>
- Microsoft (2025b). Virtual Machines. Service Level Agreement for Microsoft Online Services.

[https://www.microsoft.com/licensing/docs/documents/download/OnlineSvcConsolidatedSLA\(WW\)\(English\)\(February_2025\)\(CR\).docx](https://www.microsoft.com/licensing/docs/documents/download/OnlineSvcConsolidatedSLA(WW)(English)(February_2025)(CR).docx)

Microsoft (2025c). 'B' family general purpose VM size series. Virtual Machines. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/virtual-machines/sizes/general-purpose/b-family>

Microsoft (2025d). Introduction to Azure managed disks. Virtual Machines. <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/virtual-machines/managed-disks-overview>

Prieto Díaz, V., Quiñones La Rosa, I., Ramírez Durán, G., Fuentes Gil, Z., Labrada Pavón, T., Pérez Hechavarría, O., y Montero Valdés, M. (2011). Impacto de las tecnologías de la información y las comunicaciones en la educación y nuevos paradigmas del enfoque educativo. *Educación médica superior*, 25(1), 95-102. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412011000100009&lng=es&tlng=es

Ruiz-Lázaro, J., Jiménez-García, E., Huetos-Domínguez, M. (2025). Revisión sistemática sobre el uso de la tecnología en educación y el compromiso de los estudiantes en la última década. *Campus Virtuales*, 14(1), 139-152. <https://doi.org/10.54988/cv.2025.1.1318>

Derechos de Autor© 2025 Alonso Tovar, Ángel Daniel; García Jarquin, Brenda



Este texto está protegido por una licencia [Creative Commons 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). Usted es libre para Compartir, copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato y adaptar el documento, remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.