Aplicaciones de la optomecatrónica en la agricultura de precisión.

Applications of optomechatronics in precision agriculture.

Madaín Pérez Patricio* (1).
Tecnológico Nacional de México/I. T. de Tuxtla Gutiérrez.
madain.pp@tuxtla.tecnm.mx.

Abiel Aguilar González (2). Instituto Nacional de Astrofísica, Optica y Electrónica, abiel@inaoep.mx.

Juan Antonio de Jesús Osuna Coutiño (3). Tecnológico Nacional de México/IT de Tuxtla Gutiérrez, antonio.osuna@tuxtla.tecnm.mx.

Ernesto Alonso Ocaña Valenzuela (4). Tecnológico Nacional de México/IT Comalcalco, alonso.ov@comalcalco.tecnm.mx.

*corresponding author.

Artículo recibido en septiembre 12, 2026; aceptado en octubre 14, 2026.
Esta conferencia fue presentada en el Primer Encuentro de Investigación en Óptica, Optoelectrónica y Optomecatrónica 2022.

Resumen.

La integración de sistemas optomecatrónicos en la agricultura de precisión ofrece soluciones automatizadas, no invasivas y en tiempo real para el monitoreo biológico. Este artículo presenta dos aplicaciones principales que combinan óptica, mecánica, electrónica y computación: la evaluación del estado fisiológico en plantas mediante un sistema de fluorescencia inducida por láser y la optimización del pastoreo avícola utilizando visión por computadora y automatización. Se describe el uso de configuraciones ópticas especializadas y algoritmos de aprendizaje automático para identificar deficiencias nutricionales en forraje verde hidropónico y el uso de edge computing para automatizar el desplazamiento de jaulas basado en el comportamiento de las aves.

Palabras clave: Agricultura de precisión, aprendizaje automático, estimación de pose, fluorescencia inducida por láser, optomecatrónica.

Abstract.

The integration of optomechatronic systems in precision agriculture offers automated, non-invasive, real-time solutions for biological monitoring. This article presents two main applications combining optics, mechanics, electronics, and computing: the evaluation of the physiological state in plants using a laser-induced fluorescence system and the optimization of poultry grazing using computer vision and automation. The use of specialized optical configurations and machine learning algorithms to identify nutritional deficiencies in hydroponic green fodder and the use of edge computing to automate cage movement based on bird behavior are described.

Keywords: Laser-induced fluorescence, machine learning, optomechatronics, pose estimation, precision agriculture.

1. Introducción.

Cuidar la salud de nuestros cultivos y ecosistemas es vital para asegurar el futuro de la agricultura y nuestro medio ambiente. En la búsqueda de incrementar la productividad en el campo de forma sostenible, ha surgido una gran aliada tecnológica: la optomecatrónica. Esta fascinante disciplina combina la óptica (el uso de la luz, láseres y cámaras), la mecánica y la electrónica o computación para crear herramientas capaces de monitorear la naturaleza con una precisión que antes parecía de ciencia ficción. En este artículo, exploraremos cómo la tecnología optomecatrónica une dos grandes metas que están transformando la agricultura de precisión. Por un lado, abordaremos el análisis del estado fisiológico de las plantas; veremos cómo el uso de rayos láser en entornos controlados de laboratorio nos permite "leer" la salud de especies invaluables, mucho antes de que el ojo humano o los métodos visuales tradicionales noten algún daño por estrés, contaminación o sequía. Por otro lado, descubriremos cómo estas mismas bases tecnológicas de captura óptica se aplican para lograr un pastoreo eficiente en aves de corral. Usando cámaras e inteligencia artificial para la estimación de pose en gallinas, los productores pueden traducir el comportamiento de un rebaño en un indicador directo de la cantidad y calidad de pastura disponible en el suelo. Ambos enfoques demuestran que observar la naturaleza a través de sensores optomecatrónicos es el futuro para maximizar el rendimiento agrícola y proteger los ecosistemas. Pero, ¿cómo logramos exactamente que un láser nos hable de la salud de un cultivo? La respuesta se encuentra en el interior de las hojas, en una molécula que todos conocemos: la clorofila.

2. La clorofila, el valioso Neem y los estudios de laboratorio.

La clorofila no es solo el pigmento que le da el color verde a las plantas; es el motor de la vida vegetal. Su trabajo principal es atrapar la luz del sol y convertirla en energía, lo que se conoce como fotosíntesis (Legendre et al. 2021). Cuando la luz del sol choca contra una hoja, la energía atrapada por la clorofila tiene tres caminos: usarse para la fotosíntesis, disiparse como calor, o emitirse como un tenue brillo invisible llamado fluorescencia (Zhang et al. 2018).

Para entender la vital importancia de medir este brillo, los científicos se han enfocado en especies de altísimo valor estratégico, como el árbol de Neem (Azadirachta indica). Este árbol es considerado un verdadero tesoro en la agricultura porque sus hojas y semillas producen metabolitos secundarios (como la azadiractina) que funcionan como pesticidas y fungicidas biológicos muy potentes, controlando plagas sin dejar residuos tóxicos en el ecosistema. Sin embargo, el Neem se utiliza frecuentemente en la reforestación urbana, donde se enfrenta a niveles críticos de contaminación vehicular y metales pesados que asfixian sus estomas y destruyen su clorofila desde adentro, amenazando la producción de estas valiosas sustancias. Es aquí donde el protocolo de análisis optomecatrónico marca la diferencia. En lugar de realizar observaciones imprecisas a la intemperie, el método propuesto exige que las hojas de Neem sean cortadas y llevadas a un ambiente de laboratorio estrictamente controlado. Al aislar la muestra de las variaciones del clima, los investigadores logran medir la salud celular con exactitud (Pérez-Patricio et al. 2018).

Estudios reportados en este tipo de protocolos demuestran que cuando las plantas se exponen a estrés (como radiación UV, falta de agua o polución urbana), la planta intenta defenderse produciendo pigmentos protectores (como antocianinas). En el laboratorio, el escáner láser detecta cómo cambian las proporciones de los colores que emite la hoja; por ejemplo, se observan alteraciones claras en el cociente de fluorescencia azul frente a la fluorescencia roja (F410/F550) y verde. Al medir estos cambios sutiles bajo condiciones controladas, el protocolo permite confirmar que el árbol está enfermo mucho antes de que las hojas muestren manchas amarillas o sequedad.

La revolución del láser (LIF): Leyendo el estrés de manera impecable.

La tecnología que hace posible este nivel de diagnóstico en el laboratorio se llama Fluorescencia Inducida por Láser (LIF) y sus componentes se muestran en la figura 1. Los aparatos tradicionales (fluorómetros con pinzas) requerían tocar la hoja y oscurecerla por media hora, lo que además de lento, podía inducir un estrés mecánico (Lei et al. 2018). Con el sistema LIF dentro del laboratorio, se dispara un rayo láser de alta precisión a la hoja recién cortada. El láser excita a la clorofila y fuerza a la hoja a emitir su fluorescencia natural. Los sensores de las computadoras miden principalmente dos tonos invisibles: la luz roja (alrededor de los 685 nanómetros) y la luz rojo lejano (cerca de los 735 nanómetros). En una hoja sana y repleta de clorofila, la luz roja es absorbida por la propia hoja, por lo que casi no

logra salir hacia el sensor. Pero si la hoja de Neem está intoxicada por la ciudad, su clorofila se rompe y deja de absorber; repentinamente, la luz roja "escapa" de la hoja y el sensor la capta en grandes cantidades. La computadora simplemente divide el nivel de luz roja entre la luz rojo lejano; si el número sube, es una alarma matemática indudable de que la planta está sufriendo estrés.

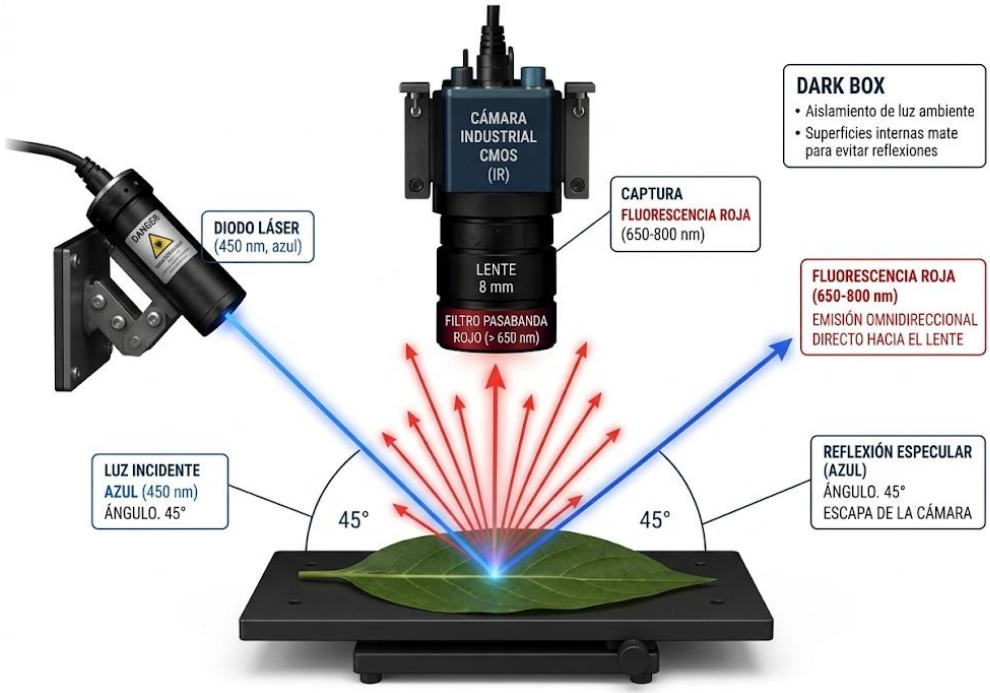


Figura 1. Configuración del sistema óptico.

3. De las plantas a los animales: La estimación de pose en gallinas para evaluar pastizales.

La optomecatrónica y la captura visual no solo sirven para diagnosticar hojas en un laboratorio; esta misma ciencia de la imagen está transformando la manera en que manejamos a los animales en el campo. A través de la llamada Agricultura de Precisión en Ganadería (Precision Livestock Farming), el análisis óptico se usa para monitorear aves de corral y, sorprendentemente, evaluar la salud del suelo que pisan. La clave de este avance es la estimación de pose en gallinas (Guo et al. 2020). Utilizando cámaras colocadas sobre los pastizales (visión "top-down") y programas de Inteligencia Artificial (específicamente redes neuronales como los algoritmos YOLOX y EfficientNet), el sistema es capaz de observar a docenas de gallinas simultáneamente y "dibujar" un esqueleto virtual sobre ellas. La computadora localiza puntos anatómicos clave: el centro del cuerpo, la cabeza y las patas. Midiendo las distancias matemáticas entre estos puntos, el algoritmo clasifica al instante la postura exacta del ave: si está descansando, de pie, caminando o en una pose activa de forrajeo, picoteando y rascando la tierra (Waldmann et al. 2024). ¿Por qué es esto importante para el campo? Porque la postura y el comportamiento del animal actúan como un sensor biológico de la disponibilidad de la pastura. Los estudios en ecología del pastoreo demuestran que las aves adaptan su presupuesto de tiempo según la calidad del alimento que encuentran. Si el pasto es abundante, denso y nutritivo, las gallinas logran llenarse con poco esfuerzo. Como resultado, pasan mucho más tiempo en posturas estáticas, descansando o socializando tranquilamente.

Por el contrario, si la parcela empieza a quedarse sin forraje verde o el pasto es maduro y de mala calidad, el comportamiento de las gallinas cambia drásticamente. El tiempo invertido en posturas de forrajeo activo, buscando alimento y moviéndose aumenta, porque necesitan invertir mucha más energía y esfuerzo para satisfacer su apetito. Al tener cámaras vigilando constantemente estas poses, el granjero no necesita salir al campo a medir o pesar el pasto manualmente. Si el sistema detecta que el porcentaje de gallinas en "postura de forrajeo activo" sube por encima de lo normal en una parcela, lanza una alerta advirtiendo que el forraje se está agotando. Esto permite implementar un

sistema de rotación perfecto, moviendo a las aves a pasto fresco en el momento ideal, garantizando que los animales no pasen hambre y que la tierra no sufra por sobrepastoreo. La figura 2 representa un bosquejo de este sistema de rotación alimentaria.

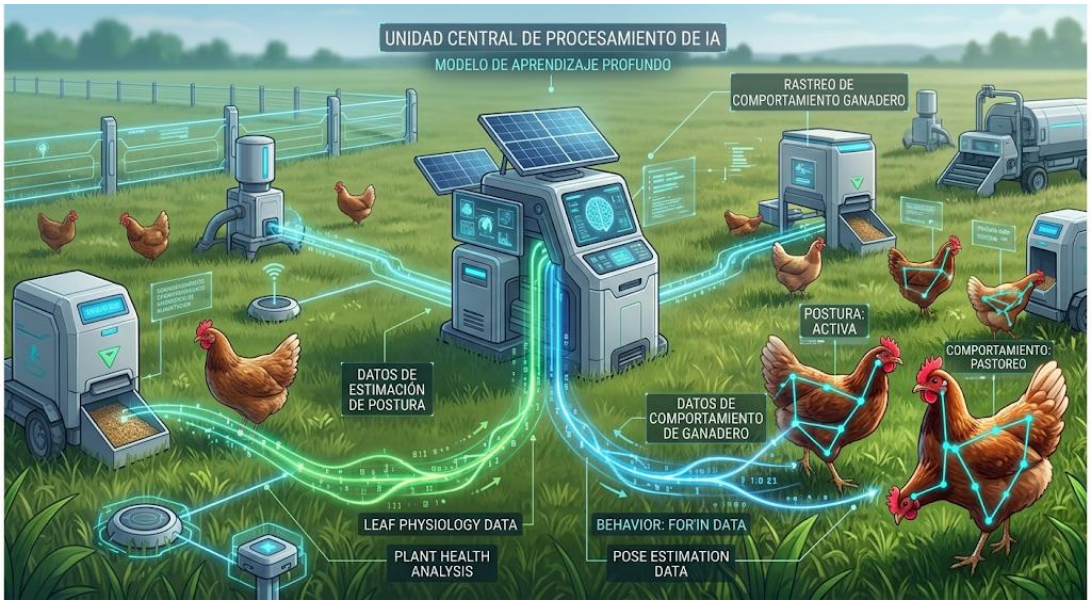


Figura 2. Estimación de pose para optimización del pastoreo.

4. Inteligencia artificial: El cerebro detrás del láser y las cámaras.

Ya sea que estemos capturando el espectro de colores invisibles que rebota de una hoja de Neem o analizando los puntos clave de la postura de cientos de gallinas, estamos generando millones de datos por segundo. El cerebro que da sentido a esta información es la Inteligencia Artificial (IA). Los modelos matemáticos (como las redes neuronales de retropropagación) aprenden a reconocer patrones en los datos crudos. En el laboratorio, la IA compara el espectro láser con historiales de hojas sanas y enfermas para diagnosticar qué contaminante específico está afectando a la planta. En el campo, procesa el video para filtrar sombras, reflejos o cruces entre las aves, logrando una precisión milimétrica en la identificación de la postura. La integración de estos algoritmos convierte a los sensores optomecatrónicos en verdaderos "asesores virtuales" capaces de tomar decisiones autónomas para el bienestar agroecológico.

Conclusiones.

La optomecatrónica está derribando las barreras de lo que podemos gestionar en la agricultura. Entender que el estrés de las plantas se manifiesta en un sutil cambio del brillo de su clorofila nos ha permitido desarrollar protocolos de análisis LIF en laboratorio, asegurando diagnósticos precisos sin interferencias climáticas. Gracias a esto, podemos proteger reservas naturales vitales como el árbol de Neem (Azadirachta indica) ante la toxicidad urbana. De forma paralela, el uso de cámaras inteligentes con estimación de pose nos permite comprender la salud de un ecosistema entero simplemente interpretando las posturas de pastoreo de las gallinas, evitando la degradación del suelo y optimizando la nutrición animal. Estamos entrando a una era donde el cuidado de la naturaleza se apoya en la precisión tecnológica, fusionando el mundo microscópico de la fluorescencia vegetal y la dinámica visual del comportamiento animal para asegurar un futuro más verde y productivo.

Créditos.

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto a través de la convocatoria de fortalecimiento de cuerpos académicos PRODEP 2023.

Referencias bibliográficas.

Guo, Ning, Baohua Zhang, Jun Zhou, Ketian Zhan, and Shuang Lai. (2020) *Pose Estimation and Adaptable Grasp Configuration with Point Cloud Registration and Geometry Understanding for Fruit Grasp Planning.* Computers and Electronics in Agriculture. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105818.

Legendre, Reeve, Nicholas T. Basinger, and Marc W. van Iersel. (2021) *Low-Cost Chlorophyll Fluorescence Imaging for Stress Detection.* Sensors 21, no. 6: 2055. https://doi.org/10.3390/s21062055.

Lei, Bo, Zhong-hua Bian, Qi-chang Yang. (2018) *The Positive Function of Selenium Supplementation on Reducing Nitrate Accumulation in Hydroponic Lettuce (Lactuca Sativa L.).* Journal of Integrative Agriculture 17, no. 4: 837–46. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(17)61759-3.

Pérez-Patricio, Madaín, Jorge Luis Camas-Anzueto, Avisaí Sanchez-Alegría (2018) *Optical Method for Estimating the Chlorophyll Contents in Plant Leaves.* Sensors 18, no. 2: 650. https://doi.org/10.3390/s18020650.

Waldmann, Urs, Alex Hoi Hang Chan, Hemal Naik. (2024) *3D-MuPPET: 3D Multi-Pigeon Pose Estimation and Tracking.* International Journal of Computer Vision 132, no. 10: 4235–52. https://doi.org/10.1007/s11263-024-02074-y.

Zhang, Xin, Dongxian He, Genhua Niu, Zhengnan Yan, and Jinxiu Song. (2018) *Effects of Environment Lighting on the Growth, Photosynthesis, and Quality of Hydroponic Lettuce in a Plant Factory.* International Journal of Agricultural and Biological Engineering, no. 2: 2. Mechanization. https://doi.org/10.25165/ijabe.v11i2.3420.

Información de los autores.



Madaín Pérez Patricio es graduado como Doctor en Ciencias en Automatización y Computación Industrial en 2005, por la Universidad de Ciencias y Tecnologías de Lille, Francia. Investigador y Docente desde 1997 en el Departamento de Posgrado y la Carrera en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Es miembro del Claustro Doctoral "Doctorado en Ciencias de la Ingeniería" perteneciente al Programa Nacional de Posgrados de Calidad, I.T. de Tuxtla Gutiérrez desde 2016. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, nivel II.



Abiel Aguilar González es Investigador postdoctoral en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE), con dos doctorados en Ciencias Computacionales y Electrónica y Sistemas. Especialista en visión por computadora, inteligencia artificial y cómputo embebido, con aplicaciones en vehículos autónomos, metrología y sistemas en tiempo real. Fue galardonado con el Best Paper Award en la ICDSC 2016, en París, Francia, y seleccionado para la beca Eiffel del gobierno francés en 2017. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel 1, y participó en el desarrollo del módulo MBT de PolyWorks AR. Cuenta con 15 publicaciones JCR, 263 citas y un índice h de 8. Es Editor Asociado del Journal of Real-Time Image Processing (Springer) y ha realizado 291 revisiones por pares. Su trayectoria incluye docencia, dirección de tesis de posgrado, evaluación de proyectos internacionales, colaboración editorial con Pearson México y actividades de divulgación científica.



Juan Antonio de Jesús Osuna Coutiño es profesos de tiempo completo en la escuela de tecnologías de la UNACH en las carreras de Inteligencia artificial. Además, es Doctor egresado del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, con una Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica y un título en Ingeniería Industrial por el Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Áreas de investigación son el procesamiento de imágenes, el aprendizaje profundo y la implementación de modelos transformadores. Actualmente, mi enfoque se dirige a la automatización del monitoreo agrícola, con el objetivo de fortalecer la soberanía alimentaria mediante tecnologías avanzadas. Como estudiante, en 2016 desarrollé una metodología para aplicaciones de Realidad Aumentada, presentada en la conferencia internacional más destacada en esta área a nivel mundial (ISMAR). En 2017, expuso un algoritmo de odometría visual basado en flujo óptico en la Universidad de Stanford (ICDSC). Ha trabajado en la traducción y revisión de libros para Pearson México. Finalmente, he participado en charlas de divulgación en YouTube (IA que volará tu cabeza Dr. Antonio O pepe&chema), alcanzando más de 440,000 visualizaciones.



Ernesto Alonso Ocaña Valenzuela es Doctor en Ingeniería Aplicada por el Colegio Tenam de Tuxtla Gutierrez, Chiapas. Es profesor investigador de tiempo completo en el Instituto Tecnológico Superior de Comalcalco desde el 2008, perteneciente a la academia de Ingeniería Mecatrónica. Es perfil deseable Prodep desde el año 2023 y líder del cuerpo académico “Soluciones Electrónicas y Mecatrónicas para el Industria”.