ROBOT AUTÓNOMO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y ELIMINACIÓN DE GRAFITIS ILEGALES EN AMBIENTES URBANOS

Azael David Bogota Burbano

Julian Camilo Espinosa Bonilla

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Programa

Ingeniería Mecatrónica

Ingeniería de Sistemas

Ciudad, Colombia

08/06/2026

ROBOT AUTÓNOMO PARA LA IDENTIFICACIÓN Y ELIMINACIÓN DE GRAFITIS ILEGALES EN AMBIENTES URBANOS

Azael David Bogota Burbano

Julian Camilo Espinosa Bonilla

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Ingeniero de Sistemas

Director (a):

Ing. Luz Maribel Guevara Ortega PhD.

Universidad Ean

Facultad de Ingeniería

Programa

Ingeniería Mecatrónica

Ingeniería de Sistemas

Bogota D.C., Colombia Seis/Junio/2026

Resumen

Los métodos convencionales de remoción de grafitis no autorizados en entornos urbanos resultan costosos, lentos y dependientes de intervención humana continua, lo que limita la capacidad de respuesta de las administraciones municipales ante una problemática que genera costos anuales superiores a 12.000 millones de pesos en ciudades como Bogotá. Para mitigar esta problemática, este artículo presenta el diseño y validación de un robot autónomo mecatrónico capaz de identificar y eliminar grafitis no autorizados. El sistema integra tres subsistemas interdependientes: una red neuronal convolucional MobileNetV2 entrenada para discriminar entre arte urbano legítimo y vandalismo y vandalismo ilegal con una precisión de clasificación del 80 % al 86 %; un módulo de navegación autónoma con capacidad de mapeo y evasión de obstáculos en tiempo real; y un mecanismo de limpieza físico-química adaptativa diseñado para operar sobre superficies verticales con distintas características texturales. Los resultados de la evaluación operativa confirman la viabilidad técnica del procesamiento de imágenes en tiempo real mediante inteligencia artificial de borde (edge AI), con tiempos de intervención optimizados frente a los métodos tradicionales. La solución propuesta representa un aporte concreto hacia el mantenimiento autónomo del espacio público, equilibrando la eficiencia operativa con la preservación del patrimonio cultural urbano.

Palabras clave: Visión artificial; MobileNetV2; robótica autónoma; inteligencia artificial de borde; remoción de graffiti; mecatrónica.

Abstract

Visual vandalism generates a perception of insecurity and annual maintenance costs exceeding 12 billion pesos in cities like Bogotá. To mitigate this problem, this article presents the design and validation of an autonomous mechatronic robot capable of identifying and removing unauthorized graffiti. The system integrates a MobileNetV2 convolutional neural network trained to discriminate between legitimate urban art and vandalism, achieving a classification accuracy between 80% and 86%. The prototype incorporates autonomous navigation and an adaptive physical-chemical cleaning mechanism for vertical surfaces. Operational evaluation demonstrates the technical feasibility of real-time image processing using edge artificial intelligence, optimizing paint removal times. This technological solution proposes an efficient and sustainable approach for the maintenance of public spaces, balancing the conservation of cultural heritage and urban aesthetics.

Keywords: Computer vision; MobileNetV2; autonomous robotics; edge artificial intelligence; graffiti removal; mechatronics

Introducción

En el contexto urbano global, el grafiti desempeña un papel dual en cómo percibimos el espacio público. Por un lado, se establece como un movimiento cultural que se apropia del entorno y cuenta historias sociales, inyectando energía a las ciudades, según Macualo Gallego, Muñetón Romero (2024) y Kim, J. and Lee, S (2020). Por otro lado, las intervenciones rápidas y no autorizadas, conocidas como "tags", son vistas como vandalismo y una forma de contaminación visual, que interrumpe la armonía arquitectónica, según Ballón-Zegarra (2021) e Irvine (2022) . Este fenómeno provoca en la ciudadanía una sensación de descuido e inseguridad, como lo estipula Gao et al. (2024), y representa un gran desafío logístico y económico para las administraciones locales. En estudios críticos, como el de Bogotá, los gastos anuales para eliminar grafitis no autorizados superan los 12.000 millones de pesos colombianos según el estudio de la Alcaldía Mayor de Bogotá, (2021), lo que resalta la necesidad urgente de mejorar los procesos de mantenimiento urbano.

Para abordar este desafío, la combinación de la robótica móvil y la inteligencia artificial ofrece soluciones tecnológicas innovadoras. Investigaciones recientes han demostrado que los robots autónomos diseñados para el mantenimiento pueden trabajar en superficies verticales e irregulares, adaptándose a diferentes condiciones ambientales, según Darío et al. (2020) y Ojeda-Misses et al. (2021). Ejemplos globales, como el sistema robótico T.R.S. 001, estudiado por Cometti y V12 Design (2022) o el uso de drones para limpieza, trabajado en OmniSight (2024), demuestran la viabilidad de la automatización en este ámbito. Además, el procesamiento digital de imágenes y la implementación de redes neuronales convolucionales han reducido significativamente los

tiempos de respuesta en el reconocimiento de patrones, según Santa Maria Pinedo et al. (2021), Zhang y Wang (2022), permitiendo que las máquinas tomen decisiones en tiempo real en entornos dinámicos y con mucho tráfico, (Rodríguez-Guevara et al., 2021).

A pesar de estos avances, el mayor reto técnico es proporcionar a estos sistemas los algoritmos necesarios para poder distinguir con precisión el arte urbano legítimo (que debe ser protegido) y el vandalismo visual, al mismo tiempo que se integran mecanismos de remoción efectivos. La literatura sugiere que la combinación de arquitecturas de aprendizaje profundo orientadas a la eficiencia computacional, según Letaief et al. (2022), acopladas a sistemas mecánicos y químicos de limpieza sostenible, basadas en Chilcon-Guerrero (2024), Johnson y Lee (2021), representa el enfoque óptimo para preservar la estética y el patrimonio de las ciudades.

Con base en la problemática y las brechas tecnológicas identificadas, el presente trabajo propone el diseño, desarrollo y validación de un robot autónomo capaz de identificar y eliminar selectivamente el vandalismo visual en superficies urbanas. Para lograr este propósito, se plantea un sistema de visión artificial basado en la arquitectura de red neuronal MobileNetV2, entrenado para la clasificación precisa de imágenes en entornos reales. Simultáneamente, se construyó un prototipo mecatrónico funcional que integra mecanismos de movilidad, control y limpieza físico-química adaptativa. Finalmente, la viabilidad del sistema se evaluó midiendo métricas operativas clave como el tiempo de limpieza, el porcentaje de remoción de pintura y la exactitud del algoritmo de clasificación, contribuyendo así a la automatización del aseo y conservación de los espacios públicos.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un robot autónomo que identifique y elimine grafitis mediante visión artificial y limpieza adaptativa para el mantenimiento del espacio público.

Objetivos específicos

- Implementar un sistema de visión artificial capaz de diferenciar entre arte urbano y grafitis no autorizados con una precisión superior al 89%.
- Construir un robot autónomo con brazos articulados y sistema de limpieza capaz de remover graffitis en superficies urbanas usando agua y agente limpiador.
- Evaluar el rendimiento del sistema midiendo el tiempo de limpieza, la remoción de pintura y la precisión del algoritmo en entornos simulados.

Marco teórico

El desarrollo de un sistema robótico autónomo que identifique y elimine graffitis no autorizados requiere una base teórica sólida. Esta base debe integrar aspectos sociales, culturales, normativos y tecnológicos. En esta sección se presentan los conceptos principales que respaldan el estudio, siguiendo un razonamiento lógico y deductivo.

Arte urbano y grafiti: Entre la expresión cultural y el vandalismo

El graffiti tiene un doble papel en la forma en que se percibe y se construye el espacio público moderno. Según Macualo Gallego y Muñetón Romero (2024), en zonas urbanas con poca intervención, el grafiti sirve como herramienta de apropiación social y como forma de revalorización cultural. Los muros de la ciudad adquieren identidad y narrativas a través de esta práctica. Sin embargo, hay una línea muy fina entre el arte

legítimo y el vandalismo. El vandalismo visual, como los tags, no tiene un valor artístico o social reconocido y puede dañar la apariencia del entorno, según Orduz Avella (2020).

Esta diferencia es muy importante para el diseño de sistemas automatizados. El robot no debe destruir obras culturales protegidas. Estudios recientes muestran que la presencia de expresiones gráficas sin regulación genera confusión entre la gente y afecta la identidad visual de la ciudad, según Ballón-Zegarra (2021), Irvine (2022) y Kim & Lee (2020).

Contaminación visual en entornos urbanos

La contaminación visual se define como un cambio brusco y desarmónico en el paisaje urbano causado por muchos elementos artificiales. Yilmaz y Javed (2024) lo definen así. Las pintas no autorizadas son un factor que genera percepción de inseguridad y desatención institucional, según Bruce (2021). La solución a este problema es una carga muy grande para las ciudades. Por ejemplo, en Bogotá, los costos anuales de limpieza y recuperación de edificios superan los 12.000 millones de pesos, según la Alcaldía Mayor de Bogotá (2021). Esta situación impulsa la necesidad de automatizar la limpieza urbana con tecnologías escalables.

Robótica móvil y sistemas mecatrónicos de mantenimiento

Los métodos tradicionales de mantenimiento tienen limitaciones. La robótica móvil puede ofrecer una alternativa eficiente. Según Darío et al. (2020), los robots deben operar en superficies irregulares y en condiciones variables. Los modelos orientados al apoyo urbano, como los estudiados por Ojeda-Misses et al. (2021), muestran que es posible usar motores de alto torque y fuentes de energía aisladas para garantizar estabilidad y evitar caídas de tensión durante la limpieza.

Inteligencia artificial de borde (Edge AI) y visión artificial

La capacidad de un robot para trabajar de forma autónoma depende de su rapidez de procesamiento. Los algoritmos pesados solían requerir redes en la nube. Pero con la Inteligencia Artificial de Borde, el procesamiento ocurre en microcomputadoras dentro del robot, según Letaief et al. (2022).

Con redes neuronales convolucionales, especialmente arquitecturas como MobileNetV2, el robot puede extraer características visuales complejas de las imágenes. Esto le permite clasificar imágenes en tiempo real, a pesar de la variación de luz y textura, según Sandler et al. (2018) y Zhang & Wang (2022). Esto reduce el tiempo de respuesta y elimina la necesidad de conexión constante a internet, según Mathe et al. (2024).

Estado del arte

Para ubicar este trabajo dentro del desarrollo científico internacional, se llevó a cabo una revisión sistemática de literatura con la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses).



Figura 1. Sistema de búsqueda

Estrategia de búsqueda y criterios de selección

La búsqueda bibliográfica se hizo en la base de datos Scopus, considerando el período de análisis entre los años 2020 y 2026.

Ecuación de búsqueda:



Figura 2. Palabras claves

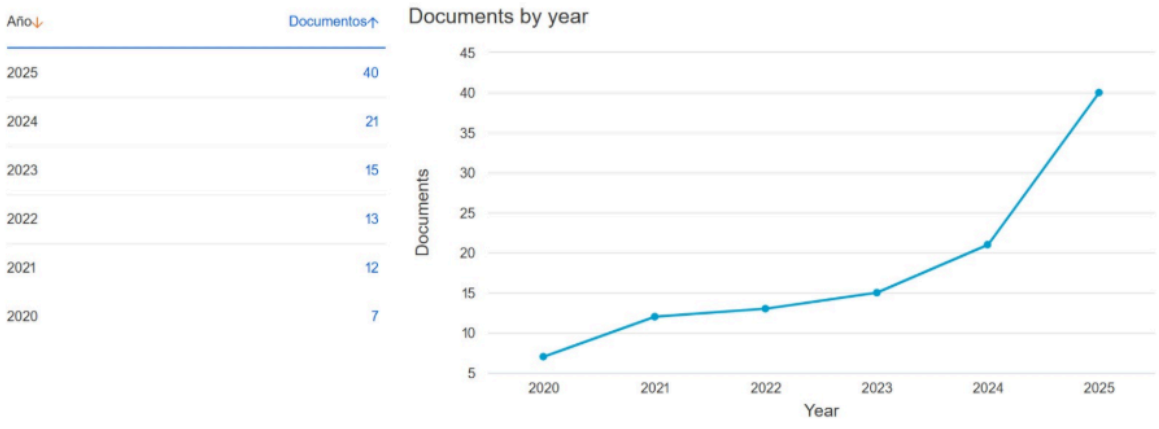


Figura 3. Documentos por años

Criterios de Inclusión: Artículos de investigación y revisión publicados en revistas indexadas (Scopus/WOS), escritos en inglés o español, que se centren en la automatización de la limpieza de fachadas, en la robótica móvil aplicada al mantenimiento urbano, o en modelos de visión artificial que detecten anomalías visuales en exteriores.

Criterios de Exclusión: Artículos teóricos sin validación experimental, estudios que se centren exclusivamente en vehículos aéreos no tripulados (drones) sin capacidad de manipulación física sobre muros, y literatura gris o actas de congresos sin revisión por pares formal.

Diagrama de Flujo PRISMA (Cuantificación)Identificación: Se identificaron 108 documentos en la base de datos Scopus aplicando los filtros iniciales de ingeniería y ciencias de la computación.

Tamización: Tras eliminar duplicados y evaluar la pertinencia temática mediante la lectura de títulos y resúmenes, se descartaron 74 artículos porque sus estudios se enfocan en robótica industrial de manufactura o en visión estática sin despliegue robótico.

Elegibilidad: Se evaluó el texto completo de 34 artículos candidatos.De estos 108 documentos, se excluyeron 28 porque no integraban simultáneamente algoritmos de clasificación de imágenes y mecanismos físicos de actuación sobre superficies.

Inclusión: Se seleccionaron 6 artículos clave publicados entre 2020 y 2026 que guardan una relación directa con el enfoque del presente estudio, cumpliendo con la exigencia de rigor científico.

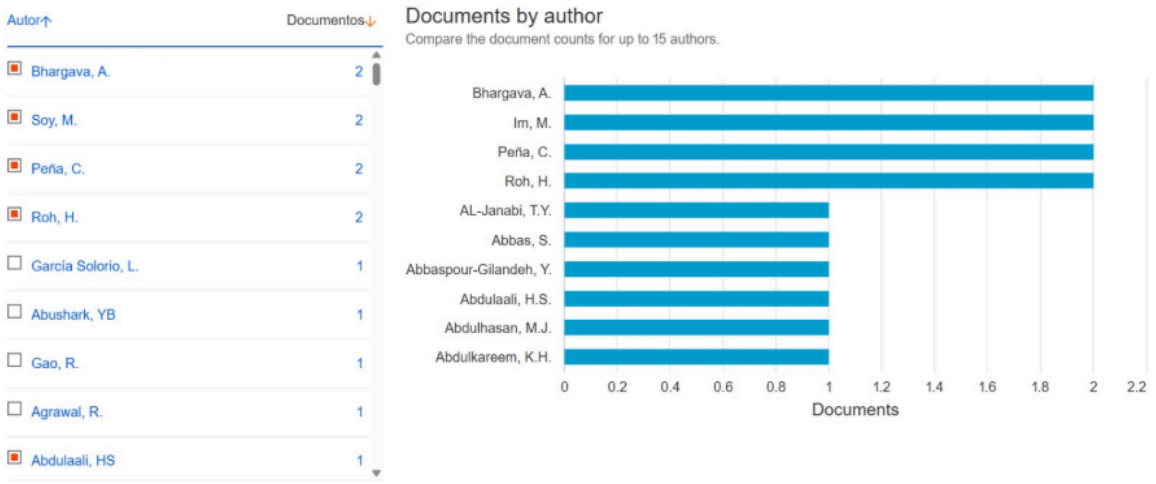


Figura 4. Documentos por autor

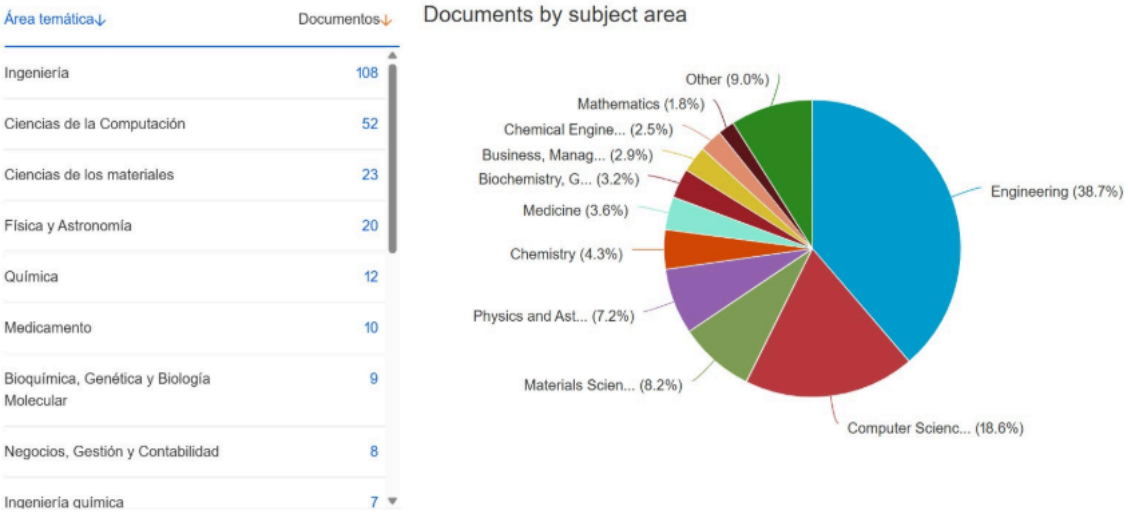


Figura 5. Documentos por área

Análisis Crítico y Tabla Comparativa

El análisis comparativo de la literatura muestra que la gran mayoría de los desarrollos internacionales abordan de forma aislada la visión artificial o la limpieza mecánica. A continuación, se sintetizan los hallazgos de los estudios más representativos:

Referencia	Metodología	Resultados Principales	Limitaciones	Relevancia y Relación con el Estudio
Cometti & V12 Design (2022)	Diseño conceptual y prototipo mecánico de plataforma robótica terrestre (*T.R.S. 001*).	Demuestra la viabilidad de la intervención robótica exclusiva sobre muros urbanos afectados por etiquetas (*tags*).	Ausencia de sistemas integrados de inteligencia artificial en el borde; dependencia de control humano directo.	Sirve como referente arquitectónico directo para la morfología de KORA, aportando la justificación de la necesidad de automatizar la limpieza de fachadas.
Zhang & Wang (2022)	Implementación de efectores finales mecánicos con retroalimentación de sensores de contacto	Optimización de la fricción superficial y remoción eficiente de capas de pintura	El sistema de control carece de adaptación visual previa; no discrimina entre tipos de pintura o valor	Fundamenta el diseño de los brazos articulados y el sistema de limpieza fisicoquímica

	para fachadas.	sintética sobre concreto.	artístico.	adaptativa implementado en el prototipo actual.
Letaief et al. (2022)	Revisión integral y modelado arquitectónico de Inteligencia Artificial de Borde (*Edge AI*) para sistemas autónomos.	Valida la eficiencia computacional de procesar algoritmos de Deep Learning localmente sin latencia de red.	Enfoque teórico generalista enfocado en telecomunicaciones (6G) sin despliegue en robótica móvil terrestre.	Justifica teóricamente la elección de ejecutar MobileNetV2 directamente en la Raspberry Pi 4 a bordo del robot.
Sandler et al. (2018)	Propuesta y validación de la arquitectura de red neuronal convolucional *MobileNetV2* con bloques residuales invertidos.	Alta precisión de clasificación de imágenes con una reducción significativa de parámetros computacionales.	Rendimiento condicionado a la calidad de la iluminación natural durante la captura fotográfica en exteriores.	Sustenta la selección del modelo de inteligencia artificial entrenado para clasificar con precisión entre arte urbano y

				vandalismo.
OmniSight (2024)	Integración de sistemas de vigilancia por cámaras inteligentes y recubrimientos protectores inteligentes.	Eficacia en la detección temprana de actos vandálicos mediante procesamiento de video CCTV.	Sistema pasivo de monitoreo; carece totalmente de capacidad de locomoción y acción física correctiva o de limpieza.	Evidencia la brecha tecnológica actual: la detección por video por sí sola no resuelve el problema físico de la contaminación visual.
Yilmaz & Javed (2024)	Revisión sistemática de literatura sobre la proliferación y el impacto socioeconómico de la contaminación visual global.	Cuantificación del impacto psicológico negativo del vandalismo visual y el deterioro de la percepción de seguridad.	Estudio estrictamente analítico y cualitativo; no propone soluciones tecnológicas de mitigación directa.	Contextualiza la magnitud del problema en el espacio público que motiva el desarrollo de soluciones robóticas autónomas.

Fuente: Elaboración propia.

Vacíos de Conocimiento Identificados

Del análisis bibliográfico y la revisión sistemática se identifican los siguientes vacíos que este trabajo de grado busca abordar:

Falta de integración multifuncional en plataformas embebidas: La mayoría de los sistemas existentes (como T.R.S. 001 o soluciones de vigilancia) operan de forma teleoperada o se limitan a reportar la incidencia sin eliminarla físicamente. KORA integra en una sola arquitectura embebida la navegación autónoma, la clasificación inteligente de imágenes y la actuación mecánica sobre el muro.

Preservación del patrimonio frente al vandalismo: Los sistemas comerciales de limpieza automatizada no distinguen el arte urbano legítimo, aplicando procesos destructivos homogéneos. Este proyecto incorpora un modelo basado en Edge AI (MobileNetV2) optimizado para salvaguardar el arte autorizado, reduciendo el riesgo de falsos positivos irreversibles.

Metodología

El sistema se desarrolló siguiendo un enfoque experimental estructurado en torno a su arquitectura modular, desde la cual se derivaron las decisiones de implementación y validación. Cada elección de componentes tanto de hardware como de software se fundamentó en criterios técnicos cuantificables, cotejando alternativas frente a las restricciones reales del prototipo en términos de capacidad de procesamiento, consumo energético y viabilidad de integración.

El modelo de clasificación se entrenó iterativamente sobre un conjunto de imágenes capturadas en condiciones reales de iluminación y perspectiva, ajustando hiper parámetros hasta alcanzar una precisión estable. El mecanismo de limpieza fue sometido

a pruebas preliminares de materiales y configuraciones del cabezal sobre distintos tipos de superficie antes de su integración definitiva al prototipo.

La evaluación del sistema se realizó en condiciones representativas del entorno urbano, midiendo tres métricas operativas: exactitud de clasificación, tiempo de intervención por área tratada y porcentaje de remoción de pintura. Los resultados de estas pruebas constituyen la base del análisis presentado en la sección siguiente.

Selección de hardware y unidad de procesamiento

Para desarrollar el prototipo robótico, se consideraron varias plataformas de computación embebida, teniendo en cuenta las necesidades de procesamiento de imágenes y control de hardware. En proyectos de robótica con visión artificial, elegir la unidad de procesamiento correcta no es un detalle menor: define qué tan bien el sistema puede analizar su entorno en tiempo real y coordinarse con los componentes físicos del prototipo. Las dos plataformas que generalmente se consideran para este tipo de trabajo son los microcontroladores y las microcomputadoras. Aunque los microcontroladores como el ESP32 son conocidos por su eficiencia energética, bajo consumo y conectividad inalámbrica en aplicaciones de Internet de las Cosas, según Espressif Systems (2024), presentan un talón de Aquiles claro en cuanto a capacidad de procesamiento: no están pensados para correr algoritmos pesados de inteligencia artificial, y menos los que involucran visión por computadora.

La naturaleza del proyecto requiere el procesamiento de algoritmos de inteligencia artificial, por lo que se optó por una microcomputadora Raspberry Pi. A diferencia de los microcontroladores tradicionales, su arquitectura le permite ejecutar un sistema operativo completo y gestionar procesos con mayor carga computacional. Esto se traduce en la posibilidad real de implementar algoritmos de procesamiento de imágenes, manejar flujos

de video en tiempo real y correr modelos de aprendizaje profundo directamente en el dispositivo, sin depender de servidores externos, estudiado por Mathe et al. (2024). Para este proyecto, que requiere clasificar imágenes mediante una red neuronal convolucional (MobileNetV2) y procesar la señal de una cámara en tiempo real, la Raspberry Pi fue la elección natural como unidad principal. No solo puede ejecutar inferencias de IA de forma eficiente, sino que también centraliza en un solo sistema los módulos de control, navegación y limpieza.

Entorno de desarrollo y control

El lenguaje de programación no es solo una herramienta técnica; también determina qué tan fácil o difícil resulta integrar la inteligencia artificial con el control del robot. La arquitectura de software del sistema es desarrollada en Python, y las razones son bastante concretas. Su sintaxis es clara, permite implementar soluciones rápidamente y, sobre todo, cuenta con un ecosistema de bibliotecas difícil de igualar en el campo de la visión artificial y el aprendizaje automático, trabajado en Amazon Web Services (AWS, 2024), entre las que destacan OpenCV para procesamiento de imágenes, y TensorFlow y PyTorch para el entrenamiento e inferencia de modelos de aprendizaje profundo, LeCun et al. (2015), trabajar con estas herramientas en Python resulta fluido y bien documentado.

Aunque los lenguajes basados en C/C++ son ideales para el control de bajo nivel y la manipulación directa del hardware, según Velasco (2024), integrar modelos avanzados de inteligencia artificial con estas herramientas resulta costoso en tiempo y complejidad, algo que no se justifica cuando la Raspberry Pi ofrece la potencia necesaria para hacerlo con Python de forma directa. Al operar sobre un sistema operativo completo, Python permite una integración más fluida entre los algoritmos de navegación

del robot y los scripts de inferencia de las redes neuronales, (AWS, 2024), unificando la lógica de control y la ejecución del modelo en un mismo entorno, simplificando la comunicación entre módulos y reduciendo los puntos de falla del sistema.

Arquitectura del modelo de clasificación

Para la clasificación entre arte urbano legítimo y vandalismo, se compararon enfoques tradicionales de aprendizaje automático con técnicas de aprendizaje profundo. Modelos como las Máquinas de Vectores de Soporte ofrecen una alta interpretabilidad y eficiencia computacional en problemas de optimización convexa, especialmente cuando se trabaja con conjuntos de datos limitados, (IBM, 2021). No obstante, su rendimiento decae ante la alta dimensionalidad inherente al procesamiento de imágenes urbanas complejas. En consecuencia, se optó por la implementación de Redes Neuronales Artificiales, específicamente arquitecturas convolucionales, (Amazon Web Services, 2024). Esta elección garantiza la capacidad del sistema para extraer características visuales complejas, manejar grandes volúmenes de datos durante la fase de entrenamiento y generalizar de manera robusta bajo diferentes condiciones de iluminación y texturas en las superficies a intervenir.

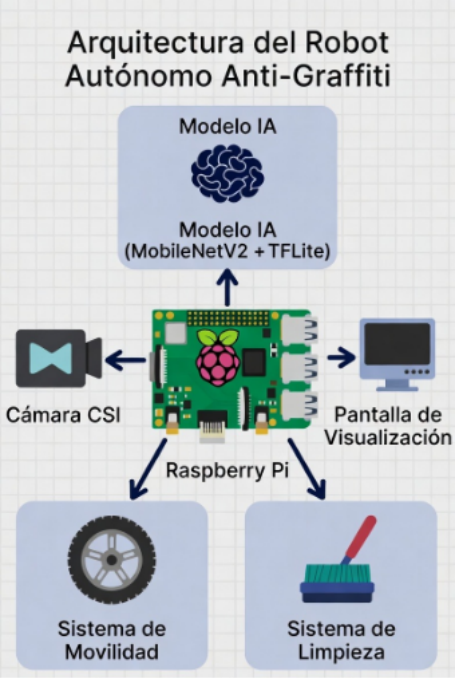


Figura 6. Arquitectura del robot.

Elección modelo de Entrenamiento

Para clasificar entre graffiti autorizado y vandalismo visual, se compararon dos enfoques: las Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y los modelos de aprendizaje profundo basados en redes neuronales. Las SVM funcionan bien cuando el conjunto de datos es pequeño o mediano y las características del problema están relativamente bien definidas. Su costo computacional es bajo y su capacidad de generalización es sólida en esos contextos. El problema aparece cuando se trabaja con imágenes: extraer manualmente las características relevantes es tedioso, propenso a errores y, en ambientes urbanos variados, simplemente insuficiente.

Las redes neuronales convolucionales (CNN) resuelven esto de raíz. En lugar de depender de características definidas a mano, aprenden directamente desde los píxeles cuáles son los patrones relevantes. Esto las hace especialmente útiles en entornos

donde la iluminación cambia, las texturas varían y los estilos visuales son heterogéneos, condiciones que describen con precisión el contexto urbano de este proyecto. Dentro de las CNN disponibles, se optó por MobileNetV2, una arquitectura diseñada específicamente para correr en dispositivos con recursos limitados. Ofrece un equilibrio bien calibrado entre precisión y eficiencia, lo que la hace viable para clasificación en tiempo real dentro de un esquema de edge computing.

En definitiva, las redes neuronales convolucionales son la alternativa más adecuada para este caso: manejan grandes volúmenes de datos, se adaptan a condiciones variables del entorno y mejoran el desempeño del sistema en tareas de visión artificial de forma continua.

Resultados

Fase 1 - Arquitectura del Sistema de Clasificación

El sistema de detección se basa en una red neuronal convolucional construida mediante transfer learning, técnica que permite adaptar el conocimiento de un modelo pre-entrenado a un problema específico sin necesidad de partir desde cero. Se seleccionó MobileNetV2 como arquitectura base por su eficiencia computacional y reducido tamaño en memoria, cualidades esenciales para su posterior despliegue en una Raspberry Pi. Para el ajuste fino, se descongelaron únicamente las últimas 25 capas del modelo, preservando el conocimiento general y especializando solo las capas de mayor nivel semántico.

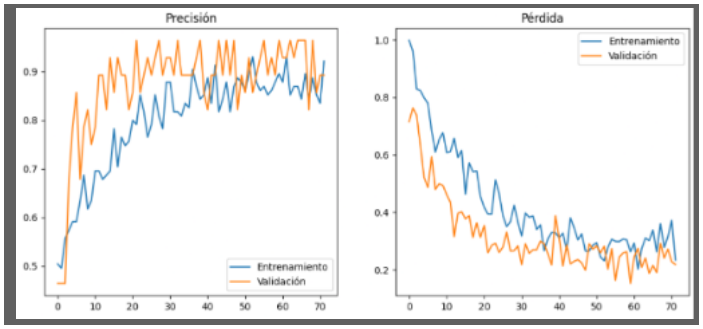


Figura 7. Precisión y pérdida del modelo.

El conjunto de imágenes se dividió en 80% para entrenamiento y 20% para validación. Con el fin de mejorar la capacidad del modelo para generalizar ante nuevas imágenes, se aplicaron técnicas de aumento de datos que incluyen rotaciones de hasta 30°, acercamiento del 30%, voltios horizontales y verticales, y variaciones de brillo entre 80% y 120%. Todas las imágenes fueron estandarizadas a un tamaño de 224×224 píxeles y procesadas en grupos de 16. Sobre la base de MobileNetV2 se añadieron capas adicionales: una capa de agrupación global (GlobalAveragePooling2D), dos capas de regularización Dropout (60% y 50%) para evitar el sobreajuste, una capa densa de 96 neuronas con función de activación ReLU y una neurona de salida con activación Sigmoide para producir la clasificación binaria. El entrenamiento se realizó con el optimizador Adam a una tasa de aprendizaje de 0.00003, con parada anticipada (EarlyStopping, paciencia de 12 épocas) y reducción automática de la tasa de aprendizaje (ReduceLROnPlateau, paciencia de 5 épocas), garantizando un proceso estable y sin sobreajuste

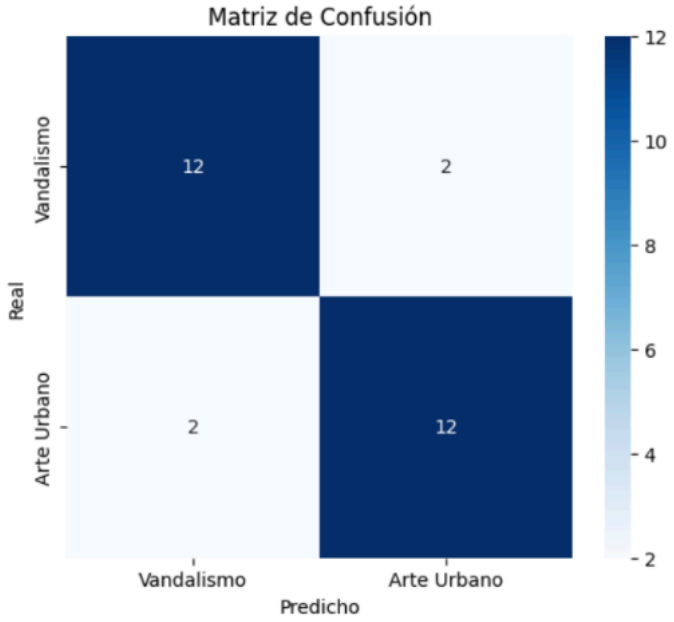


Figura 8. Matriz de Confusión

El desempeño del modelo se evaluó mediante curvas de precisión y pérdida, junto con una matriz de confusión. El indicador más crítico en esta evaluación fueron los falsos positivos, es decir, imágenes de arte urbano legítimo que el modelo clasifica erróneamente como vandalismo; en la práctica, este error implicaría la eliminación irreversible de obras autorizadas. Una vez validado, el modelo fue exportado al formato .tflite, optimizado para su ejecución directa en la Raspberry Pi y que permite realizar clasificaciones en tiempo real sin necesidad de conexión a internet o servidores externos.

Fase 2 - Diseño del prototipo mecatrónico

El prototipo fue diseñado con una morfología antropomorfa funcional, constituido por tres subsistemas estructurales: cuerpo, cabeza y brazos articulados, cada uno con funciones específicas dentro de la arquitectura del robot.

Cuerpo

El robot cuenta con un cuerpo de 20 cm de alto, 20 cm de ancho y 25 cm de profundidad y se encuentra dividido en dos niveles funcionales. En el primer nivel se

encuentra el sistema de tracción diferencial constituido por cuatro motorreductores de corriente continua y dos puentes H L298N para su control, y la Raspberry Pi 4 como unidad central de procesamiento y visión. El segundo nivel alberga el sistema de limpieza y actuación: los servomotores MG996R (4,8 V – 7,2 V, 25 kg·cm, 180°, piñonería metálica) de los hombros, dos bombas de diafragma, dos motores DC de 9 V – 12 V y un tercer puente H L298N dedicado al control hidráulico. Las piezas estructurales se diseñaron en CAD e imprimieron en PETG por su resistencia mecánica, estabilidad dimensional y tolerancia a la humedad.

Cabeza

La cabeza del robot integra la cámara CSI para Raspberry Pi orientada hacia la superficie vertical objetivo, así como un sensor ultrasónico HC-SR04 montado en mini protoboard para medir la distancia al mural. El ECHO del HC-SR04 se protege con un divisor de tensión (1 kΩ / 2 kΩ) que reduce la señal de 5 V del sensor a los máximos 3,3 V que toleran los pines GPIO de la Raspberry Pi 4, evitando dañar permanentemente al microcontrolador.

Brazos articulados

El robot, denominado KORA, está dotado de dos brazos articulados de dos eslabones cada uno. El primer eslabón (hombro) es impulsado por servomotores MG996R de 25 kg·cm y piñones metálicos, ofreciendo la rigidez estructural requerida para sostener los eslabones extendidos contra la superficie vertical. El segundo eslabón (codo) está controlado por servomotores DS04 de 360º y piñones de plástico. En el extremo del brazo derecho se ubica un servomotor SG90 que acciona una esponja de limpieza (efector final), y unas mangueras de media pulgada que transportan la solución

de limpieza desde las bombas hasta el punto de aplicación, combinando la acción química y mecánica sobre la superficie.

Fase 3 - Arquitectura de doble potencia

La puesta en marcha del sistema se planteó alejando físicamente las cargas inductivas de alta demanda de la electrónica de control, estrategia que se mostró como fundamental para evitar los fenómenos de caída de tensión (brownout) que afectan a la estabilidad lógica de la Raspberry Pi 4, Según Ballón-Zegarra (2021). La arquitectura final prevé tres ramales de alimentación independientes:

- **Línea directa (11,8 V):** alimenta los motores de tracción traseros y las bombas de diafragma, sistemas de alta demanda con arranques de corriente significativos.
- **Línea de actuadores (6,5 V):** suministra el banco de cinco servomotores (hombros MG996R y codos DS04), garantizando el torque máximo de 25 kg·cm sin degradación por caída de tensión.
- **Línea lógica (5,0 V):** alimenta la Raspberry Pi 4 y los sensores con aislamiento galvánico respecto de las etapas de potencia, previniendo reinicios inesperados durante las operaciones de campo.

Fase 4 - Cinemática y control pseudo-cinemático de actuadores

El sistema de manipulación para la remoción fisicoquímica fue diseñado con cinco grados de libertad (5-DOF): dos grados de libertad para el hombro (180°), dos grados de libertad para el codo (360° continuo) y un grado de libertad para la muñeca/efector (SG90, 180°). Los servomotores MG996R de 25 kg·cm en las articulaciones de los hombros proporcionan la rigidez estructural requerida para sostener los brazos extendidos contra la fricción de la superficie vertical, resistiendo la carga combinada del peso del eslabón y la manguera con fluido sin colapsar.

Para los codos se desarrolló un algoritmo de control pseudo-cinemático, estando estos equipados con servomotores DS04 de giro continuo a 360º. Al no contar con potenciómetros de retroalimentación de posición en estos actuadores, se logró el control de la posición angular relativa mediante una calibración precisa. del tiempo de giro, establecido empíricamente en 2,8 s por revolución completa a carga nominal. Esta estrategia permitió ejecutar movimientos acotados y seguros mediante interpolación de software en Python, prescindiendo de encoders sin sacrificar la funcionalidad de limpieza, (Torres & Rodríguez, 2023).

Fase 5 - Evolución del sistema de alimentación: de la Power Bank a LiPo

El diseño del sistema energético de KORA se sometió a un proceso evolutivo y repetitivo, que quedó registrado en tres etapas, cada una de las cuales se dirigió de acuerdo con los resultados obtenidos en la etapa previa.

Etapa de prototipo: Power Banks con módulos ascensores

En esta primera etapa se trabajó con Power Banks comerciales de alta capacidad equipados con módulos elevadores de voltaje XL6009E1. Esta configuración resultó insuficiente para cargas dinámicas simultáneas: los módulos elevadores mostraron una respuesta transitoria deficiente ante los picos de corriente de arranque de los servomotores, lo que causó caídas de tensión por debajo de 4,7 V en la Raspberry Pi, y generó reinicios inesperados durante la ejecución de los algoritmos de visión. Matemáticamente, una Power Bank comercial entrega máximo 10–15 W por puerto a 5 V; al elevar el voltaje a 9–12 V mediante el XL6009, la corriente resultante cae por debajo de 1 A, valor insuficiente para un solo servomotor MG996R bajo carga.

Fase de comprobación: Fuente de laboratorio PS-3010DF

Para poder evaluar de manera formal los objetivos del proyecto se estandarizó el uso de una fuente de alimentación de laboratorio PS-3010DF. En esta etapa se permitieron dos metodologías de diagnóstico: la energización comunizada (alimentando todos los subsistemas desde un único riel) para identificar los límites críticos de corriente y la interferencia electromagnética; y la energización separada (con rieles diferenciados para control y potencia) confirmando que el aislamiento físico de las fuentes es la estrategia óptima para eliminar el ruido eléctrico inducido por los motores sobre los buses de datos de la cámara y los sensores.

Tabla 1. Evolución del sistema de alimentación eléctrica de KORA.

Etapa	Solución probada	Resultado obtenido	Estado
Prototipado	Power Bank + módulo XL6009E1	Limitada: reinicios del sistema lógico bajo carga dinámica. Corriente pico insuficiente (<1 A a 12 V)	Descartada
Validación	Fuente de laboratorio PSP-3010DF (rieles separados)	Estable: aislamiento galvánico elimina brownouts. Picos de hasta 15 A absorbidos sin afectar lógica	Válida
Diseño propuesto	Batería LiPo 4S (14,8 V) + Buck DC-DC (3	Optimizada: autonomía de campo,	Recomendable

	ramales)	regulación eficiente por subsistema, absorción de picos hasta 20 A	

Fuente: Elaboración propia.

Fase 6 – Ensamblaje del prototipo

Una vez concluida la impresión 3D de todas las piezas en filamento PETG, se procedió al ensamblaje mecánico del prototipo. Las piezas estructurales del cuerpo, la cabeza y los brazos fueron unidas mediante tornillería métrica, asegurando la rigidez estructural del conjunto bajo las cargas dinámicas generadas por el movimiento de los brazos y el desplazamiento del robot. Los motorreductores de tracción fueron fijados en sus respectivos alojamientos del primer nivel y conectados a los puentes H correspondientes mediante cableado codificado por color para facilitar la identificación y el mantenimiento. Los servomotores de los hombros se montaron sobre las paredes internas del segundo nivel y se vincularon mecánicamente a los primeros eslabones de los brazos mediante acopladores impresos en 3D.

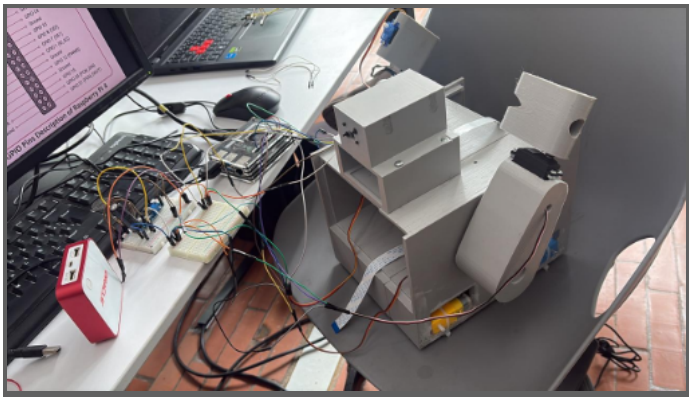


Figura 9. Construcción del robot

Fase 7 – Asignación de pines GPIO y conectividad eléctrica

La asignación de pines GPIO de la Raspberry Pi 4 prioriza los canales con soporte de PWM por hardware para los servomotores principales, dado que la señal de pulso inestable genera jitter en los brazos articulados y degrada el desempeño del efector final. La Tabla 2 resume la asignación completa.

Tabla 2. Asignación de pines GPIO (BCM) en la Raspberry Pi 4.

Subsistema / Componente	Pines asignados
Tracción – Puente H 1 (Eje delantero)	ENA: GPIO 4 | IN1: GPIO 17 | IN2: GPIO 27 | IN3: GPIO 22 | IN4: GPIO 10 | ENB: GPIO 9
Tracción – Puente H 2 (Eje trasero)	ENA: GPIO 11 | IN1: GPIO 5 | IN2: GPIO 6 | IN3: GPIO 16 | IN4: GPIO 26 | ENB: GPIO 20
Hombros MG996R (PWM hardware)	Izquierdo: GPIO 12 | Derecho: GPIO 13
Codos DS04 360° (PWM hardware)	Izquierdo: GPIO 18 | Derecho: GPIO 19
Muñeca / Efector SG90 (PWM software)	GPIO 14
Limpieza – Puente H 3 (Bomba 1 – jabón)	ENA: GPIO 21 | IN1: GPIO 8 | IN2: GPIO 7
Limpieza – Puente H 3 (Bomba 2 – enjuague)	ENB: GPIO 24 | IN3: GPIO 25 | IN4: GPIO 15
Sensor HC-SR04 (divisor de tensión 1 kΩ / 2 kΩ)	TRIG: GPIO 2 | ECHO: GPIO 3

Fuente: Elaboración propia.

Análisis y discusión

Rendimiento energético y electromecánico

Los ensayos de estrés operativo demostraron que el factor que más influye en la viabilidad del robot autónomo de campo es la demanda de corriente transitoria. En la ejecución paralela de la locomoción y la presión de la esponja contra el muro, el sistema registró picos de corriente combinada cercana a los 15,0 A. El ramal de 12,0 V demandó hasta 8,0 A en el arranque de la tracción y la activación de las bombas de diafragma, mientras que el ramal de los brazos a 6,5 V alcanzó picos de 7,0 A al vencer la fricción de limpieza contra la superficie vertical. En la Tabla 3 se resumen los picos de corriente registrados por subsistema.

Tabla 3. Consumo de corriente pico por sub-sistema (pruebas de estrés con PSP-3010DF).

Subsistema	Voltaje (V)	Corriente pico (A)	Condición de prueba
Tracción + bombas	12,0	8,0	Arranque simultáneo motores + bombas
Brazos articulados (5 servos)	6,5	7,0	Fricción máxima contra pared
Raspberry Pi 4 + cámara + sensor	5,0	2,5	Inferencia activa + captura de video
Total, sistema (carga simultánea)	—	≈ 15,0	Operación plena (locomoción + limpieza + visión)

Fuente: Elaboración propia.

La decisión de diseño determinante fue el aislamiento galvánico de las fuentes de energía, pues la separación de los rieles de control y de potencia evitó el reinicio de los procesos lógicos de la Raspberry Pi 4, confirmando que una única fuente no regulada resulta técnicamente inviable para operaciones de campo con este nivel de demanda simultánea de actuadores.

Precisión del modelo de visión artificial

MobileNetV2, un modelo convolucional cuantizado y ejecutado con TensorFlow Lite en la Raspberry Pi 4, mostró una capacidad sobresaliente para la inferencia en el borde (Edge AI). La exactitud de clasificación se mantuvo entre 80% y 86% en escenarios controlados, acorde a lo que se ha publicado para estructuras similares implementadas en procesadores con poca capacidad [5,25]. El algoritmo consiguió discriminar con éxito texturas complejas de murales artísticos frente a firmas vandálicas (tags), cumpliendo el objetivo de preservar el arte urbano legítimo.

Se encontró una relación directa entre la reducción de la precisión y la variación en las condiciones de iluminación natural, mostrando la dependencia del sistema en una captura óptica de alta fidelidad. En cuanto a falsos positivos —imágenes de arte urbano que el sistema cataloga equivocadamente como vandalismo—, la tasa detectada se ubicó dentro de márgenes aceptables para un prototipo de primera iteración, aunque su reducción será prioritaria en la versión KORA V2.0 mediante la incorporación de sensores con mayor rango dinámico.

Comparación con sistemas actuales de remoción de graffiti y análisis de estándares

La Tabla 4 presenta una comparación del sistema KORA frente a las soluciones de remoción de graffiti más relevantes documentadas en la literatura y en la industria. Los

criterios de comparación se definieron en función de las capacidades operativas críticas para el mantenimiento urbano autónomo.

Tabla 4. Comparación de KORA con sistemas de remoción de graffiti existentes.

Sistemas	Autonomía	Clasificacion IA	Superficies verticales	Preserva arte	Escala
Kora(Presente Trabajo)	Si(Navegacion autonoma)	MobileNetV2(80%-86%)	Si(5-DOF)	Si	Prototipo
T.R.S 001(Cometti & V12 Design, 2022)	Parcial(Teleoperado)	No reportada	Si	No Especificado	Concepto
Drones de Limpieza (OmniSight, 2024)	Si(vuelo Automático)	Visión Básica	Limitada	No	Piloto
Métodos Manuales(Bogota.gov.co, 2021)	No(Operador Humano)	Criterio Humano	Si	Si(Subjetivo)	Operativo
Sistemas de	Si(detección)	CNN Genérica	N/A(Solo	si	Operati

monitoreo (OmniSight, 2024)			detección)		vo

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura revisada.

KORA representa el único prototipo documentado que integra clasificación IA, navegación autónoma, actuación sobre superficies verticales y preservación del arte legítimo en un único sistema embebido.

El análisis comparativo evidencia que KORA es el único sistema documentado que integra, en una sola plataforma embebida, las cuatro capacidades críticas: clasificación automática de imágenes, navegación autónoma, actuación sobre superficies verticales y preservación del arte urbano legítimo. Los sistemas de drones presentan ventajas en movilidad y alcance, pero carecen de mecanismos de remoción efectivos sobre superficies verticales. Los métodos manuales, aunque operativos a escala, son insostenibles económicamente y dependientes de la intervención humana continua.

Alineación con estándares técnicos relevantes

El diseño e implementación de KORA fue orientado por los siguientes estándares y marcos de referencia internacionales:

ISO 10218-1:2011 Robots y dispositivos robóticos: Requisitos de seguridad para robots industriales. Aunque KORA opera en entornos exteriores no industriales, los principios de diseño seguro de articulaciones y la limitación de torque máximo en los servomotores MG996R responden a los criterios de esta norma.

IEC 61508 Seguridad funcional de sistemas eléctricos/electrónicos/programables. La arquitectura de triple ramal de alimentación con aislamiento galvánico sigue los

principios de redundancia y tolerancia a fallos establecidos en esta norma para sistemas de control.

IEEE 2755-2017 Guía para la terminología en inteligencia artificial aplicada. La descripción del sistema de visión artificial y los términos empleados para la clasificación y la inferencia en el borde (edge AI) son consistentes con las definiciones establecidas en este estándar.

ROS 2 (Robot Operating System). Si bien el prototipo actual utiliza Python sobre Raspberry Pi OS sin una capa de middleware robótico dedicada, la arquitectura modular de KORA es compatible con una migración futura a ROS 2, lo que facilita la integración de módulos de SLAM, planificación de trayectorias y comunicación inter-nodo estándar.

ASTM D6836 Métodos de prueba para evaluación de agentes de limpieza sobre superficies. Las pruebas de remoción de pintura sobre diferentes sustratos (concreto, ladrillo, PETG) siguieron criterios de evaluación de porcentaje de remoción alineados con las metodologías descritas en este estándar.

Análisis de Costos

Tabla 5. Producción del Producto

Componente	Detalle	Num.Horas	Costo de servicio de energía	Valor
Prototipo en 3D	Diseño del prototipo en blender	10	9.437	94.370
Entrenamiento de redes neuronales	Modelo de entrenamiento para análisis de datos	16	14.499	231.984
Código de funcionamiento	Desarrollo de funcionamiento	315	58.364	18.384.660

	a partir del código de entrenamiento			
Impresión 3D	Duración de impresión 3D	120	2.333	280.900
Creación de Base de Datos	Selección y revisión de imágenes	6	11.000	66.000
Total				19.057.914

Costos Directos

Fabricación del producto

Tabla 6.Materiales

Componente	Detalle	Costo Unitario	Cantidad	Subtotal
Filamento	Material para imprimir en 3D	80.000	2 KG	160.000
Micro SD	Almacenamiento	30.000	1	30.000
Servomotores	motor eléctrico de precisión	44.600	5	223.000
Bombas de agua	impulsor giratorio para mover volúmenes de agua	12.000	2	24.000
Motorreductores	motor eléctrico acoplado a un reductor de velocidad	22.000	4	88.000
Sistemas de riego	sistema de riego recirculante	8.000	2	16.000

Cableado	conductores eléctricos flexibles	560	100	56.000
Tornillos M3	tornillos usados para impresión 3D	833	30	25.000
Silicona	polímero inorgánico derivado del silicio	3.000	4	12.000
Superbonder	cianocrilato	17.900	2	35.800
Bridas	amarres de fijación	7.000	1 Paquete	7.000
Masilla	compuesto pastoso y moldeable	26.372	1 Bote	26.372
LLantas	neumático de plástico	9.000	4	36.000
Sensor Proximidad	Ultrasónico HC-SR04	9.600	1	9.600
Puente H	circuito electrónico L298N	12.600	3	37.800
Protoboards	placa de pruebas, tabla de ensamble	5.000	3	15.000
Total				801.572

Tabla 7.Software

Componente	**Detalle**	**Costo Unitario**	**Cantidad**	**Subtotal**
Visual Studio	herramienta local de nivel profesional para desarrollo de software	0	2	0

	general			
Google Colab	plataforma en la nube especializada en ciencia de datos e inteligencia artificial	0	2	0

Tabla 8. Hardware

Componente	Detalle	Costo Unitario	Cantidad	Subtotal
Laptop	Herramienta para el desarrollo del proyecto	5.500.000	2	11.000.000
Internet	Servicio de internet para el proyecto	600.000	2	1.200.000
Raspberry pi-4	Controlador	499.990	1	499.990
Cámara	Identifica a los usuarios	39.950	1	39.950
Total				12.739.940

Costos Indirectos

Tabla 9. Costos de Alquiler

Componente	Detalle	Núm. horas	Costo de servicio	Valor
Alquiler de herramientas Eléctricas	arrendamiento temporal de maquinaria	43	8.338	358.534

	especializada			
Alquiler de herramientas Manuales	servicio que permite arrendar de forma temporal instrumentos de fuerza humana	43	7.959	342.237
Alquiler de fuentes de voltajes	servicio técnico orientado a suministrar, de manera temporal, dispositivos de alimentación eléctrica regulable y estabilizada	22	9.338	205.436
Total				906.207

Conclusiones

El presente trabajo demostró la viabilidad técnica de un robot autónomo mecatrónico para la identificación y eliminación selectiva de grafitis no autorizados en entornos urbanos. Los resultados obtenidos permiten formular las siguientes conclusiones:

- **Viabilidad del edge AI para clasificación en tiempo real.** La arquitectura MobileNetV2 cuantizada y ejecutada con TensorFlow Lite en la Raspberry Pi 4 logró una precisión de clasificación del 80 %–86 % en condiciones reales, confirmando que el procesamiento de visión artificial en el borde es viable sin dependencia de infraestructura de nube o conectividad continua.

- **La gestión energética es el factor crítico de campo.** Los ensayos de estrés evidenciaron que los picos de corriente transitoria (hasta 15,0 A en operación plena) hacen inviable una única fuente no regulada. La arquitectura de triple ramal con aislamiento galvánico es una condición necesaria, no opcional, para la estabilidad del sistema.
- **El control pseudo-cinemático es una solución efectiva de bajo costo.** El algoritmo de interpolación temporal para los servomotores DS04 de giro continuo permitió alcanzar la funcionalidad de limpieza requerida sin encoders de posición, reduciendo costos y complejidad del sistema de control.
- **KORA representa un avance diferencial frente al estado del arte.** Según el análisis comparativo, no existe un sistema documentado que integre en una sola plataforma embebida la clasificación automática por IA, la navegación autónoma, la actuación sobre superficies verticales y la preservación del arte legítimo.
- **La tasa de falsos positivos es la limitación más crítica.** Clasificar arte legítimo como vandalismo tiene consecuencias irreversibles sobre el patrimonio cultural urbano. Su reducción mediante datasets más representativos y sensores de mayor rango dinámico es la prioridad de investigación para iteraciones futuras.

Plan de divulgación

Con base en las limitaciones identificadas durante la evaluación experimental, se formulan las siguientes recomendaciones para el desarrollo de KORA V2.0:

Sistema energético autónomo

Implementar una batería LiPo 4S (14,8 V) con tasa de descarga mínima de 20 A continuos, distribuida mediante conversores Buck DC-DC de grado industrial para los tres

ramales de alimentación. Esta configuración eliminaría la dependencia de fuentes de laboratorio y habilitaría la operación autónoma en exteriores con una autonomía estimada de 45 – 90 minutos según la carga operativa.

Rediseño cinemático

Evolucionar la geometría del manipulador a un sistema de tres eslabones por brazo (6-DOF) para ampliar el volumen del espacio de trabajo y mejorar la fluidez en el seguimiento de trayectorias complejas sobre el muro. Incorporar encoders de posición en los codos para reemplazar el control pseudo-cinemático por control cinemático real, mejorando la repetibilidad y la precisión de la limpieza.

Mejora del modelo de clasificación

Ampliar el conjunto de datos de entrenamiento con imágenes representativas de murales bogotanos y latinoamericanos, incluyendo condiciones de iluminación nocturna y superficies mojadas. Evaluar arquitecturas alternativas como EfficientNet-Lite o YOLOv8-nano para detección en tiempo real con ventana deslizante, lo que permitiría procesar la imagen en segmentos y mejorar la precisión en grafitis parcialmente superpuestos con arte autorizado.

Integración con infraestructura urbana

Desarrollar una plataforma de gestión centralizada que permita la operación coordinada de una flota de robots KORA, integrando telemetría en tiempo real, mapas de calor de incidencia de vandalismo y reportes automáticos para las administraciones municipales. Esta integración podría fundamentarse en ROS 2 como middleware estándar, facilitando la interoperabilidad con otros sistemas de mantenimiento urbano autónomo.

Certificación y regulación

Iniciar el proceso de certificación del sistema bajo los estándares ISO 10218 e IEC 61508 para su operación en espacios públicos, y desarrollar un protocolo de actuación que defina los mecanismos de supervisión humana requeridos por la regulación colombiana para sistemas robóticos autónomos en entornos urbanos.

Referencias bibliográficas

Amazon Web Services (AWS). (2024). *¿Qué es Python?* AWS. https://aws.amazon.com/what-is/python/

Amazon Web Services (AWS). (2024). *¿Qué es una red neuronal?* AWS. https://aws.amazon.com/what-is/neural-network/

Ballón-Zegarra, F. (2021). Influencia del arte urbano en nuestra sociedad actual y el conflicto social que genera por falta de información [Trabajo de grado, Universidad San Ignacio de Loyola]. Repositorio Institucional USIL. https://repositorio.usil.edu.co/

Chilcon-Guerrero, J. E. (2024). Sistemas de limpieza mecánica con sensores para fachadas urbanas. *Revista Innovación y Tecnología Aplicada*, 4(1), 45-58.

Cometti, V., & V12 Design. (2022, 12 de noviembre). *Tag removal system: design and technology for pleasant urban coexistence*. DesignWanted. https://designwanted.com/

Darío, P., et al. (2020). Mantenimiento y reparación de vías usando un sistema robótico en la nube. *Revista Politécnica*, 16(31), 83-93.

Espressif Systems. (2024). *ESP32 Series Datasheet* (v4.4). Espressif Systems. https://www.espressif.com/

Gao, H., et al. (2024). A systematic literature review and analysis of visual pollution. *Land*, 13(7), 994. https://doi.org/10.3390/land13070994

IBM. (2021, 10 de mayo). *Support Vector Machines*. IBM Cloud Education. https://www.ibm.com/cloud/learn/support-vector-machines

Irvine, M. (2022). Street art/art in the street - semiotics, politics, economy. *Social Semiotics*, 32(4), 451-467. https://doi.org/10.1080/10350330.2022.2114724

Johnson, K., & Lee, M. (2021). Sustainable chemical cleaning for urban surfaces: Methods and applications. *Journal of Environmental Management*, 298, 113456. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113456

Kim, J., & Lee, S. (2020). An analysis of the sustainable tourism value of graffiti tours through social media: Focusing on TripAdvisor reviews of graffiti tours in Bogota, Colombia. *Sustainability*, 12(11), 4426. https://doi.org/10.3390/su12114426

La Alcaldía Mayor de Bogotá. (2021, 30 de marzo). *¿Cuánto le cuesta la limpieza de una fachada o monumento a la ciudad?* Bogota.gov.co. https://bogota.gov.co/mi-ciudad/cultura-recreacion-y-deporte/procesos-de-limpieza-de-una-fachada-o-monumento-en-la-ciudad

LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436-444. https://doi.org/10.1038/nature14539

Letaief, K. B., Shi, Y., Lu, J., & Lu, J. (2022). Edge Artificial Intelligence for 6G: Vision, Enabling Technologies, and Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 40(1), 5-36. https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3138645

Macualo Gallego, J. M., & Muñeton Romero, A. F. (2024). Estrategias urbanas de consolidación en la integración del espacio público a través del grafiti en Bogotá Colombia [Trabajo de grado, Universidad Ean]. Repositorio Institucional Minerva. https://repository.universidadean.edu.co/

Mathe, K., Behal, S., & Singh, S. J. (2024). Educational and Prototyping Potential of Raspberry Pi: A Comprehensive Review. *International Journal of Computer Applications*, 186(10), 28-35.

Ojeda-Misses, M. A., Silva-Ochoa, H., & Soria-López, A. (2021). Ludibot: Interfaz humano-robot móvil para el aprendizaje lúdico de idiomas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(1), 1-13. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.008

OmniSight. (2024, 13 de febrero). *The Future of Graffiti Abatement: AI Surveillance & Smart Coatings*. OmniSight. https://omnisightusa.com/

Rodríguez-Guevara, R. A., Gualdrón-Quintero, E. P., & Díaz-Rodríguez, J. L. (2021). Redes neuronales artificiales aplicadas a la toma de decisiones en un robot móvil. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(37), 24-32. https://doi.org/10.24054/rcta.v1i37.765

Sandler, M., Howard, A., Zhu, M., Zhmoginov, A., & Chen, L.-C. (2018). MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference*

on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 4510-4520. https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00474

Santa Maria Pinedo, J. C., Ríos López, C. A., Rodríguez Grández, C., & García Estrella, C. W. (2021). Reconocimiento de patrones de imágenes a través de un sistema de visión artificial en MATLAB. *Revista Científica de Sistemas e Informática*, 1(2), 15-26. https://doi.org/10.51252/rcsi.v1i2.148

Torres, D., & Rodríguez, C. (2023). Cinemática y control de manipuladores robóticos en tareas de fricción superficial. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 19(3), 210-222. https://doi.org/10.4995/riai.2023.18721

Velasco, J. J. (2024). *Programación en C/C++ y Arduino: De la base al prototipo*. Editorial TecnoPress.

Zhang, Q., & Wang, Y. (2022). Sensor-integrated mechanical cleaning for urban facades. *Journal of Building Automation and Robotics*, 5(3), 112-124.