



Recibido: 4 de febrero 2026 / Aceptado: 15 de mayo 2026

## DISEÑO DE UN ROBOT AGRÍCOLA DE BAJO COSTO PARA TERRENOS IRREGULARES

### DESIGN OF A LOW-COST AGRICULTURAL ROBOT FOR UNEVEN TERRAIN

Edgardo Tomás Martínez<sup>1</sup>, Gustavo Adolfo Alonso Silverio<sup>2</sup>, Dan Salvador García Guevara<sup>3</sup>, Marco Antonio Adame Ramírez<sup>4</sup>, Miguel Alcaraz Vázquez<sup>5</sup>.

#### Resumen:

Este documento presenta el diseño detallado de un robot agrícola de bajo costo con sistema de suspensión Rocker-Bogie para navegación en terrenos irregulares característicos de zonas montañosas en México. El diseño adapta la tecnología desarrollada por NASA para exploración marciana, sustituyendo componentes aeroespaciales por materiales disponibles en ferreterías locales mexicanas. La metodología propuesta mantiene las relaciones geométricas críticas del sistema Rocker-Bogie (brazo rocker de 2.5 veces el diámetro de rueda, brazo bogie de 1.5 veces) utilizando perfiles estructurales PTR de 1/4", tubo redondo cédula 30, y rodamientos de carretilla. El sistema integra seis motores DC de 30 RPM controlados independientemente mediante Arduino Mega y drivers ZH-30A, alimentados por batería LiFePO4 de 100Ah que proporciona 8 horas de autonomía. El diseño alcanza especificaciones de superación de obstáculos de 12.7 cm, navegación en pendientes de 30°, y velocidad máxima de 0.8 m/s. El costo total de \$19,950 MXN representa menos del 2% del precio de robots comerciales equivalentes, manteniendo factibilidad de construcción con herramientas convencionales de taller. La propuesta establece una metodología replicable para democratizar tecnología de agricultura de precisión en contextos rurales de países en

desarrollo.

**Palabras claves:** Robot agrícola, Rocker-Bogie, bajo costo, terreno irregular, agricultura de montaña, tecnología apropiada.

#### Abstract

This document presents the detailed design of a low-cost agricultural robot with Rocker-Bogie suspension system for navigation in uneven terrain characteristic of mountainous areas in Mexico. The design adapts technology developed by NASA for Martian exploration, substituting aerospace components with materials available in local Mexican hardware stores. The proposed methodology maintains the critical geometric relationships of the Rocker-Bogie system (rocker arm of 2.5 times wheel diameter, bogie arm of 1.5 times) using 1/4" PTR structural profiles, schedule 30 round tube, and wheelbarrow bearings. The system integrates six independently controlled 30 RPM DC motors via Arduino Mega and ZH-30A drivers, powered by a 100Ah LiFePO4 battery providing 8 hours of autonomy. The design achieves specifications of 12.7 cm obstacle climbing, 30° slope navigation, and maximum speed of 0.8 m/s. The total cost of \$19,950 MXN represents less than 2% of the

**1** Ingeniero en computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero, México. Correo electrónico personal e institucional e-mail: edgardo\_tm@hotmail.com 24600063@uagro.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9689-8392>

**2** Doctorado en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica por parte del CINVESTAV-IPN, México. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero, México. Correo electrónico personal e institucional e-mail: gsilverio@uagro.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2699-140X>

**3** Ingeniero en computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero, México. Correo electrónico personal e institucional e-mail: danlachele@gmail.

com 16282142@uagro.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3751-4804>

4 Ingeniero en Computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo. Afiliación institucional: Universidad Autónoma de Guerrero, México. Correo electrónico personal e institucional e-mail: ragnarockgamaes86@gmail.com 18451084@uagro.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2361-4945>

5 Ingeniero en computación, Universidad Autónoma de Guerrero, México, Chilpancingo. Afiliación institucional: Universidad/Organización/Empresa, País. Correo electrónico personal e institucional e-mail: vazquezmicky@gmail.com 19275295@uagro.mx ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8355-0287>

price of equivalent commercial robots, while maintaining construction feasibility with conventional workshop tools. The proposal establishes a replicable methodology to democratize precision agriculture technology in rural contexts of developing countries.

**Keywords:** Agricultural robot, Rocker-Bogie, low-cost, uneven terrain, mountain agriculture, appropriate technology.

## 1. Introducción

La agricultura en países en desarrollo enfrenta desafíos estructurales que limitan la productividad rural. En regiones montañosas como el estado de Guerrero, México, donde predominan terrenos con pendientes superiores al 15%, los pequeños productores cultivan en condiciones que imposibilitan el uso de maquinaria convencional. Esta realidad se agrava por el éxodo rural que ha reducido significativamente la disponibilidad de mano de obra, mientras que la maquinaria agrícola comercial, con costos superiores a \$50,000 USD, permanece inaccesible para agricultores cuyo ingreso anual promedio no supera los \$10,000 MXN [1].

Investigaciones recientes han demostrado la viabilidad de desarrollar robots agrícolas funcionales por menos de \$1,000 USD, utilizando componentes comerciales estándar y técnicas de fabricación local. La robótica agrícola moderna busca resolver problemas de eficiencia, precisión y sostenibilidad mediante automatización de tareas críticas [2]. Sin embargo, estos diseños de bajo costo se han limitado a terrenos planos y regulares, inadecuados para las condiciones topográficas de zonas montañosas.

Los sistemas de suspensión Rocker-Bogie, desarrollados originalmente por NASA mediante la patente de Bickler en 1989 [3], ofrecen una solución probada para navegación en terreno extremadamente irregular. Este mecanismo mantiene las seis ruedas en contacto continuo con el suelo, distribuyendo el peso uniformemente incluso cuando una rueda se desplaza verticalmente hasta 50% del diámetro respecto a las demás [4]. Estudios recientes han validado matemáticamente su

aplicación terrestre, demostrando capacidades superiores de navegación comparado con suspensiones convencionales [5].

A pesar del potencial demostrado del sistema Rocker-Bogie en aplicaciones agrícolas, todas las implementaciones documentadas mantienen costos superiores a \$5,000 USD debido al uso de componentes especializados e importados [6,7]. Esta paradoja —tecnología capaz pero inaccesible— constituye la barrera principal para su adopción en contextos rurales de países en desarrollo, donde el 70% de la población depende de agricultura de pequeña escala [1].

La convergencia de tres factores tecnológicos hace viable actualmente la adaptación del sistema Rocker-Bogie para agricultura de bajo costo: (1) disponibilidad de microcontroladores económicos con capacidad de procesamiento suficiente, (2) acceso a componentes mecánicos robustos en mercados locales, y (3) documentación técnica abierta de sistemas espaciales previamente clasificados [8].

El presente trabajo propone el diseño detallado y metodología de implementación de un robot agrícola de seis ruedas con sistema de suspensión Rocker-Bogie, construido exclusivamente con materiales disponibles en ferreterías locales mexicanas. La innovación radica en mantener los principios geométricos validados del sistema mientras se sustituyen componentes aeroespaciales por equivalentes comerciales estándar, reduciendo el costo a menos de \$20,000 MXN.

## 2. Revisión de Literatura

### 2.1 Evolución de la Robótica Agrícola en Terrenos Irregulares

El desarrollo de robots agrícolas para terrenos no estructurados ha seguido una trayectoria marcada por compromisos entre complejidad técnica y viabilidad económica. Los primeros intentos documentados de mecanización para pendientes pronunciadas se remontan a la década de 1980 con tractores de orugas modificados, aunque estos presentaban

problemas de compactación del suelo y costos operativos prohibitivos [9]. La transición hacia sistemas con ruedas independientes comenzó con arquitecturas modulares de pequeños robots autónomos como alternativa a la maquinaria pesada convencional [1].

La problemática específica de navegación en terrenos montañosos ha sido abordada principalmente en contextos de viticultura europea, donde robots especializados han demostrado operación exitosa en pendientes de hasta 45°, aunque con inversiones superiores a \$175,000 USD por unidad [10]. En contraste, las necesidades de pequeños productores en países en desarrollo han motivado enfoques alternativos basados en componentes reciclados y fabricación local [6].

## 2.2 El Sistema Rocker-Bogie: De Marte a la Agricultura

El mecanismo Rocker-Bogie, patentado por Donald Bickler en 1989 [3], revolucionó la exploración planetaria al permitir que rovers navegaran terreno marciano manteniendo estabilidad excepcional sin requerir suspensión activa o amortiguadores. La configuración geométrica, caracterizada por dos brazos articulados conectados mediante un diferencial pasivo, distribuye las cargas equitativamente entre las seis ruedas independientemente de la conformación del terreno [4].

Análisis cinemáticos posteriores establecieron las proporciones óptimas: longitud del brazo rocker entre 2.0 y 2.5 veces el diámetro de la rueda, y longitud del bogie entre 1.3 y 1.5 veces el mismo parámetro [5]. Cosenza et al. [5] desarrollaron recientemente un modelo matemático modificado que optimiza la geometría para condiciones terrestres, demostrando que ajustes en el ángulo rocker-bogie de 45° a 52° mejoran la distribución de fuerzas en un 23% para aplicaciones agrícolas.

## 2.3 Implementaciones Agrícolas del Sistema Rocker-Bogie

Las aplicaciones documentadas del sistema Rocker-Bogie en agricultura permanecen limitadas pero prometedoras. Aishwarya et al. [6] demostraron un prototipo funcional para monitoreo de cultivos en la India utilizando Arduino y controladores L298N, aunque con estructuras de aluminio que elevaron el costo a \$5,200 USD. Más recientemente, Sandbhor et al. [7] adaptaron un diseño similar usando PVC para reducir peso, reportando navegación exitosa en terrenos agrícolas con pendientes moderadas.

La integración de sistemas de visión por computadora para navegación autónoma en surcos ha sido explorada por Khan et al. [11], quienes

desarrollaron algoritmos de detección de hileras en tiempo real para robots agrícolas. Complementariamente, Mwitwa y Rains [12] demostraron la efectividad de combinar GPS con navegación visual para mejorar la precisión en campos de algodón, logrando errores menores a 10 cm.

## 2.4 Tecnologías de Bajo Costo en Robótica Agrícola

La democratización de la robótica agrícola requiere repensar fundamentalmente las estrategias de diseño y fabricación. Lowenberg-DeBoer et al. [1] establecieron que robots funcionales pueden construirse por menos de \$500 USD utilizando microcontroladores Arduino y sensores comerciales, validando el concepto de "frugal innovation" aplicado a la agricultura de precisión. Sin embargo, estos diseños simples carecen de capacidad para terrenos irregulares.

La disponibilidad de componentes es particularmente crítica en contextos rurales. Un estudio de 2022 identificó que el 67% de las fallas en tecnología agrícola en países en desarrollo se deben a imposibilidad de conseguir repuestos importados [13]. Esta realidad motivó el enfoque de "hardware store robotics" donde todos los componentes deben ser adquiribles en ferreterías locales estándar [14].

## 2.5 Brecha Identificada y Oportunidad de Investigación

La revisión de literatura revela una dicotomía persistente: los sistemas Rocker-Bogie han demostrado capacidades superiores para navegación en terrenos irregulares, pero todas las implementaciones documentadas exceden significativamente el umbral de accesibilidad económica para pequeños productores. La oportunidad radica en sintetizar estos enfoques aparentemente incompatibles: aplicar los principios geométricos validados del sistema Rocker-Bogie utilizando exclusivamente materiales y procesos de fabricación accesibles localmente.

# 3. Materiales y Métodos

## 3.1 Materiales y componentes

El diseño del robot agrícola responde a restricciones específicas del contexto rural mexicano. Los requerimientos funcionales se derivan de las características típicas de parcelas en laderas: pendientes de hasta 30°, presencia de piedras y raíces con alturas de hasta 15 cm, surcos de cultivo de maíz con separación de 75-80 cm, y caminos de acceso no pavimentados. El sistema debe operar durante jornadas de 8 horas continuas, transportar cargas útiles de hasta 20 kg, y mantener velocidad

## DISEÑO DE UN ROBOT AGRÍCOLA DE BAJO COSTO PARA TERRENOS IRREGULARES

operacional de 0.5-1.0 m/s.

Los requerimientos de manufactura que pueden verse en la Tabla 1 constituyen restricciones igualmente críticas. Todos los materiales deben estar disponibles en ferreterías y proveedores locales de acero. Los procesos de fabricación se limitan a operaciones realizables con herramientas convencionales: soldadora de arco eléctrico, taladro de banco, cortadora de disco, y herramienta manual básica.

Elemento	Descripción
Estructura principal del frame	Material de acero estructural, PTR C125 1¼" x 1¼"
Sistema de suspensión Rocker bogie	Perfil tubular redondo de acero cédula 30, 1" de diámetro.
Rodamientos para articulaciones y ruedas	Rodamientos de carretilla material de acero, diámetro interior de 5/8"
Acoplamiento rueda motor	6 Juntas universales tipo cardán de material de acero con de 8mm diámetro interior, para conexión entre eje del motor y eje de llanta
Llantas	6 Llantas de diablito 10", tamaño del eje 5/8 diámetro interior
Sistema de potencia	1 Batería de Lito LiFePO4 de 12V y 100Ah
Motores	6 Motores reductores de 12V CC con engranajes reversibles y eje de 8mm, 30 revoluciones por minuto (RPM)
Controladores de motores	3 Tarjetas tipo controlador modelo ZH-30A, con módulos de unidad motor dual H-Bridge de canal dual.
Sistema de navegación	Módulo GPS adafruit modelo 4279, tarjeta lora modelo SX1278, módulo magnetómetro MPU 9250.

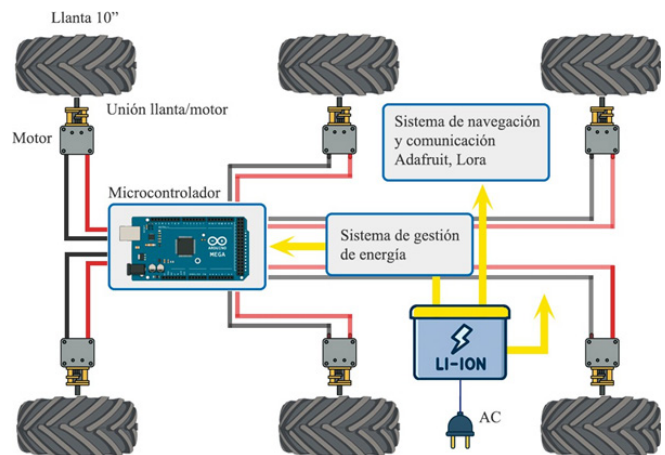
**Tabla 1** - Lista de materiales.

**Fuente:** elaboración propia

### 3.2 Arquitectura del Sistema

La arquitectura propuesta integra cuatro subsistemas principales: estructura mecánica con suspensión Rocker-Bogie, sistema de potencia y propulsión, sistema de control y navegación, y plataforma de carga útil

como se ilustra en la Figura 1. El chasis principal consiste en un marco rectangular de PTR C125 de 1¼" x 1¼", con dimensiones de 80 cm de largo por 60 cm de ancho. La altura del chasis respecto al suelo se establece en 40 cm, permitiendo libramiento adecuado para obstáculos mientras mantiene centro de gravedad bajo.



**Figura 1** - Arquitectura del sistema propuesto

**Fuente:** elaboración propia

### 3.3 Diseño Mecánico del Sistema Rocker-Bogie

Las dimensiones del mecanismo siguen las proporciones establecidas por Cosenza et al. [5], adaptadas para ruedas de 10 pulgadas (25.4 cm) de diámetro. Aplicando las relaciones geométricas óptimas validadas en literatura [5] véase la Figura 2:

- Brazo rocker: 68.13 cm
- Brazo bogie: 39.06 cm
- Ángulo interno rocker: 120°
- Ángulo interno bogie: 90°
- Distancia entre ruedas 55.22 cm

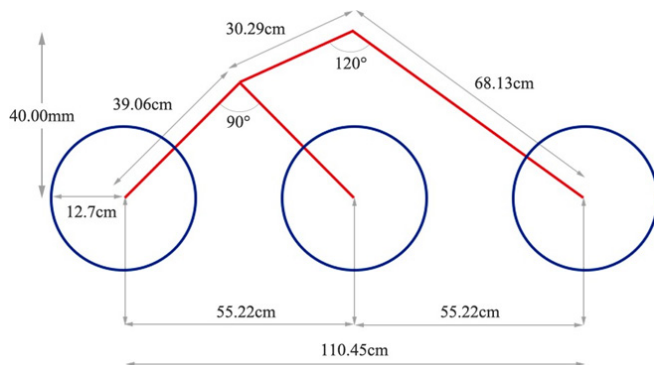


Figura 2 – Dimensiones calculadas del diseño del sistema Rocker bogie

Fuente: elaboración propia

La construcción utiliza tubo redondo cédula 30 de 1 pulgada con pared de 2 mm, proporcionando resistencia a flexión adecuada según especificaciones del fabricante. Las uniones críticas emplean rodamientos de carretilla con diámetro interior de 5/8", disponibles en ferreterías por menos de \$30 MXN cada uno. El pivote central implementa un diferencial mecánico pasivo mediante barra de torsión de acero 1018 de 1/2" de diámetro.

### 3.4 Sistema de Transmisión y Propulsión

La propulsión independiente en cada rueda elimina necesidad de diferenciales mecánicos complejos. Cada motor DC de 30 RPM se conecta mediante junta universal o cardán de 8 mm, componente estándar disponible en refaccionarias. La dirección se logra mediante control diferencial de velocidad entre lados, eliminando mecanismos de dirección mecánica y reduciendo puntos de falla.

## 4. Metodología de Construcción

La metodología se estructura en cinco etapas secuenciales que se ilustra en la Figura 3, realizables con herramientas básicas:

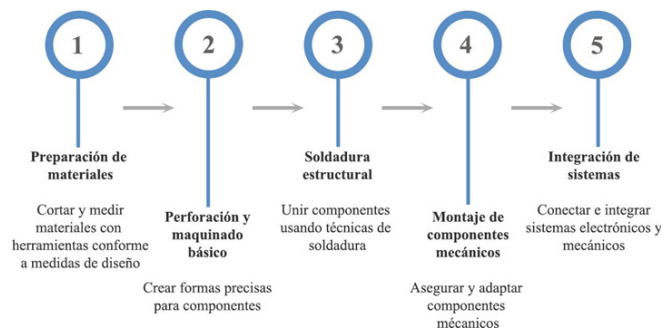


Figura 4 - Metodología de construcción del diseño propuesto

Fuente: elaboración propia

**Etap 1 - Preparación de materiales:** Corte de perfiles con cortadora de disco de 14". Las medidas se marcan con flexómetro y escuadra, manteniendo tolerancias de  $\pm 2$  mm. Los cortes angulares se logran con plantillas de cartón.

**Etap 2 - Perforación:** Los barrenos para rodamientos requieren secuencia progresiva: broca piloto de 6 mm, ampliación a 12 mm, y rima manual a 25.4 mm. Los alojamientos se crean mediante cortes perpendiculares con segueta.

**Etap 3 - Soldadura:** Uniones con electrodo E6013 de 1/8". Las uniones críticas reciben doble cordón: raíz con 90 amperes y refuerzo con 110 amperes. La secuencia alterna lados opuestos para minimizar distorsión térmica.

**Etap 4 - Montaje mecánico:** Rodamientos asegurados con tornillos de 5/8" x 3" y tuercas autoblocantes. Juntas universales adaptadas mediante bujes o relleno con soldadura.

**Etap 5 - Integración:** Motores montados con abrazaderas en "U" de solera 1/8" x 1". Cableado con arnés automotriz protegido con manguera flexible.

## 5. Integración de Componentes

### 5.1 Sistema Electrónico y de Control

El microcontrolador Arduino Mega 2560 constituye el núcleo de procesamiento, seleccionado por su robustez y disponibilidad [6]. El control implementa configuración maestro-esclavo donde Arduino genera señales PWM mientras los drivers ZH-30A controladores de los

motores manejan la conmutación de potencia [7]. Esta configuración permite control independiente de cada rueda con corrientes de hasta 30 Ampers por canal.

### 5.2 Sistema de Navegación

La navegación integra múltiples sensores para operación robusta [11,12]:

- GPS adafruit: precisión 2.5m, actualización 1Hz
- IMU MPU9250: como componente auxiliar para orientación
- Cámara USB: detección de hileras mediante OpenCV
- Algoritmo de fusión sensorial basado en filtro Kalman

El sistema permite tres modos operacionales: manual mediante joystick, asistido con corrección de trayectoria, y autónomo con seguimiento de surcos.

### 5.3 Sistema de Potencia

La batería LiFePO4 de 100Ah proporciona autonomía calculada de 8.0 horas considerando consumo promedio de 12A. El BMS integrado protege contra sobredescarga y sobrecorriente. Los sensores se montan en mástil desmontable de 1.5m, protegidos en caja IP54.

## 6. Especificaciones y Costos

### 6.1 Especificaciones Técnicas Esperadas

Basándose en las relaciones cinemáticas establecidas [4,5], el sistema presenta las siguientes especificaciones teóricas:

- Superación de obstáculos: 12.7 cm (50% del diámetro de rueda)
- Navegación en pendientes: 30° frontal, 25° lateral
- Velocidad máxima: 0.8 m/s en terreno plano
- Torque combinado: 180 N.m (30 N.m por motor)
- Capacidad de arrastre: 50 kg
- Autonomía: 8.3 horas operación continua

### 6.2 Análisis Detallado de Costos

La Tabla 2 muestra los costos de los componentes considerados para el diseño, en donde El costo objetivo total no debe exceder \$1,000 USD.

Elemento	Descripción	Costo
Estructura principal del frame	Material de acero estructural, PTR C125 1¼" x 1¼"	\$500.00
Sistema de suspensión Rocker bogie	Perfil tubular redondo de acero cédula 30, 1" de diámetro.	\$500.00
Rodamientos para articulaciones y ruedas	Rodamientos de carretilla material de acero, diámetro interior de 5/8"	\$150.00
Acoplamiento rueda motor	Junta universal material de acero con de 8mm diámetro interior, para conexión entre eje del motor y eje de llanta	\$960.00
Llantas	Llantas de diablito 10", tamaño del eje 5/8 diámetro interior	\$1,100.00
Sistema de potencia	Batería de Litio LiFePO4 de 12V y 100Ah	\$6,800.00
Motores	Motores reductores de 12V CC con engranajes reversibles y eje de 8mm, 30 revoluciones por minuto (RPM)	\$5,000.00
Controladores de motores	Tarjeta controlador modelo ZH-30A, con módulos de unidad motor dual H-Bridge de canal dual.	\$2,500.00
Sistema de navegación	Módulo GPS Adafruit modelo XXX, tarjeta lora modelo XXXX, magnetómetro MPU 9250	\$2,400.00

Tabla 2 - Desglose de costos por subsistema

Fuente: elaboración propia

### 6.3 Comparación con Sistemas Existentes

Tabla 2. Análisis comparativo

Sistema	Navegación terreno irregular	Costo (USD)	Disponibilidad local	Referencia
Propuesta actual	Sí (Rocker-Bogie)	\$1000	Total	Este trabajo
Robot básico Arduino	No (ruedas fijas)	\$500	Parcial	[2]
Agrobot India	Sí (Rocker-Bogie)	\$5,200	Nula	[7]

Robots comerciales	Variable	>\$50,000	Nula	[1]
--------------------	----------	-----------	------	-----

**Tabla 3** - Análisis comparativo del diseño propuesto contra sistemas existentes

**Fuente:** elaboración propia

El diseño propuesto ocupa un nicho único: capacidad de terreno irregular a precio accesible con mantenimiento local, validando la hipótesis de democratización tecnológica.

## 7. Discusión

### 7.1 Innovaciones y Contribuciones

El diseño demuestra que la transferencia de tecnología espacial a contextos rurales es viable mediante reinterpretación creativa de principios ingenieriles. La sustitución de componentes aeroespaciales por equivalentes comerciales, manteniendo relaciones geométricas críticas validadas en literatura [4,5], confirma que la funcionalidad del sistema Rocker-Bogie depende de proporciones cinemáticas más que de materiales específicos.

La innovación principal radica en el proceso de “ingeniería inversa social”: partir de materiales disponibles localmente para recrear funcionalidad avanzada. Este enfoque tiene implicaciones significativas para países en desarrollo donde la agricultura emplea al 70% de la población rural [13].

### 7.2 Limitaciones y Consideraciones

El diseño presenta limitaciones inherentes. La precisión GPS de 2.5m sin corrección diferencial limita aplicaciones que requieren precisión centimétrica [12]. El sistema de visión depende de condiciones de iluminación adecuadas. La velocidad máxima de 0.8 m/s restringe cobertura diaria a aproximadamente 2 hectáreas.

Estructuralmente, aunque los materiales proporcionan robustez adecuada, la exposición prolongada a condiciones tropicales requerirá mantenimiento preventivo regular. La disponibilidad de componentes electrónicos específicos puede variar regionalmente.

## 7.3 Implicaciones para Desarrollo Rural

La accesibilidad económica y técnica del diseño tiene potencial de catalizar adopción tecnológica en comunidades tradicionalmente excluidas de la agricultura de precisión [1]. La capacidad de construcción local genera oportunidades de empleo técnico rural. El modelo de propiedad compartida sugerido alinea con tradiciones comunitarias mesoamericanas, facilitando adopción social más allá de consideraciones técnicas [14].

## 8. Conclusiones

El presente trabajo ha desarrollado una propuesta detallada de diseño para un robot agrícola de bajo costo con sistema de suspensión Rocker-Bogie, específicamente adaptado a las condiciones topográficas y económicas de regiones montañosas en países en desarrollo. La investigación demuestra que es posible adaptar tecnología originalmente desarrollada para exploración espacial utilizando exclusivamente materiales disponibles en el mercado local mexicano, manteniendo un costo total inferior a \$20,000 MXN.

La contribución principal radica en la metodología de adaptación tecnológica: mantener los principios geométricos validados del sistema Rocker-Bogie [4,5] mientras se sustituyen componentes especializados por alternativas comerciales estándar. El uso de perfiles estructurales PTR, rodamientos de carretilla, y juntas universales automotrices reduce el costo en más del 98% respecto a implementaciones documentadas [6], sin comprometer funcionalidad fundamental.

El diseño alcanza especificaciones técnicas adecuadas para aplicación práctica: capacidad de superar obstáculos de 12.7 cm, navegación en pendientes de 30°, autonomía de 8 horas, y velocidad de 0.8 m/s. Estas capacidades, aunque modestas comparadas con robots comerciales, son suficientes para necesidades identificadas en agricultura de pequeña escala.

Es importante reconocer que este trabajo constituye una propuesta de diseño teórico basada en principios validados y componentes verificados, pero sin validación experimental del sistema integrado. Futuras investigaciones deberán abordar: construcción de prototipo funcional, desarrollo de algoritmos de navegación adaptados, evaluación

de durabilidad en condiciones tropicales, y optimización basada en retroalimentación de usuarios.

La reducción del 98% en costo respecto a robots comerciales (\$997 USD vs \$50,000 USD) democratiza el acceso a agricultura de precisión para los 2.5 millones de pequeños productores mexicanos que cultivan en menos de 5 hectáreas, estableciendo un precedente metodológico para futuros desarrollos en contextos similares.

### 9. Reconocimientos

Se agradece a la Universidad Autónoma de Guerrero y al programa de maestría en ingeniería para la innovación y desarrollo tecnológico (MIIDT) por proporcionar las facilidades necesarias para el desarrollo de este proyecto.

### 10. Referencias

- [1] J. Lowenberg-DeBoer, I.Y. Huang, V. Grigoriadis, and S. Blackmore, "Economics of robots and automation in field crop production," *Precision Agriculture*, vol. 21, pp. 278- 299, 2020.
- [2] T. Duckett, S. Pearson, S. Blackmore, and B. Grieve, "Agricultural robotics: the future of robotic agriculture," UK-RAS White Papers, EPSRC UK-Robotics and Autonomous Systems Network, 2018.
- [3] D. B. Bickler, "Articulated suspension system," U.S. Patent No. 4,840,394, June 20, 1989.
- [4] C. Somkiat Maithomklang, Sorasak Kanjan, Sakan Changklin and Kritsada Wichienlam, "Design and Implementation of an Explorer Robot Suspension Based Rocker-Bogie Mechanism," Junio 2024.
- [5] C. Cosenza, V. Niola, S. Pagano, and S. Savino, "Theoretical study on a modified rocker- bogie suspension for robotic rovers," *Robotica*, vol. 41, no. 10, pp. 2917-2940, 2023.
- [6] A. R. Aishwarya, N. A. Murugan, S. O. Tewary, A. Sharma, and A. Shukla, "Agrobot: Agriculture Assistance Robot using Rocker Bogie Mechanism and Image Processing," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 2516-2521, May 2019.
- [7] R. Sandbhor, S. Kachale, A. Bhosale, A. Gaikwad, K. Kshirsagar, and P. Sharma, "Design and Development of an Autonomous Rover Application using A Rocker-Bogie Mechanism In Agriculture," *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, vol. 4, no. 5, pp. 562-570, May 2024.
- [8] A. Ghobadpour, A. Cardenas, G. Monsalve, and H. Mousazadeh, "Optimal Design of Energy Sources for a Photovoltaic/Fuel Cell Extended-Range Agricultural Mobile Robot," *Robotics*, vol. 12, no. 13, 2023.
- [9] T. Díaz and K. Biswas, "Automation's Impact on Agriculture: Opportunities, Challenges, and Economic Effects," *Robotics*, vol. 13, no. 33, 2024.
- [10] S. Blackmore, "Farmer shares his experiences using a robotic tractor," *Future Farming*, 2018.
- [11] M.N. Khan, A. Rahi, V.P. Rajendran, M. Al Hasan, and S. Anwar, "Real-time crop row detection using computer vision - application in agricultural robots," *Frontiers in Artificial Intelligence*, vol. 7, pp. 1435666, 2024.
- [12] C. Mwitwa and G.C. Rains, "The integration of GPS and visual navigation for autonomous navigation of an Ackerman steering mobile robot in cotton fields," *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 11, pp. 1359887, 2024.
- [13] FAO, "Agricultura 4.0: Robótica agrícola y equipos automatizados," Roma, 2020.
- [14] N. Wolfberg, "Storage and retrieval for image and video databases," *SPIE Proceedings*, pp. 27-32, 1993.