

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**Facultad de Ciencias e Ingeniería**



**PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ**

**SISTEMA MÓVIL PARA CUIDADO DE CULTIVOS DE CACAO**

**Tesis para optar el título de Ingeniero Mecatrónico que  
presenta el bachiller:**

**Anthony Bacilio Ruiz**

**ASESOR: Francisco Fabián Cuellar Córdoba**

Lima, Diciembre del 2017

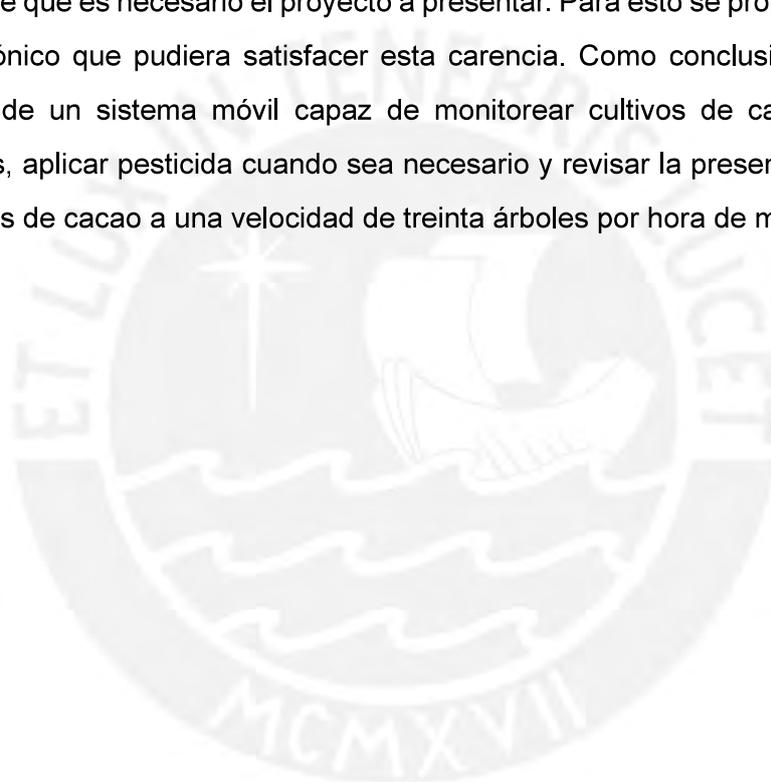
## Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por permitir acabar este proyecto; a mis padres por el esfuerzo que dedican en cuidado de sus hijos; a mis abuelos por su paciencia con su familia; a mis profesores por dar tiempo y atención a las consultas de sus alumnos.



## Resumen

En la actualidad, la demanda y producción del cacao en el país está en alza lo que ha logrado generar divisas de hasta 234 millones de dolares. Sin embargo, no se ha aumentado la capacidad técnica del cuidado de los cultivos de cacao, lo cual podría poner en riesgo las inversiones en crecimiento del País. Los principales problemas son las infecciones y el mal mantenimiento del campo de cultivo que si se detecta a tiempo con un monitoreo continuo se puede reducir el impacto de estas. De esto se concluye que es necesario el proyecto a presentar. Para esto se propuso una solución mecatrónico que pudiera satisfacer esta carencia. Como conclusión, se obtuvo un diseño de un sistema móvil capaz de monitorear cultivos de cacao en espacios abiertos, aplicar pesticida cuando sea necesario y revisar la presencia de anomalías en frutos de cacao a una velocidad de treinta árboles por hora de manera remota.



**TEMA DE TESIS PARA OPTAR  
EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

Título : Sistema móvil para cuidado de cultivos de cacao  
Asesor : Francisco Cuellar Córdova  
Alumno : Anthony Bacilio Ruiz  
Código : 20102488  
Tema N° : # 144  
Fecha : 23-06-2016



**Descripción y Objetivos**

En la actualidad, la demanda y producción del cacao en el país está en alza logrando a generar divisas de \$ 234 millones. Sin embargo, no ha aumentado la capacidad técnica del cuidado de los cultivos de cacao, lo cual podría poner en riesgo las inversiones en crecimiento del País. El principal problema es el poco frecuente monitoreo y como este facilita la propagación de infecciones. Para solucionar esto se propone la implementación de un sistema móvil para el monitoreo y cuidado de cultivos de cacao en espacios abiertos donde exista alcance de la señal GPS. Este tendrá sistemas de sensado para la navegación en espacios abiertos, el procesamiento de imágenes para identificación de plagas y enfermedades y la actuación para aplicación de plaguicidas; además de la capacidad de desplazarse sobre el territorio de cultivo. De este modo, se plantea un sistema móvil que cuenta con la capacidad de desplazarse a una velocidad máxima de 1 m/s de forma semiautónoma o tele operada; monitorear mazorcas de cacao usando una cámara con un soporte de 2 grados de libertad y procesamiento de imágenes por un sistema embebido; irrigar pesticida usando una columna eléctrica que permite que el sistema pueda irrigar hasta a una altura máxima de 2 metros; y que además puede realizar toda estas tareas para el monitoreo a una velocidad de 60 árboles en 2 horas con una sola carga de batería .

*Ernie P. Madrid R.*



*[Signature]*

# Indice de Contenido

<b>Indice de Tablas</b>	<b>vii</b>
<b>Indice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1 Marco de referencia</b>	<b>6</b>
1.1 Marco Histórico . . . . .	6
1.2 Marco Teórico . . . . .	7
1.2.1 Características de los cultivos de Cacao . . . . .	7
1.2.2 Redes Neuronales convolucionales (CNN) para la tarea de detección de objetos . . . . .	10
1.2.3 Mapas de color HSV y HSL para la detección de cacaos anómalos	14
<b>2 Diseño del sistema Mecatrónico</b>	<b>18</b>
2.1 Diseño del sistema de Control . . . . .	19
2.1.1 Diagrama de flujo general del sistema . . . . .	19
2.1.2 Función Controlar vehículo . . . . .	20
2.1.3 Subfunciones de desplazamiento . . . . .	21
2.1.4 Subfunción de Irrigar desde posición automáticamente . . . . .	21
2.1.5 Subfunción de Inspección desde posición automáticamente . . . . .	22
2.2 Diseño del sistema de detección de cacaos anómalos . . . . .	24
2.2.1 Subsistema para reconocer si una imagen es cacao o no . . . . .	24
2.2.2 Subsistema para reconocer si una imagen de cacao es de uno anómalo . . . . .	27
2.2.3 Sistema Combinado . . . . .	29
2.3 Diseño del sistema electrónico . . . . .	30
2.3.1 La estación de trabajo . . . . .	31
2.3.2 Módulo de comunicación . . . . .	31
2.3.3 Procesador Central . . . . .	32
2.3.4 Procesador compatible con CUDA . . . . .	33
2.3.5 Dispositivo para la interconexión de los sensores y actuadores a la red móvil del vehículo . . . . .	33

2.3.6	Módulo de desplazamiento . . . . .	34
2.3.7	Módulo de detección de obstáculos . . . . .	35
2.3.8	Módulo de posicionamiento . . . . .	37
2.3.9	Módulo de regado . . . . .	38
2.3.10	Cámaras IP . . . . .	40
2.3.11	Módulo de energía y su distribución . . . . .	42
2.4	Diseño del sistema Mecánico . . . . .	45
2.4.1	Sistema de irrigación . . . . .	45
2.4.2	Sistema de desplazamiento . . . . .	50
2.4.3	Elementos de Soporte y Protección . . . . .	51
<b>3</b>	<b>Pruebas realizadas</b>	<b>55</b>
3.1	Prueba del sistema de detección de enfermedades del cacao . . . . .	55
3.1.1	Prueba del modelo de detección de cacao . . . . .	55
3.1.2	Prueba del modelo de detección de anomalías en el cacao . . . . .	58
3.1.3	Prueba del sistema de detección de anomalías en los cultivos de cacao . . . . .	60
<b>4</b>	<b>Presupuesto estimado Necesitado</b>	<b>62</b>
4.1	Presupuesto para el ensamble en Columna y Bomba . . . . .	62
4.2	Presupuesto para el ensamble en la tapa delantera . . . . .	63
4.3	Presupuesto para el ensamble en la tapa superior . . . . .	63
4.4	Presupuesto para las bandejas con elementos electrónicos . . . . .	64
4.5	Presupuesto del vehículo RMP 440 . . . . .	65
4.6	Costo total de los componentes . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>66</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	66
5.2	Recomendaciones . . . . .	67
	<b>Bibliografía</b>	<b>68</b>

## Indice de Tablas

2.1	Características de la antena de largo alcance Halo Long Range Marine & RV WiFi Extender System . . . . .	31
2.2	Características de la antena de largo alcance Wavlink AC600 . . . . .	31
2.3	Router . . . . .	32
2.4	Características del BeagleBone Black Rev.C . . . . .	32
2.5	Características del NVIDIA Jetson TK1 Development Kit . . . . .	33
2.6	Características del ESP8266 . . . . .	34
2.7	Características del RMP 440 LE . . . . .	34
2.8	Características del I2CXL-MaxSonar MB7247 . . . . .	35
2.9	Características del multiplexor I2C de 4 canales . . . . .	35
2.10	Características del GPS . . . . .	37
2.11	Características del controlador de motor POLOLU G2 2421 . . . . .	39
2.12	Características de la SCL Series - Column Lift . . . . .	39
2.13	Características de la bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V . . . . .	40
2.14	Características de las cámaras Hikvision DS-2CD2142FWD-IWS . . . . .	41
2.15	Características de las baterías del vehículo RMP . . . . .	43
2.16	Características del terminal de fusibles LFB08 . . . . .	44
2.17	Características del terminal del convertor DC DC . . . . .	44
2.18	Características de la bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V . . . . .	48
2.19	Características del tanque . . . . .	48
2.20	Características de la boquilla . . . . .	49
2.21	Características de la manguera . . . . .	49
2.22	Características del Tee . . . . .	49
2.23	Características del RMP 440 LE . . . . .	50
3.1	Prueba del modelo de detección de cacao . . . . .	57
3.2	Rendimiento del modelo de clasificación de imágenes . . . . .	57
3.3	prueba del modelo de detección de cacao . . . . .	60
3.4	Rendimiento del modelo de clasificación de imágenes . . . . .	60
3.5	Resumen (Fuente propia) . . . . .	61
4.1	Presupuesto del ensamble columna y bomba (Fuente Propia) . . . . .	62

4.2 Presupuesto del ensamble en la tapa delantera(Fuente Propia) . . . . .	63
4.3 Presupuesto del ensamble en la tapa superior(Fuente Propia) . . . . .	63
4.4 Presupuesto para las bandejas con elementos electrónicos(Fuente Propia) . . . . .	64
4.5 Presupuesto del vehículo (Fuente Propia) . . . . .	65
4.6 Presupuesto del ensamble en la tapa delantera(Fuente Propia) . . . . .	65
B.1 Consumo de elementos (Fuente propia) . . . . .	14
B.2 Consumo de elementos (Fuente propia) . . . . .	18



## Indice de Figuras

1.1	Tareas de agricultura donde se usa robots(Fuente: IEEE.org)	6
1.2	Plantación de Cacao en Chanchamayo(Fuente: propia)	8
1.3	Planta de Cacao de Chanchamayo(Fuente: propia)	8
1.6	Red neuronal básica(Fuente: coursera.com)	11
1.7	Ejemplo de red neuronal (Fuente: altera.com)	12
2.1	Diseño final de la propuesta(Fuente propia)	18
2.2	Diagrama de flujo principal del sistema(Fuente: propia)	19
2.3	Diagrama de flujo de la función controlar vehículo(Fuente: propia)	20
2.4	Diagrama de flujo de las subfunciones de desplazamiento(Fuente: propia)	21
2.5	Diagrama de flujo de las subfunción de riego en posición(Fuente: propia)	22
2.6	Diagrama de flujo de las subfunción de inspección en posición(Fuente: propia)	23
2.7	Proceso de detección de cacao en una imagen(Fuente: propia)	24
2.8	Capacidad de detección del modelo.(Fuente: Propia)	25
2.9	Arquitectura a usar(Fuente: propia)	26
2.10	Mapas HSL de los cacaos(Fuente: Propia)	27
2.12	Sistema de detección de anomalías en el cacao (Fuente: Propia)	29
2.13	Diagrama general de conexion(Fuente: propia)	30
2.14	Ubicación de los sensores de ultrasonido(Fuente: propia)	35
2.15	Esquema de conexion del módulo de detección de obstáculos(Fuente: propia)	36
2.16	Alcance frente a objetos de $6mm(A)$ , $2.54cm(B)$ , $8.89cm(C)$ y $27.94cm(D)$ de diámetro (Fuente: Maxbotix.com)	36
2.17	Volumen de captura de color amarillo del sonar para el caso C(Fuente: propia)	37
2.18	Esquema de conexión del módulo de posicionamiento(Fuente: propia)	38
2.19	Esquema del módulo de regado(Fuente: propia)	39
2.20	Diagrama de conexion de el módulo de regado(Fuente: propia)	40
2.21	Volumen de captura de las cámaras	41
2.22	Montaje de las cámaras(Fuente: propia)	42

2.23 Diagrama de conexión del sistema de distribución de energía.(Fuente propia) . . . . .	42
2.24 Esquema del sistema de distribución de energía.(Fuente propia) . . . . .	43
2.25 Elementos adicionales para la transmisión de energía . . . . .	44
2.26 Diseño del sistema mecánico (Fuente: Propia) . . . . .	45
2.27 Alcance de la columna eléctrica(Fuente propia) . . . . .	46
2.28 ( Diagrama de conexión del sistema de regado.(Fuente propia) . . . . .	46
2.29 Resultados de la simulación(Fuente: Propia) . . . . .	47
2.30 Pendientes posibles para el vehículo (Fuente propia) . . . . .	51
2.31 Ensamble general(Fuente propia) . . . . .	51
2.32 Bandejas para elementos electrónicos (Fuente propia) . . . . .	52
2.33 Ensamble en la tapa delantera (Fuente propia) . . . . .	53
2.34 Ensamble en la tapa superior (Fuente propia) . . . . .	53
2.35 Bandejas para elementos electrónicos (Fuente propia) . . . . .	54
B.1 Diagrama de conexión del sistema de distribución de energía(Fuente propia) . . . . .	18
B.2 Diagrama de conexión del sistema de distribución de energía(Fuente propia) . . . . .	19
C.1 ( Diagrama de conexión del sistema de regado.(Fuente propia) . . . . .	20
C.2 Presion necesitada por el sistema(Fuente propia) . . . . .	24
C.3 Angulos en la boquilla(Fuente propia) . . . . .	25
C.4 ( Fuerzas que se ejercen en una gota (Fuente propia) . . . . .	26
C.5 ( Variación del coeficiente de arrastre en una esfera (Fuente: grc.nasa.gov) . . . . .	26
C.6 Resultados de la simulación(Fuente: Propia) . . . . .	28
C.7 DCL en la columna(Fuente propia) . . . . .	29
C.8 Evaluación del soporte del contenedor(Fuente: Propia) . . . . .	31
C.9 Rotación del sistema de coordenadas. (Fuente propia) . . . . .	32
C.10 Fuerzas sobre el vehículo (Fuente propia) . . . . .	32
C.11 Fuerzas sobre el vehículo en movimiento . . . . .	36
C.12 Pendientes posibles para el vehículo (Fuente propia) . . . . .	38

# Introducción

## Presentación de la Problemática

Actualmente, el Perú es el segundo productor mundial de cacao fino de aroma; a pesar de esto, no se satisface la demanda mundial [1]. Debido a esto, la producción de cacao ha aumentado en los últimos años, lo cual ha generado divisas de hasta \$ 234,2 millones en el año 2014 [2]. Sin embargo, no se ha puesto el mismo esfuerzo en la reducción de pérdidas en el crecimiento del fruto del cacao, lo cual podría ocasionar pérdidas de hasta más de 50% de la producción, como le sucedió a Brasil con una plaga de escoba de bruja (enfermedad del cacao) que no se pudo controlar [3].

Las enfermedades y las plagas son una de las razones de pérdidas del fruto de cacao. Existen enfermedades tales como, la monialisis, la mazorca negra y la escoba de bruja que atacan al fruto [3]. Estos frutos ya no pueden ser utilizados y es recomendable retirarlos cuando las esporas estén humedecidas por el ambiente para evitar infecciones en los otros frutos. Por otro lado, también hay enfermedades que atacan el tronco de la planta de cacao tales como el cáncer del tronco de cacao, el cual causa que los brotes de cacao mueran; Rosalina, la cual hace que las hojas se sequen y el árbol muera; el mal de "machete", la cual origina deshidratación de la planta de cacao y su muerte. Asimismo, también hay enfermedades que atacan a las hojas tales como la antracnosis, la cual origina defoliación en la planta de cacao y la muerte de frutos. Finalmente, hay enfermedades que pueden atacar diferentes partes de la planta de cacao; la más peligrosa es la escoba de bruja. Es recomendable observar la presencia de infecciones periódicamente y de encontrarse una anomalía, no mover la parte afectada, irrigar por prevención con solución cúprica y comunicar al organismo de seguridad agraria nacional para su retiro.

Otra de las causas es la presencia de maleza y el inadecuado control de la sombra con la poda y la sombra agro-forestal [4]. Por un lado, la presencia de maleza causa una competencia por los nutrientes con la planta de cacao, lo cual causa un inadecuado desarrollo de la planta [5]. Por otro lado, la poda irregular de la planta propicia un inadecuado ingreso de luz y de viento; sin embargo, la poda excesiva origina poca cantidad de hojas lo cual, significa una inadecuada cantidad de fotosíntesis. Asimismo, un exceso de sombra del sistema agro-forestal facilita la presencia de enfermedades por la humedad y poca sombra originaría un excesivo ingreso de luz.

En conclusión, hay pérdidas que se dan en el crecimiento del fruto por diversos motivos tales como enfermedades, presencia de maleza e inadecuado control de sombra. Aunque todos tienen diferentes formas de solucionarse, tienen en común que un adecuado monitoreo propiciaría su detección temprana y reducción de pérdidas. Asimismo, de no atenderse este problema podría suceder un percance como sucedió en Brasil , en la cual se perdió + del 50% de la producción [3].

## **Formulación de Propuesta de solución a partir de un Sistema Mecatrónico**

### **Objetivos y alcances**

El objetivo principal de este trabajo de tesis es el diseño de un sistema móvil para el cuidado de cultivos de cacao en zonas donde exista alcance de la señal GPS.

Objetivos específicos:

- Diseño de un sistema móvil para el monitoreo de cultivos de cacao en espacios abiertos que pueda revisar 60 árboles en dos horas por ciclo de funcionamiento.
- Diseño de un sistema de sensado para navegación en espacios abiertos.
- Diseño de un sistema de procesamiento de imágenes para la detección de anomalías que pueden ser plagas y/o enfermedades.
- Diseño de un sistema de actuación para la irrigación.

## Requerimientos (Alcances):

- Requerimientos Mecánicos
  - La estructura del robot móvil debe soportar cargas de hasta 60 kg.
  - La estructura debe proteger a los módulos electrónicos.
  - La estructura deberá poder ir sobre obstáculos de hasta 5 cm
  - Deberá contar con un aspersor que pueda rociar frutos por a más de 3 metros del suelo.
- Requerimientos Electrónicos
  - El sistema debe ser alimentado con una batería que le brinde autonomía por 2 horas.
  - El sistema debe contar con una cámara o cámaras independientes que le permita ver frutos a más de 2 metros del suelo
  - El sistema deberá contar con una o dos cámaras frontales que le permitan ubicar presencia de obstáculos alrededor a una distancia menor a 1 metro por lo menos.
  - El sistema necesitará usar sensores para su ubicación y guía en el terreno.
- Requerimiento de Control
  - El sistema deberá funcionar de forma teleoperada.
  - El sistema deberá ser capaz de identificar un fruto anómalo de otro no anómalo.

## Metodología

Para poder alcanzar una solución satisfactoria es necesario cumplir los objetivos específicos. Entonces, se mostrará como se planea cumplir con ellos y validar las soluciones para cada objetivo. Cabe mencionar que se uso la metodología del diseño mecatrónico ya que es el tipo de solución que se desea diseñar.

Antes de todo, se revisaría literatura científica que sustente el desarrollo de un sistema móvil para el monitoreo de cultivos de cacao en espacios abiertos así como la tecnología disponible para lograr este objetivo y su estado del arte. Asimismo, se investigaría información sobre las plantaciones de cacao y los síntomas visuales en las mazorcas cusadas por un deficiente cuidado.

Luego para poder obtener un sistema móvil que pueda revisar 60 arboles en dos horas por ciclo, sería necesario la selección de una plataforma móvil que pueda cumplir estos requisitos maniobrabilidad en pendientes. Para validar esto, se evaluaría que las pendientes bajo las que la solución final se puede desplazar incluyan a las del terreno de la plantación. Asimismo es necesario seleccionar una fuente de energía que le permita funcionar al sistema 2 horas y realizar la tarea de inspección para 60 arboles.

Asimismo, para obtener un sistema de sensado en espacio abiertos, se haría uso de la metodología de diseño mecatrónico para poder seleccionar que tipo de dispositivo permitiría captar información sobre la posición, los obstáculos y la orientación de la solución completa. Luego para validar su uso, se describirá como puede ir montado a la solución y como se conectaría con los demás elementos.

Por otro lado, para desarrollar un sistema que pueda detectar cacaos anómalos, se utilizaría lo investigado sobre la tecnología disponible para desarrollar un sistema que pueda cumplir la tarea. A continuación, se validaría el sistema obtenido con cierta cantidad de imágenes de cacao y se buscaría que su exactitud sea mayor al 50% ya que demostraría que el sistema obtendría mas aciertos que errores. Sin embargo, siempre se aspiraría a no obtener ningún error.

Por ultimo, para desarrollar el sistema de irrigación, se escogería los tipos de dispositivo que son necesarios para la tarea a través del uso de la metodología de diseño mecatrónico. Luego se seleccionaría los elementos específicos para la tarea y se validaría a través del cálculo del alcance del chorro. Por otro, lado se calcularía el volumen de liquido necesario para irrigar 60 arboles y se buscaría que el contenedor de este liquido pueda transportas más que este volumen necesario.

Después de todo esto, se detallaría las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del proyecto de diseño. Asimismo, se describirá como podría mejorar el sistema en el futuro para cumplir la tarea en el cuidado de los cultivos con mayor eficiencia.



# Capítulo 1

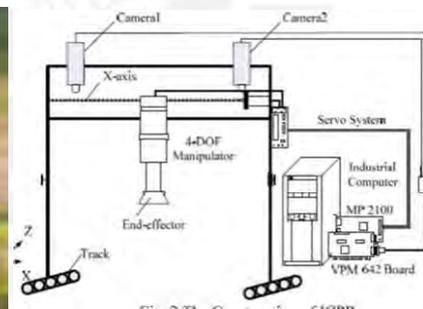
## Marco de referencia

### 1.1 Marco Histórico

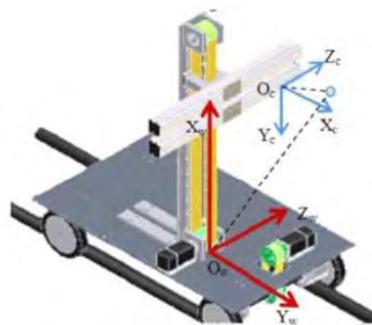
Publicaciones en revistas y conferencias muestran diseños e implementaciones de robots para tareas agrícolas. Existen algunos como el proyecto realizado por D. Anthony, el cual usa un sensor de medición láser para calcular la altura de los cultivos de maíz [6](Figure 1.1a) ; hay también algunos como el ICPR (Inteligente Cotton Picking Robot) el cual usa visión por computadora para la cosecha de algodón [7](Figure 1.1b); El proyecto realizado por C. Xia et al, el cual usa visión estéreo para aplicación de pesticidas [8] (Figure 1.1c); El robot realizado por K. Gotou, el cual usa visión 3d para la cosecha y plantación de tomate [9](Figure 1.1c). En todos estos casos se ha enfocado el uso en granjas y cultivos uniformes; de este modo, se ha ignorado la posibilidad de maniobrar sobre terreno abrupto, lo cual también se presenta en cultivos.



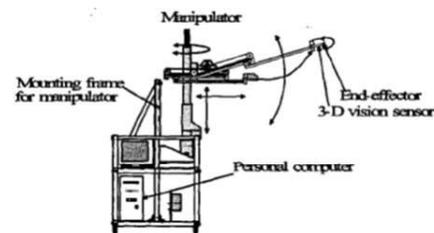
(a) En la medición del cultivo de maíz



(b) Cosecha de algodón



(c) Aplicación de pesticidas



(d) Cosecha y plantación de tomate

Figura 1.1: Tareas de agricultura donde se usa robots(Fuente: IEEE.org)

Además, también se han encontrado otros robots terrestres para cultivo tales como el eAGROBOT, el cual explora el cultivo, aplica pesticidas y procesa imágenes en la nube [10]; Un tractor John Deere automatizado, el cual usa GPS para guiarse y moverse de manera autónoma [11]; El proyecto que ha desarrollado T. Hague, el cual esparce pesticida en campos de horticultura [12]; el Agrob V14, el cual se usa SLAM(Simultaneous localization and Mapping) para cuidar viñedos en una colina [13]. En estos casos se da enfoque al cultivo sobre diferentes tipos de terreno; sin embargo, no se da atención a sistemas agro-forestales donde se presentan obstáculos.

Por otro lado, hay robots que se ha diseñado para cuidado de cultivos, tales como El robot elaborado por A. Sneha, el cual remueve la tierra, planta, esparce pesticida y recoge frutos [14]; El robot diseñado por B. Yoon, el cual puede viajar sobre territorio húmedo y cortar maleza [15]; El proyecto diseñado por K.M. Nielsen, el cual usa visión por computadora para registrar la maleza en agricultura de precisión [16]. Estas soluciones se han enfocado en la presencia de maleza y de pestes; sin embargo, no se ha dado tampoco estudio de algún uso parecido en sistemas agro-forestales.

Entonces, con el fin de tener sistemas capaces de maniobrar sobre terreno abrupto, esquivar obstáculos y que se enfoque en las deficiencias que pueden existir en un cultivo agro-forestal, se plantea el diseño de una solución que pueda cumplir estas funciones y asegurar de una manera más eficiente el cuidado de este tipo de cultivos.

## **1.2 Marco Teórico**

### **1.2.1 Características de los cultivos de Cacao**

Los cultivos tropicales como el cacao están generalmente restringidos a ser producidos en territorios comprendidos entre 10° antes y después de la línea ecuatorial con una temperatura no menor a 18° [17]. Sin embargo, debido al mejoramiento genético del cacao y la variedad de climas de en la cordillera de los andes se ha podido cultivar en otras latitudes pero no en climas muy diferentes como en Amazonas, San Martín y Junín. A continuación, se presentarán algunos datos obtenidos de publicaciones y de una visita a un campo de cultivo en la provincia de Chanchamayo.

## Terreno

El terreno de una plantación de cacao es seco y cubierto de hojas que llegan normalmente a una altura máxima de 10 cm. La plantación puede darse en lugares inclinados pero esto conlleva a arriesgar al personal recolector de las mazorcas de cacao; debido a esto, se prefieren los lugares llanos con pendientes de hasta 5° como se puede observar en la Figure 1.2. Asimismo cabe mencionar que existen protuberancias en el terreno de hasta 15 cm en algunos casos; desniveles de hasta 10 cm en donde se planta el cacao pero hasta a 40 cm del centro de la planta.



Figura 1.2: Plantación de Cacao en Chanchamayo(Fuente: propia)

## La planta de cacao

Por observaciones a los árboles de cacao, el árbol de cacao puede llegar hasta 4.4 m de altura sin embargo los frutos están desde los 35 cm hasta los 2.8 m; además, como se puede observar en la Figure 1.3 tiene forma cónica inversa, llegando a tener un ancho de hasta 4.6 m pero los frutos solo llegan a estar hasta una distancia de 1.73 m del tronco.

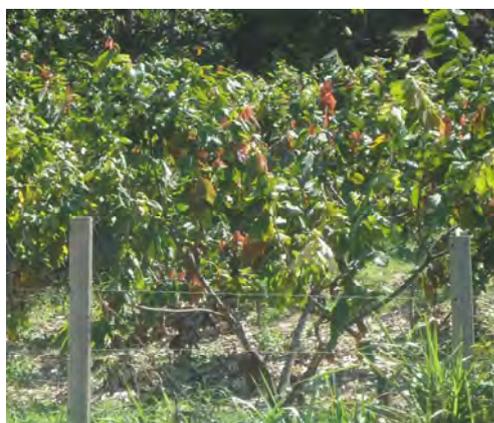
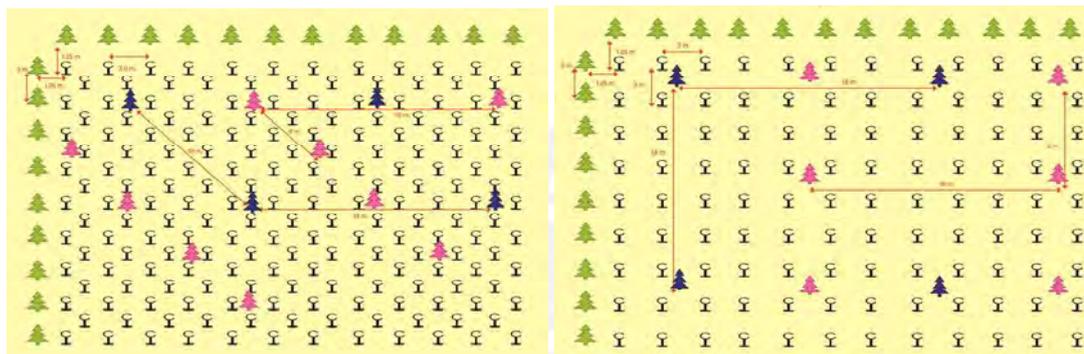


Figura 1.3: Planta de Cacao de Chanchamayo(Fuente: propia)

## Plantaciones de Cacao

En el paquete tecnológico de cultivos de cacao [4], se recomienda que el cultivo de Cacao sea de las dos siguientes formas que se muestra en la Figure 1.4a y en la figura Figure 1.4b; con la condición adicional de que se mantenga de tres metros a más la distancia entre árbol y árbol para obtener un buen balance de sombra y cantidad de hojas. Esto también se observó en la plantaciones de cacao de Chanchamayo.



(a) Plantación en tresbolillo(Fuente:DEVIDA) (b) Plantación en cuadrado(Fuente:DEVIDA)

## Las mazorcas del cacao ,sus enfermedades y tratamiento recomendado

Las mazorcas sanas y maduras de cacao tienen la siguiente apariencia como se observa en la Figure 1.5a. Estas pueden llegar a medir hasta 25 cm y crecen desde los 30 cm del suelo hasta los 2.8 metros. Con respecto a las enfermedades a la planta de cacao, estas pueden darse a las hojas, tronco o mazorcas; siendo la última la que ha ocasionado grandes pérdidas en el país y en Brasil también [18]. Por otro lado, una forma de identificar fácilmente la infección en un fruto del cacao es detectando las manchas en el fruto, las cuales son de color marrón o blanco a pesar de la diferencia del agente infeccioso como se puede observar en las Figure 1.5b, Figure 1.5c y Figure 1.5d. En cuanto al tratamiento, una vez infectado la mazorca, es recomendable retirarla cuando el clima es húmedo y cubrirlo con cal. además, para evitar la transmisión a las demás, según el paquete tecnológico del cacao [4], es recomendable rociar los árboles a razón de 200 litros de insecticida cúprico por hectárea o 175 ml por árbol .



(a) Frutos de Cacao(Fuente:cacaomovil.com)



(b) Cacao infectado con Moniliasis(Fuente:cacaomovil.com)



(c) Cacao infectado con escoba de bruja(Fuente:iniap.gob.ec)



(d) Cacao infectado con mazorca negra(Fuente:cacaomovil.com)

## 1.2.2 Redes Neuronales convolucionales (CNN) para la tarea de detección de objetos

El uso de las CNN para la tarea de detección de objetos es una técnica que se ha desarrollado desde los años 80 [19] en paralelo con los campos del que es parte. Estos son la inteligencia artificial computacional y la visión por computadora que ya evolucionaban desde los años 50 [20][21].

En la tarea de detección de objetos, el proceso clásico era obtener candidatos; luego obtener características de estos a través de descriptores tales como Template matching [22], Local binary Patterns[23], histograma de gradientes orientados[24], filtros de Haar[25], SIFT[26], SURF[27] etc. y con estos descriptores, clasificarlos como objeto detectado o no por medio del uso de clasificación lineal[28], función logística[29] o máquinas de vectores de soporte[30], Sin embargo con el uso de las CNN este proceso de 3 pasos se convierte en solo 2 ya que este obtiene las características y clasifica al mismo tiempo.

## Estructura de una red Neuronal

Para empezar se debe mostrar una red neuronal básica como la figura 1.6. En esta se ve como las entradas  $x$  entran a la capa inicial, se multiplican con los pesos  $w$  se suman y entran a la función de activación de la neurona dando lugar a un nuevo valor, pasan a la siguiente capa y así sucesivamente hasta llegar a la salida que puede ser un valor o un vector de valores. Cabe mencionar que usualmente los valores de los pesos suelen ser inicializados de forma aleatoria con valores entre 0 y 1. Asimismo la salida, que es la clasificación obtenida del sistema, es expresado en vectores que dependen del tipo de clasificación e igual sus valores están en el rango de 0 a 1. Por ejemplo si se quiere clasificar un candidato entre que es lo que se busca o no bastara un vector  $[x]$  pero si puede ser dos elementos diferentes  $[x, y]$  siendo el primer valor  $x$  la certeza de ser el primer elemento y  $y$  la certeza de ser el segundo elemento; además ya que el entrenamiento es supervisado, las salidas correctas para corregir el entrenamiento también están expresadas de esta manera.

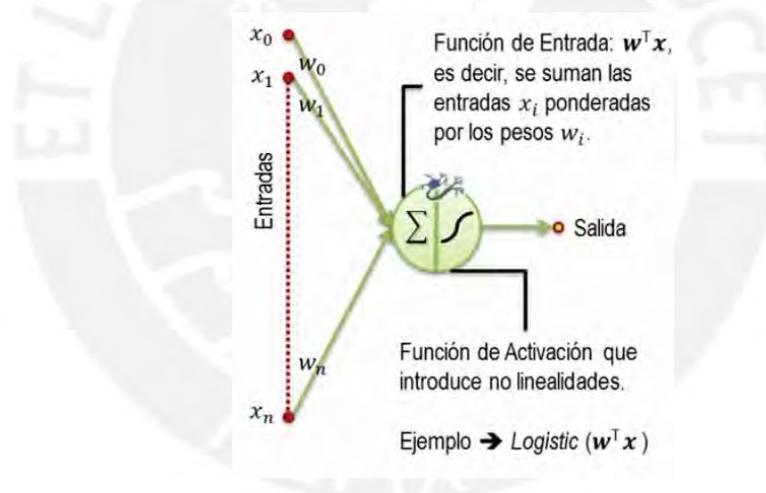


Figura 1.6: Red neuronal básica(Fuente: coursera.com)

Asimismo, es importante saber que existen diferentes funciones de activación, capas y modos de estructurar estas redes neuronales para dar lugar a diferentes arquitecturas o modelos que pueden dar lugar a diferentes valores de precisión. Por un lado, entre las funciones más comunes de activación existe la función Logística, Tanh, Relu y Softplus que se pueden observar en las ecuaciones 1.1 - 1.4.

$$\text{F. Logística : } f(x) = \frac{1}{1 + e^{x-0.5}} \quad 0 \leq f(x) \leq 1 \quad (1.1)$$

$$\text{Tanh : } f(x) = |\tanh x| \quad -1 \leq f(x) \leq 1 \quad (1.2)$$

$$\text{ReLu : } f(x) = \max(0, x) \quad 0 \leq f(x) \quad (1.3)$$

$$\text{Softplus : } f(x) = (1 + e^{-x}) \quad 0 \leq f(x). \quad (1.4)$$

Asimismo estas neuronas se agrupan en capas de diferentes tipos tales como los Fully connected que unen todas las entradas a todas las neuronas objetivo, las Subsampling que toman "n" grupos de neuronas de entrada para conectarlas a "n" neuronas cada uno y las convolucionales que usan matrices de pesos que convolucionan una región de una matriz de entrada para activar una neurona (ver imagen 1.7).

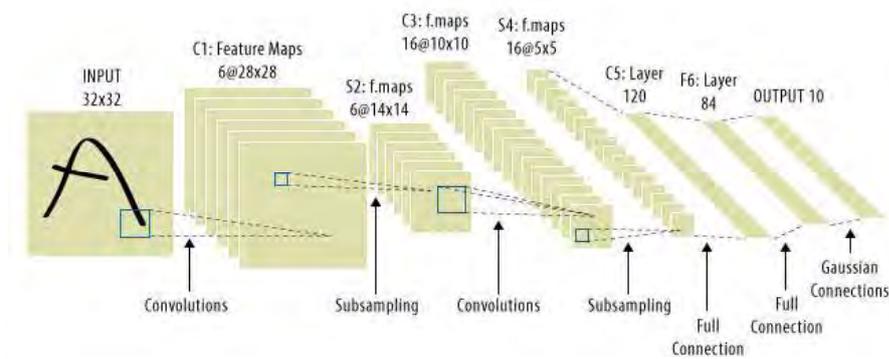


Figura 1.7: Ejemplo de red neuronal (Fuente: altera.com)

## Entrenamiento de las Redes Neuronales

Existen dos modos de entrenamiento para las redes neuronales. Por un lado, puede ser supervisado, si se le muestra cual es el resultado esperado a cada entrada, o no supervisado, si el sistema aprende a agrupar resultados en n grupos por similitud y se entrena en relacionar que a cada entrada pertenece a uno de esos n grupos. En el caso de visión por computadora suele ser supervisado.

Asimismo cabe mencionar que es recomendable dividir la base de datos para entrenar usualmente en una relación de 7 a 3 ; el mayor para el entrenamiento propiamente dicho y el otro para la validación. Con el fin de evitar un modelo que solo funcione con lo que ha entrenado.

El proceso del entrenamiento consiste en afinar los pesos  $w$  a través del proceso siguiente.

1. Primero entran a la CNN las imágenes de entrenamiento( $X$ ) con sus salidas correctas( $Y_c$ ). De esto la CNN nos devuelve una salida obtenida ( $Y_o(X)$ ), que podría ser la salida esperada o no
2. Ya que las salidas obtenidas y las salidas correctas pueden ser diferentes se calcula la *Loss function* ( $L$ ), de cada una de las imágenes con las cuales se ha entrenando, a través de diferentes formulas como por ejemplo las siguientes.

(a) *Square Loss*:  $L = 0.5(Y_c - Y_o(X))^2$

(b) *Hinge Loss*:  $L = \max(0, Salida_{Y_c - Y_o(X)})$

(c) *01 Loss*:  $L = 0$  si ( $Y_c = Y_o(X)$ ) sino es 1

3. Con las  $N$  *Loss function* obtenidas de  $N$  imágenes de entrenamiento, se calcula la *Cost function* ( $E$ ) a través de diferentes formulas como por ejemplo el error cuadrático medio ( $MSE$ )

(a)  $MSE = \frac{1}{(N)} \sum L$

4. Entonces se procede a afinar los pesos  $w$  a través de la optimización de la *Cost function* con la siguiente operación.

(a)  $w_{nuevo} = w_{anterior} - \eta \frac{dL}{dw}$

5. Finalmente, este ciclo de entrenamiento se repite varias veces hasta que la *Loss function* sea 0 o hasta que uno este satisfecho. Por otro lado, cabe mencionar que el impacto de las correcciones puede hacer divergir el sistema y para evitar eso se usa un *Learning rate* ( $\eta$ ) que controla el impacto de la corrección y puede ir decreciendo junto con el *Loss function* después de cada ciclo de entrenamiento.

### **Evaluación de rendimiento del entrenamiento**

Para poder realizar esta evaluación es necesario lo siguiente. Por un lado, el registro de la matriz de confusión que muestra la cantidad de los verdaderos positivos ( $VP$ ) y negativos ( $VN$ ) y los falsos positivos ( $FP$ ) y negativos ( $FN$ ) obtenidos con el uso del sistema. Asimismo las medidas básicas de rendimiento que se muestran en la lista a continuación.

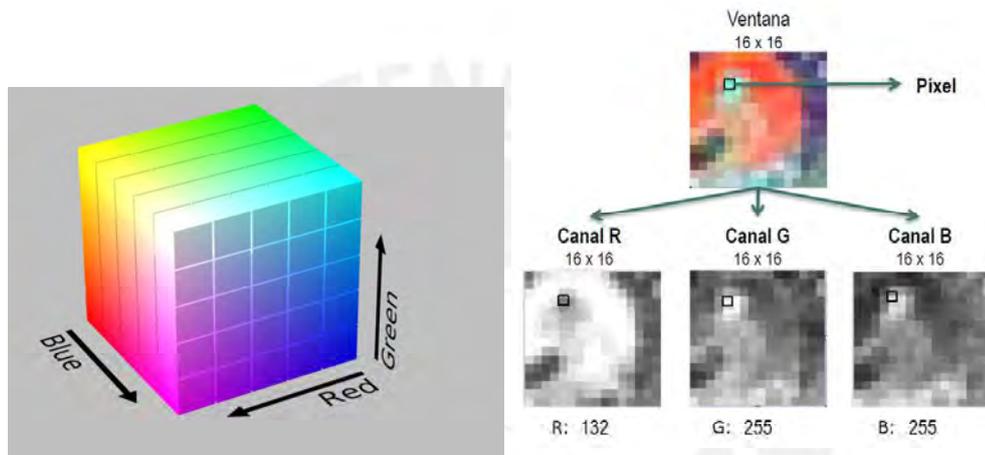
- Exactitud (*ACC*): Que tan cerca esta de una clasificación completamente exacta
  - $ACC = (VP + VN)/(VP + VN + FP + FN)$
- Ratio de error (*ERR*): Que tan cerca esta de una clasificaron completamente errónea
  - $ERR = (FP + FN)/(VP + VN + FP + FN)$
- Sensitividad (*SN*): La proporción de positivos clasificados correctamente respecto a los verdaderos positivos
  - $SN = (VP)/(VP + FN)$
- Especificidad(*SP*): La proporción de negativos clasificados correctamente respecto a los verdaderos negativos
  - $SP = (VN)/(VN + FP)$
- Precisión (*PREC*): La proporción de los positivos clasificados correctamente respecto a los clasificados como positivos
  - $PREC = (VP)/(VP + FP)$
- Ratio de falsos positivos(*FPR*): La proporción de los clasificados incorrectamente como positivos respecto a los que deberían ser clasificados como negativos
  - $FPR = (FP)/(VN + FP)$

### 1.2.3 Mapas de color HSV y HSL para la deteccion de cacaos anómalos

El uso de los mapas de color HSV y HSL para la detección de enfermedades es una técnica que se ha usado varias en casos tales como en la detección de infecciones de cultivos de maíz, avena y arroz en la India [31]; deteccion de cambios en cultivos amplios en China [32] y hasta evaluación de la nutrición en plantas en Iran [33]. Su valor consiste en que a diferencia de las imágenes RGB usa no tres capas para el color si no solo dos. Por este motivo, es relevante su uso cuando se trata de infecciones. A continuación se explicará como son los mapas de color RGB, HSL y HSV.

## Mapa de color RGB

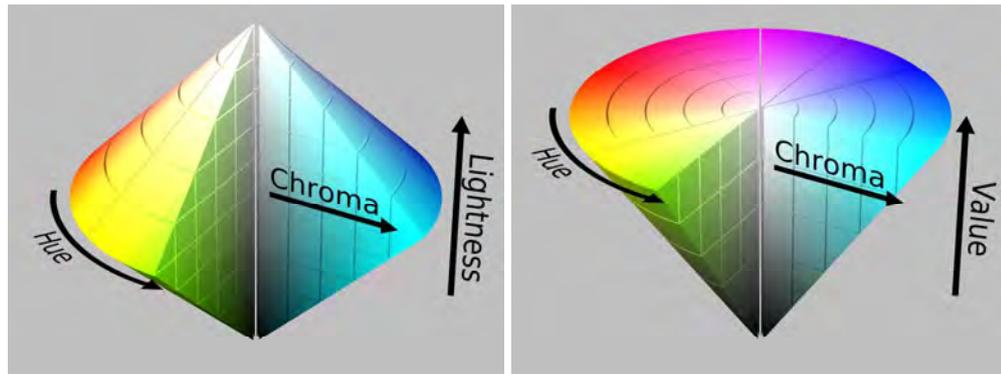
Como se mencionó, las imágenes digitales suelen almacenarse como matrices de 3 capas de dimensiones iguales a la dimensión de la imagen en píxeles; asimismo se debe saber que es común usar el mapa de color RGB. Osea las 3 capas son para las intensidades de Rojo (Red), Verde (Green) y Azul (Blue). Por esto, se suele decir que es un cubo de color como se puede ver en la figura 1.8a. Cabe mencionar, que las intensidades están expresadas del 0 (intensidad nula) al número mayor posible según la cantidad de bits por píxel como se puede ver en la figura 1.8b.



(a) Cubo de color (Fuente: Horst Frank) (b) Capas RGB de una porción de imagen de 8 bits (Fuente: Universidad Autónoma de Barcelona)

## Mapa de color HSV y HSL

Los mapas de color HSV y HSL son parecidos ya que los dos tienen las dos capas de color separadas de una tercera. El mapa de color HSL obtiene su nombre de *hue* (tonalidad), *saturation* (saturación) y *lightness* (luminosidad); en cambio, el mapa de color HSV obtiene su nombre de *hue* (tonalidad), *saturation* (saturación) y *value* (valor). Asimismo las transformaciones desde el mapa RGB a cada uno es diferente. Debido a estas transformaciones, si se considera el mapa RGB como un cubo, el mapa de color HSL sería un bicono y el mapa de color HSV sería un cono como se observa en las figuras 1.9a y 1.9b donde *Chroma* es la saturación.



(a) bicono de color HSL(Fuente: Horst Frank) (b) cono de color HSV(Fuente: Horst Frank)

Ahora es importante explicar el proceso de transformación al mapa de color HSL píxel por píxel.

1. Se obtiene el valor de cada píxel del mapa RGB que se llamará  $R$ ,  $G$  y  $B$  y el máximo entre ellos ( $MAX$ ) y el mínimo entre ellos ( $MIN$ )
  - $MAX = Max(R, G, B)$
  - $MIN = Min(R, G, B)$
2. Se halla la luminosidad( $L$ ) con los valores del mayor y el menor
  - $L = 0.5(MAX + MIN)$
3. Se halla el valor de la saturación ( $S$ ), la cual depende del valor de  $L$ 
  - Si  $L$  es menor a 0.5 :  $S = (MAX - MIN)/(MAX + MIN)$
4. Se halla el valor de la tonalidad ( $H$ ) la cual depende de cual ha sido el mayor entre  $R, G$  y  $B$ . Asimismo este resultado sera obtenido en radianes por lo que se suele pasar a grados sexagesimales.
  - Si  $R$  fue mayor :  $H = (G - B)/(MAX - MIN)$
  - Si  $G$  fue mayor :  $H = 2.0 + (B - R)/(MAX - MIN)$
  - Si  $B$  fue mayor :  $H = 4.0 + (R - G)/(MAX - MIN)$

Asimismo, es importante explicar el proceso para transformar del mapa RGB al HSV píxel por píxel.

1. Se obtiene el valor de cada píxel del mapa RGB que se llamará  $R$ ,  $G$  y  $B$  y el máximo entre ellos ( $MAX$ ) y el mínimo entre ellos ( $MIN$ )
2. El elemento valor ( $V$ ) es el máximo entre los valores  $R$ ,  $G$  y  $B$ .
  - $V = MAX$
3. El valor de saturación ( $S$ ) se halla de dos formas según el valor de  $MAX$ 
  - Si  $MAX$  es 0:  $S = 0$
  - Si  $MAX$  no es 0:  $S = 1 - MIN/MAX$
4. Para hallar el valor de la tonalidad ( $H$ ), depende de  $R$ ,  $G$ ,  $B$ ,  $MAX$  y  $MIN$ . Asimismo este valor será obtenido en grados sexagesimales
  - Si  $MAX = MIN$  :  $H$  no es definido
  - Si  $MAX = R$  y  $G \geq B$  :  $H = 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 0^\circ$
  - Si  $MAX = R$  y  $G < B$  :  $H = 60^\circ \times \frac{G-B}{MAX-MIN} + 360^\circ$
  - Si  $MAX = G$  :  $H = 60^\circ \times \frac{B-R}{MAX-MIN} + 120^\circ$
  - Si  $MAX = B$  :  $H = 60^\circ \times \frac{R-G}{MAX-MIN} + 240^\circ$

## Capítulo 2

### Diseño del sistema Mecatrónico

En la figura 2.1 se presenta la propuesta de sistema mecatrónico obtenida. Esta se basa en el concepto conseguido con la metodología de diseño mecatrónico usada en el anexo A. Sus dimensiones son  $83\text{cm}$  de ancho,  $1.1\text{m}$  de largo y  $1.1\text{m}$  de alto pudiendo alcanzar  $2.1\text{m}$  de alto si la columna eléctrica se estira. Utiliza el vehículo RMP440 LE para desplazarse sobre un terreno agroforestal y el computador Beaglebone para el control. Posee un sistema de irrigación que le permite alcanzar hasta  $3.2\text{m}$  de altura por medio del uso combinado de una bomba y la columna eléctrica. Además cuenta con un sistema de visión por computadora basada en redes neuronales que le permite utilizar el computador Jetson TK1 para encontrar cacaos anómalos con un 55% de exactitud. Mas aún, posee sensores adicionales como el GPS y los de distancia por ultrasonido. A continuación, se explicará el diseño y características adicionales.

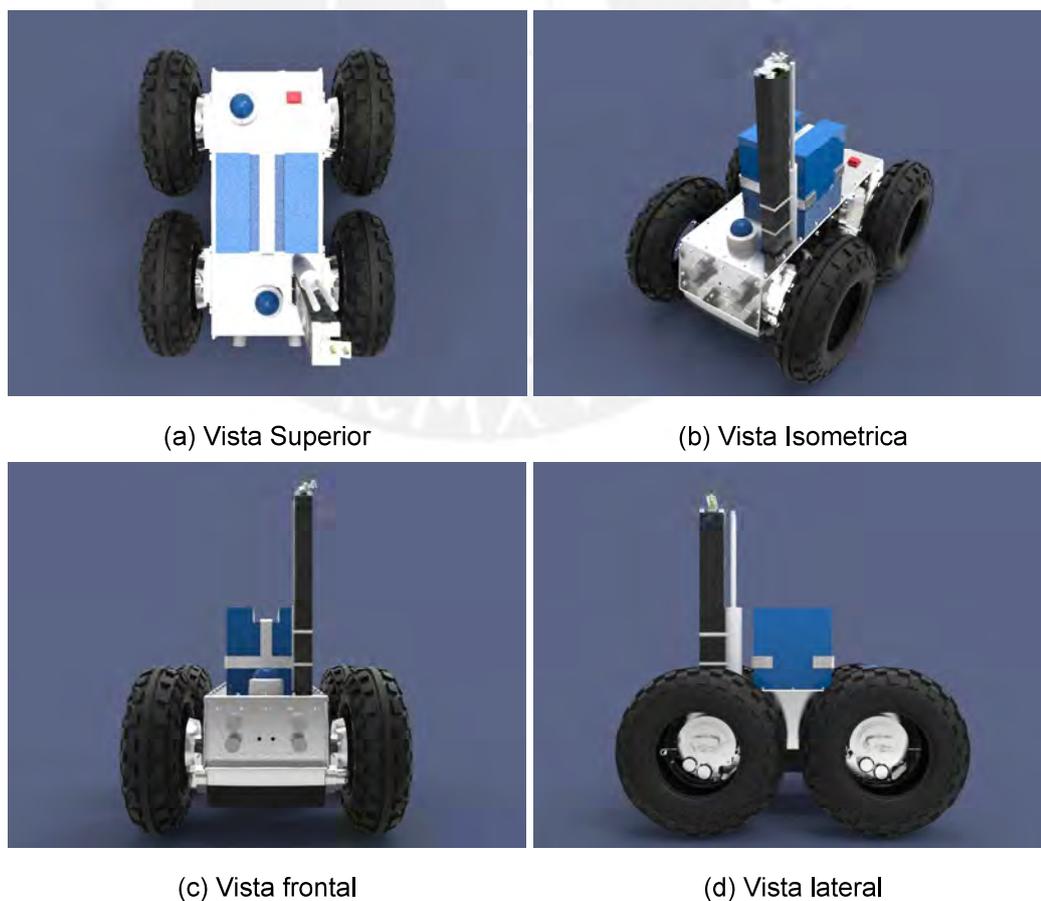


Figura 2.1: Diseño final de la propuesta(Fuente propia)

## 2.1 Diseño del sistema de Control

### 2.1.1 Diagrama de flujo general del sistema

El flujo de operaciones principal se puede observar en la figura 2.2. Para empezar, se verifica que exista una comunicación adecuada con la estación base. Luego, se verifica si todos los sensores funcionan adecuadamente; en caso que no todos funcionaran, aún se podría continuar con la operación si se deseara. A continuación, se inicia el control del vehículo y al terminar, se apaga todos los elementos.

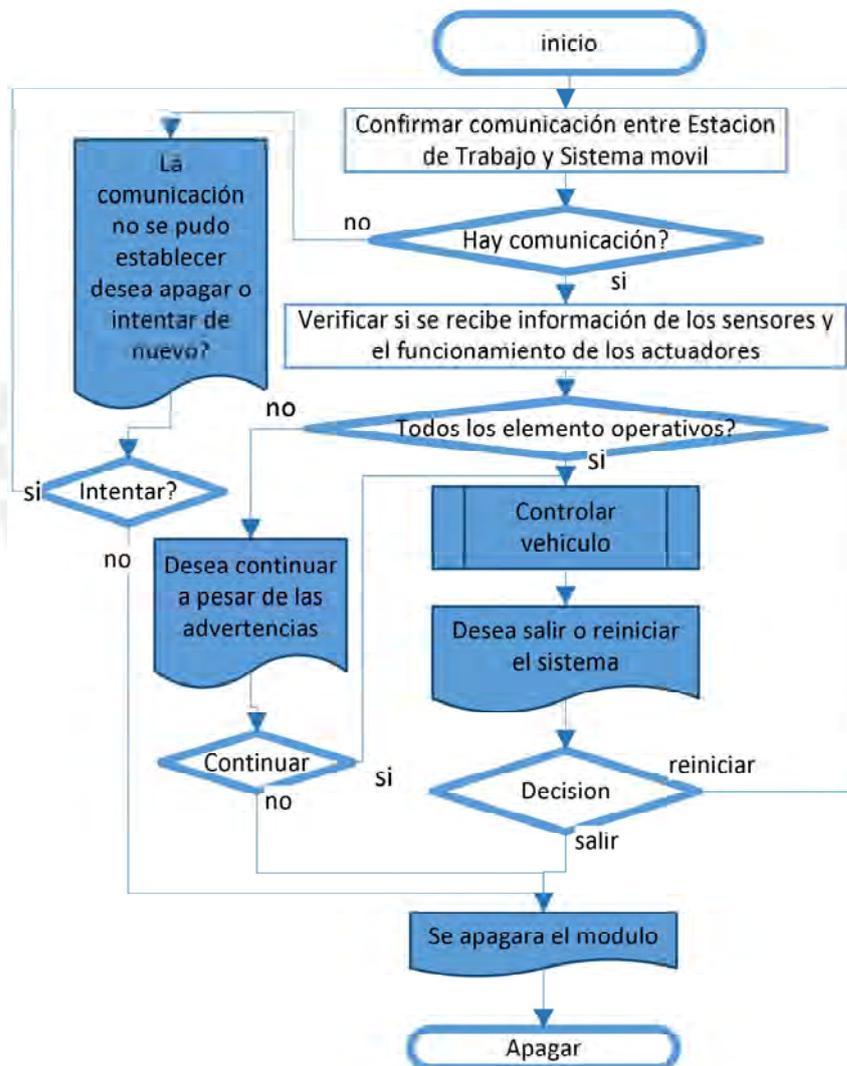


Figura 2.2: Diagrama de flujo principal del sistema(Fuente: propia)

## 2.1.2 Función Controlar vehículo

Después de verificar el funcionamiento de los elementos y la comunicación, se procede a manejar el vehículo; asimismo se podría obtener información de los sensores en una pantalla para observar las imágenes captadas por las cámaras; la inclinación del vehículo; la distancia de los objetos al frente de este y la corriente que se utiliza al elevar la columna para detectar sobreesfuerzos. La operación del vehículo es de forma manual pero posee funciones que puede realizar de forma autónoma. El control manual puede ejercerse sobre las cámaras, las ruedas, la bomba y la columna eléctrica. Por otro lado, de forma autónoma se puede realizar el riego y la inspección de el árbol de cacao desde la posición que se encuentre; sin embargo es recomendable tener el árbol a la derecha del vehículo ya que la boquilla se encuentra a ese lado). De esta manera se llevaría a cabo el funcionamiento. El diagrama de flujo se puede observar en la figura 2.3

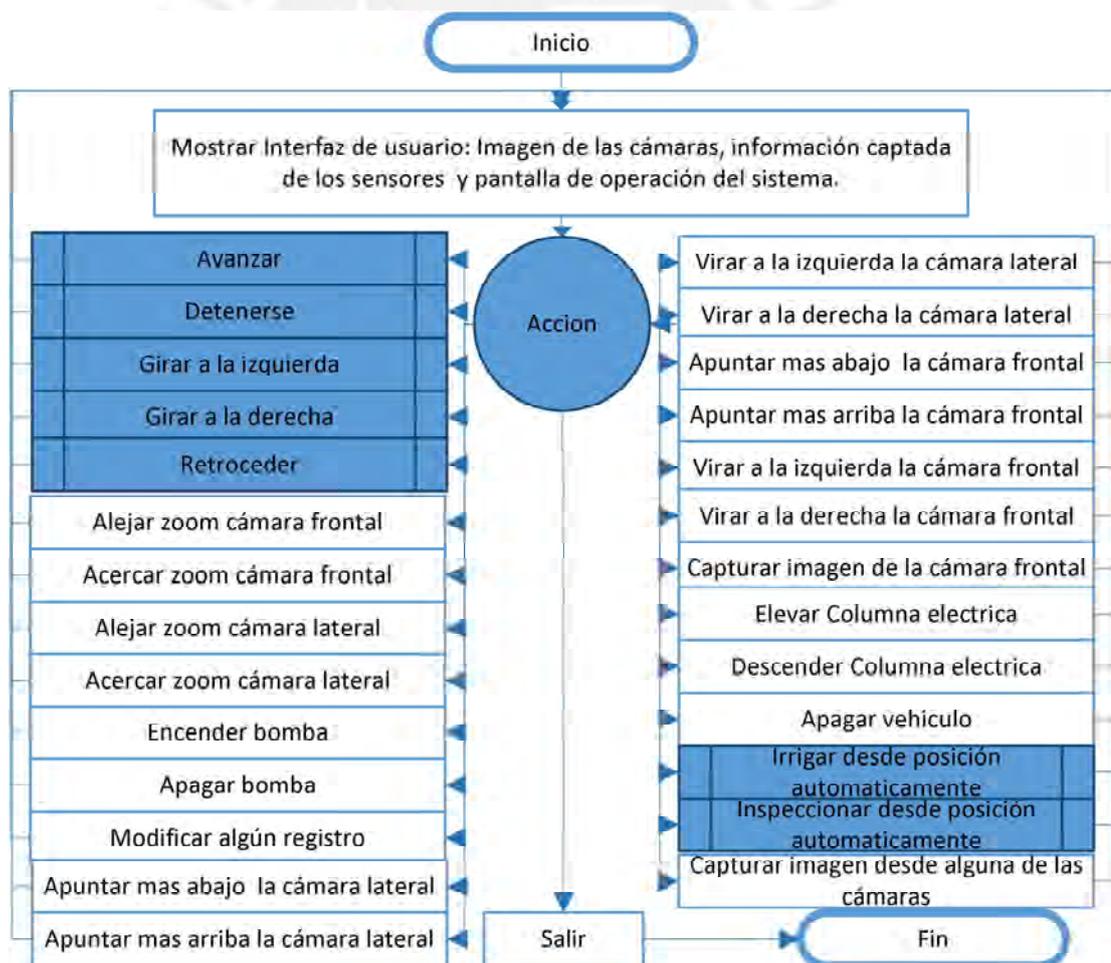


Figura 2.3: Diagrama de flujo de la función controlar vehículo(Fuente: propia)

### 2.1.3 Subfunciones de desplazamiento

Estas subfunciones muestran como se manejarían internamente el funcionamiento de las ruedas para cumplir una orden de desplazamiento (ver 2.4).

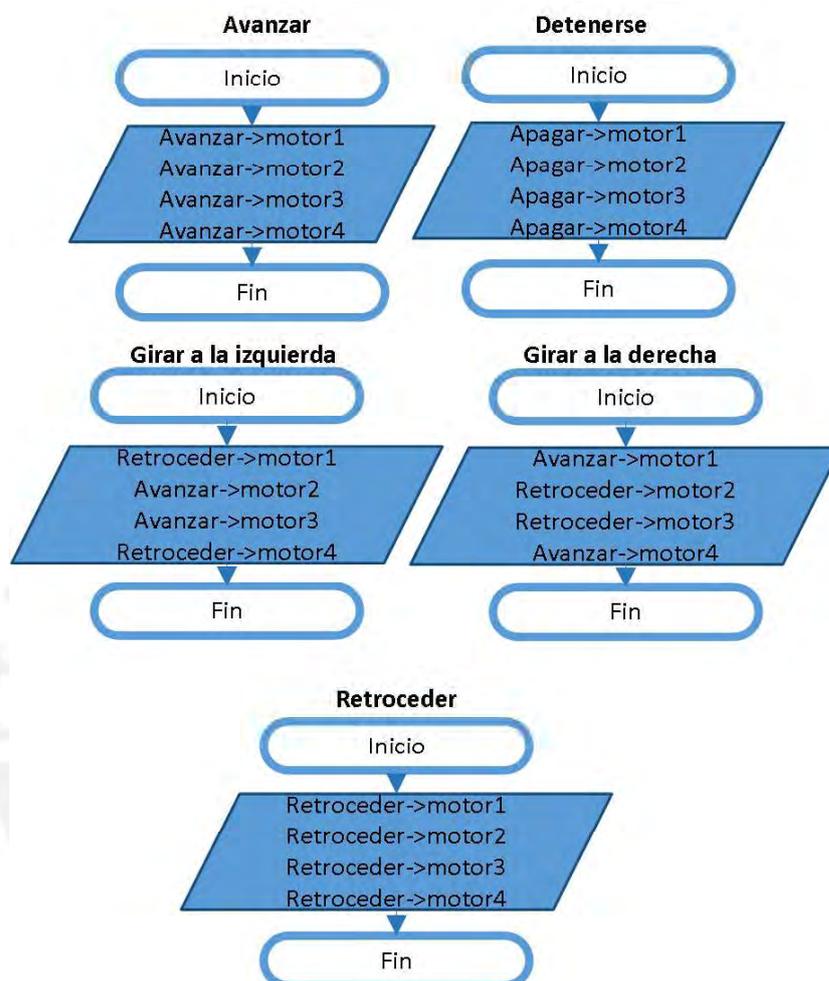


Figura 2.4: Diagrama de flujo de las subfunciones de desplazamiento(Fuente: propia)

### 2.1.4 Subfunción de Irrigar desde posición automáticamente

Esta subfunción se encarga de elevar la columna; irrigar desde la posición y descender la columna; todo esto después de entregarle la información del tiempo de riego. Asimismo esta tarea se puede realizar manualmente. Cabe mencionar que es recomendable irrigar el árbol a lo más, 13 segundos debido al caudal otorgado por la bomba y a las recomendaciones de la cantidad de riego a usar por árbol. El diagrama de flujo se puede observar en la figura 2.5.

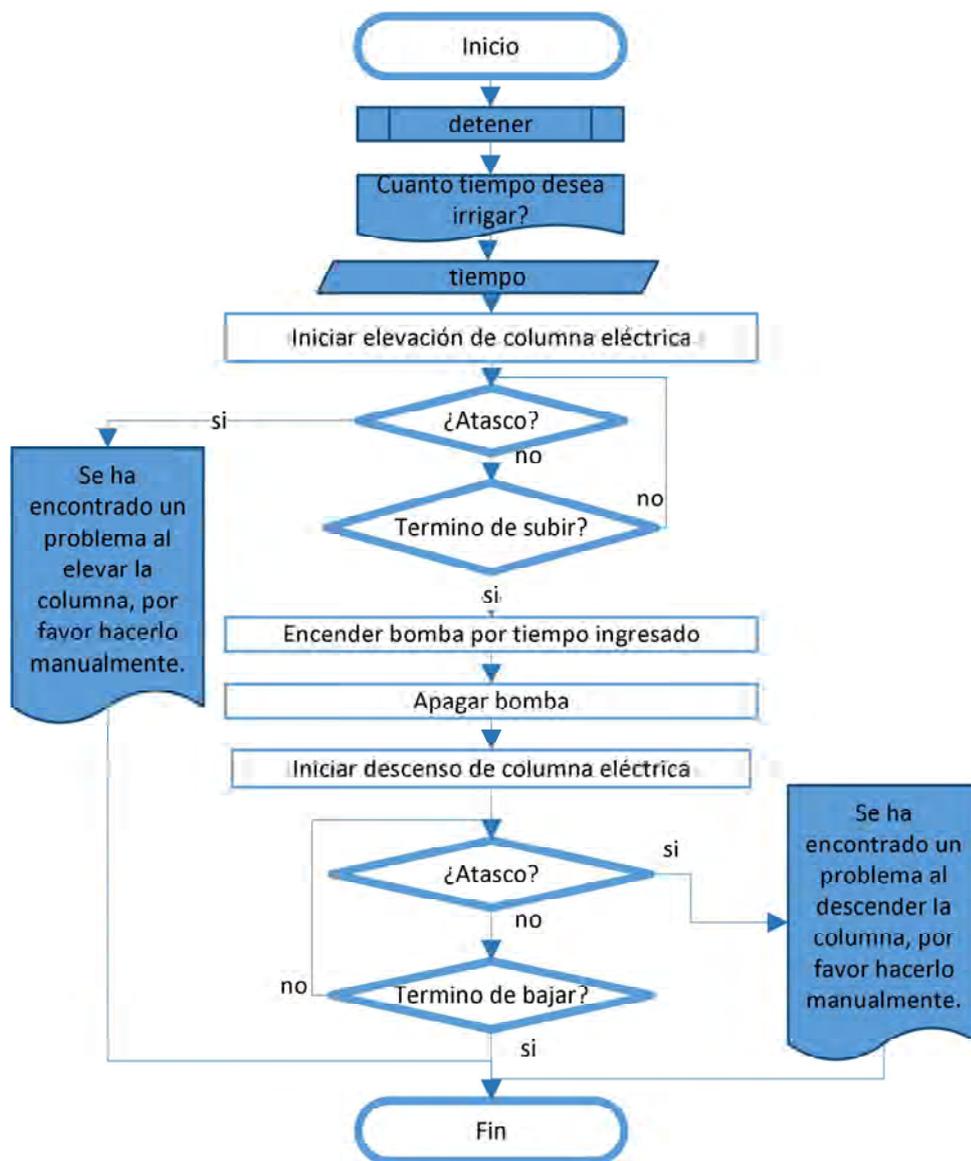


Figura 2.5: Diagrama de flujo de las subfunción de riego en posición(Fuente: propia)

### 2.1.5 Subfunción de Inspección desde posición automáticamente

Esta subfunción se encarga de capturar imágenes alrededor del vehículo y analizar si en estas imágenes existen zonas con cacaos anómalos. Esta tarea puede realizarse de forma manual si un especialista maneja el vehículo pero también puede realizarse de forma automática con cierto grado de exactitud(52%) con esta función a través del procesamiento de imágenes (el desarrollo de esta función se puede observar en la sección 2.2).. El diagrama de flujo se puede observar en la figura 2.6.

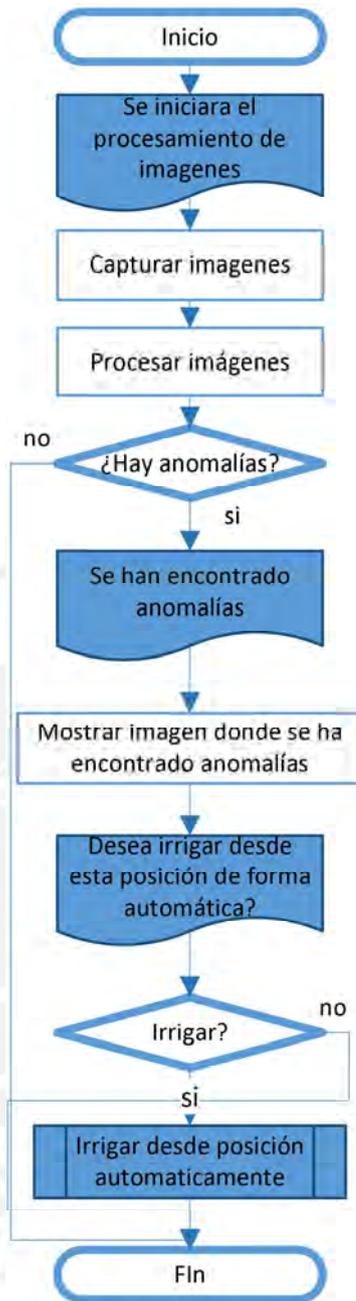


Figura 2.6: Diagrama de flujo de las subfunción de inspección en posición(Fuente: propia)

## 2.2 Diseño del sistema de detección de cacaos anómalos

Esta tarea nace de la necesidad del sistema para detectar cacaos anómalos en las plantas de cacao. Para lograr esto se dividió esta tarea en dos subtareas que se llevarían a cabo una tras otra después de haber capturado la imagen del árbol de cacao. La primera es detectar zonas de la imagen que contienen cacao y la segunda es analizar si estas zonas de imagen con cacao es de cacao anómalo.

### 2.2.1 Subsistema para reconocer si una imagen es cacao o no

Hallar si la porción de imagen que se procesa es cacao es una tarea de clasificación que se puede realizar a través del uso de CNN como se explicó en la sección 1.2.2 en conjunto con *Sliding window*[34]. De esta forma se tomará porciones de diferente tamaño cada ciertos píxeles en la imagen y luego se analizará con las CNN si esa porción de imagen es cacao o no como se puede observar en la figura 2.7.



Figura 2.7: Proceso de detección de cacao en una imagen(Fuente: propia)

### Arquitectura de CNN a usar para la detección

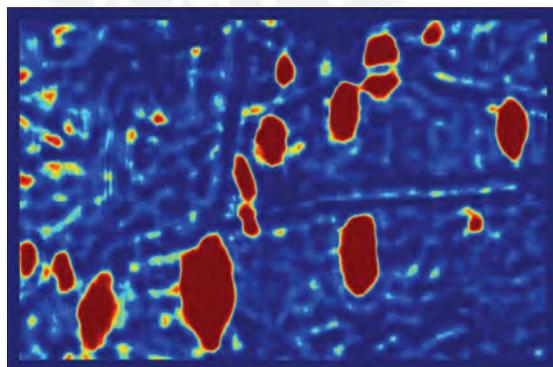
En el uso de redes neuronales (NN), es recomendable usar la arquitectura de NN con más eficiencia en el momento. De este modo para la detección de objetos se consultó la ILSVRC [35], el cual es un concurso que se enfoca en esta tarea. Ahí se encontró que la última ganadora que es la GoogLeNet [36]. Esta sería la más adecuada a usar; sin embargo, ha sido implementada con el uso de varias unidades procesadores gráficos (GPU) de gama alta con el objetivo de identificar una serie de objetos y no solo uno. Entonces ya que sería excesivo el uso de esta para detectar un solo tipo de objeto y con solo una GPU que es la Jetson TK1, se decidió evaluar el uso de CNN's simples o sea que no tengan muchas capas.

Entonces se propuso la evaluación de la CNN de Yan LeCun [37]; el bloque característico de la GoogLeNet [36] que es el *módulo Inception*; el bloque característico el penúltimo ganador de la ILSVRC que es el bloque Resnet de la CNN Microsoft Resnet [38]; y una combinación del módulo Inception y el bloque Resnet. De esta forma, esta evaluación, que se detalla más en el anexo D, arrojo como resultado que la CNN que combina el módulo Inception y el bloque Resnet es la que arrojo más exactitud con el conjunto de evaluación (94.4%). En la figura 2.9 se puede observar un diagrama de la arquitectura de CNN que combina el bloque Resnet y el módulo Inception.

Por otro lado, un ejemplo de uso del modelo en una imagen de una planta de cacao se muestra en la figura 2.8. Para esto se considero una ventanas de tamaño de  $30 \times 30$ . De esta forma cada pixel de la imagen resultante muestra la certeza de que la ventana de la que es el centro es un cacao a través de la paleta de color *jet* donde el azul intenso es 0% de certeza y rojo intenso es 100% de certeza.



(a) Planta de cacao



(b) Resultado

Figura 2.8: Capacidad de detección del modelo.(Fuente: Propia)

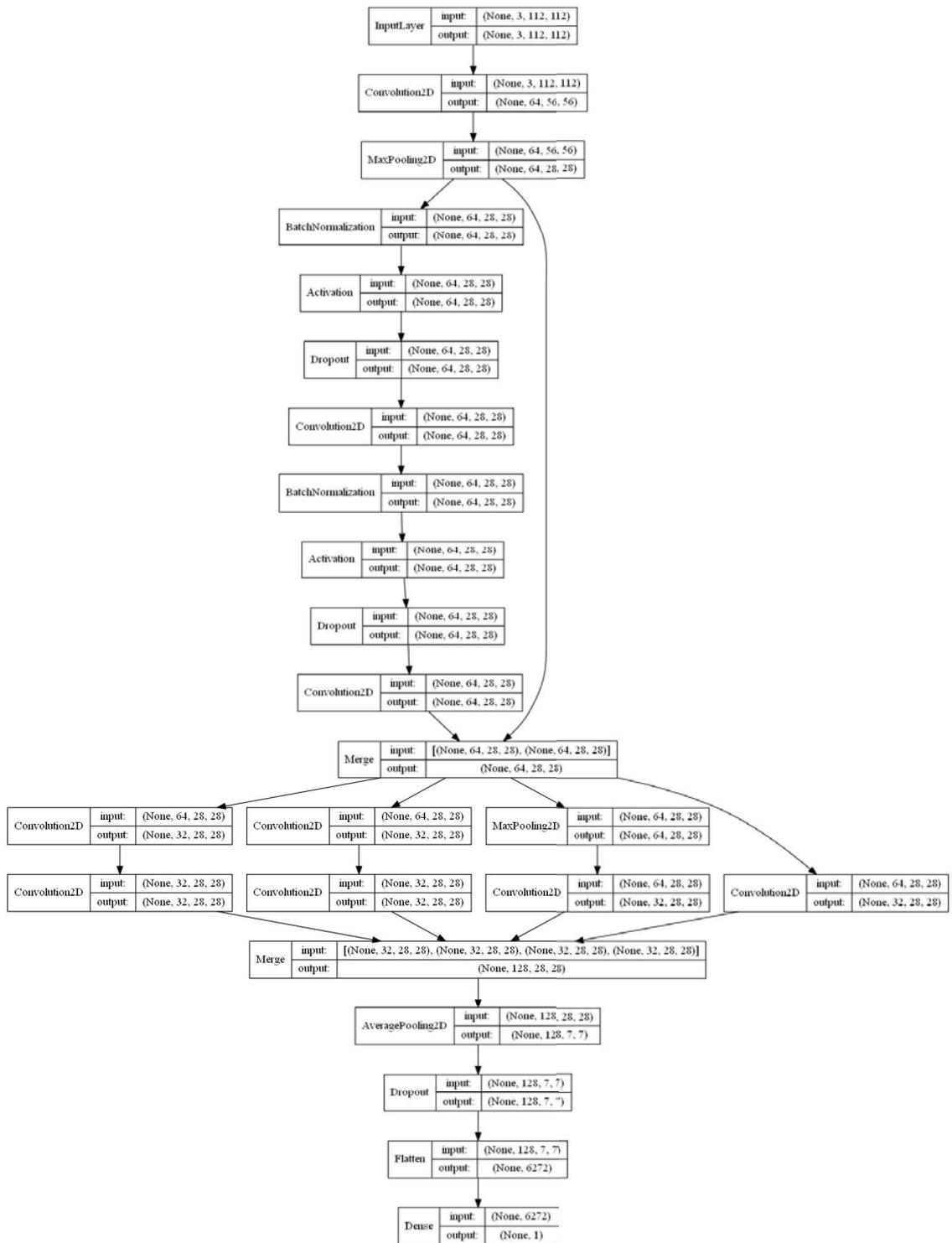


Figura 2.9: Arquitectura a usar(Fuente: propia)

## 2.2.2 Subsistema para reconocer si una imagen de cacao es de uno anómalo

A diferencia de la tarea de detección, el procedimiento en este es diferente debido a que las enfermedades son varias y la base de datos de imágenes de frutos anómalos es menor. Las enfermedades en los frutos de cacao como se han mostrado en la sección 1.2.1, se detectan por la variación del color en los frutos de cacao sin importar el color del cacao. Entonces con el objetivo de encontrar estas variaciones se decidió usar las CNN pero no en las imágenes de cacao sino en los histogramas 2D de color HSL, el cual se explico en la sección 1.2.3. En la figura 2.10 se muestra como son los mapas HSL de un cacao sano y uno enfermo.

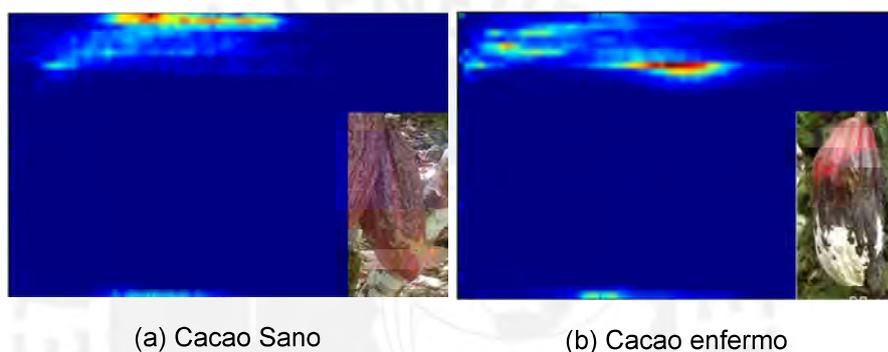


Figura 2.10: Mapas HSL de los cacaos(Fuente: Propia)

### Arquitectura usada

Al igual que con la tarea anterior, se entrenaron diferentes arquitecturas y se seleccionó la mejor para obtener un modelo satisfactorio. El proceso y los detalles del entrenamiento, la base de datos y la selección se puede observar en el anexo D.2. De este modo, se decidió usar el modelo basado en un bloque Resnet y el histograma de color basado en la transformación HSL el cual obtuvo una exactitud en la validación de entrenamiento de 94.8%; además obtuvo 92% de exactitud en la validación manual en la sección 3.1.2. En la figura 2.11, se puede observar un diagrama de la arquitectura a usar.

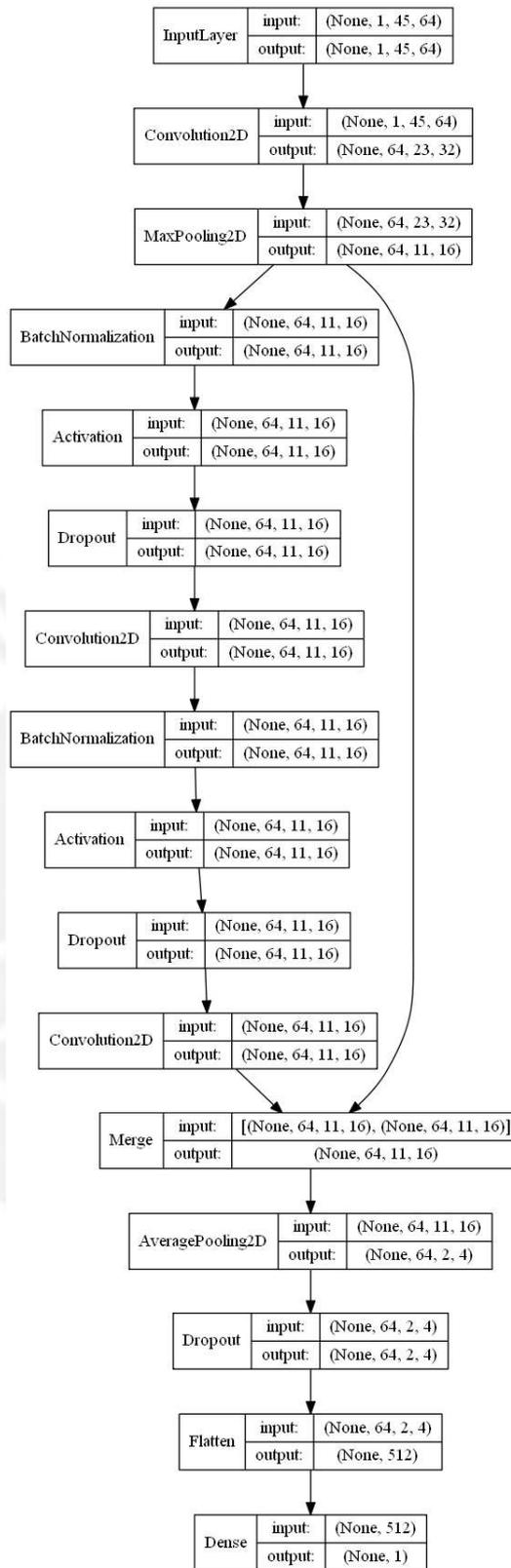


Figura 2.11: Modelo basado en el bloque Resnet para los mapas HSL (Fuente propia)

### 2.2.3 Sistema Combinado

Luego de obtener estos dos modelos, se uso estos dos en conjunto con *sliding window* con el objetivo de obtener el sistema deseado. Sin embargo, a pesar de que los dos tenían una exactitud mayor a 90%, se decidió realizar una evaluación del sistema en conjunto con 50 imágenes de árboles de cacao ya que no hay muchos disponibles como se detalla en la sección 3.1. De esto se obtuvo la exactitud alcanzada en una evaluación manual es de 55%. No obstante, para tratar de compensar esto se propone la redundancia de imágenes (osea tomar varias imágenes por planta de cacao) para evitar no detectar cacaos anómalos. Por último, se muestra un ejemplo del uso del sistema en la figura 2.12 donde la zona azul es la región de imagen clasificado como cacao no anómalo y la zona roja es la región clasificada como cacao anómalo..

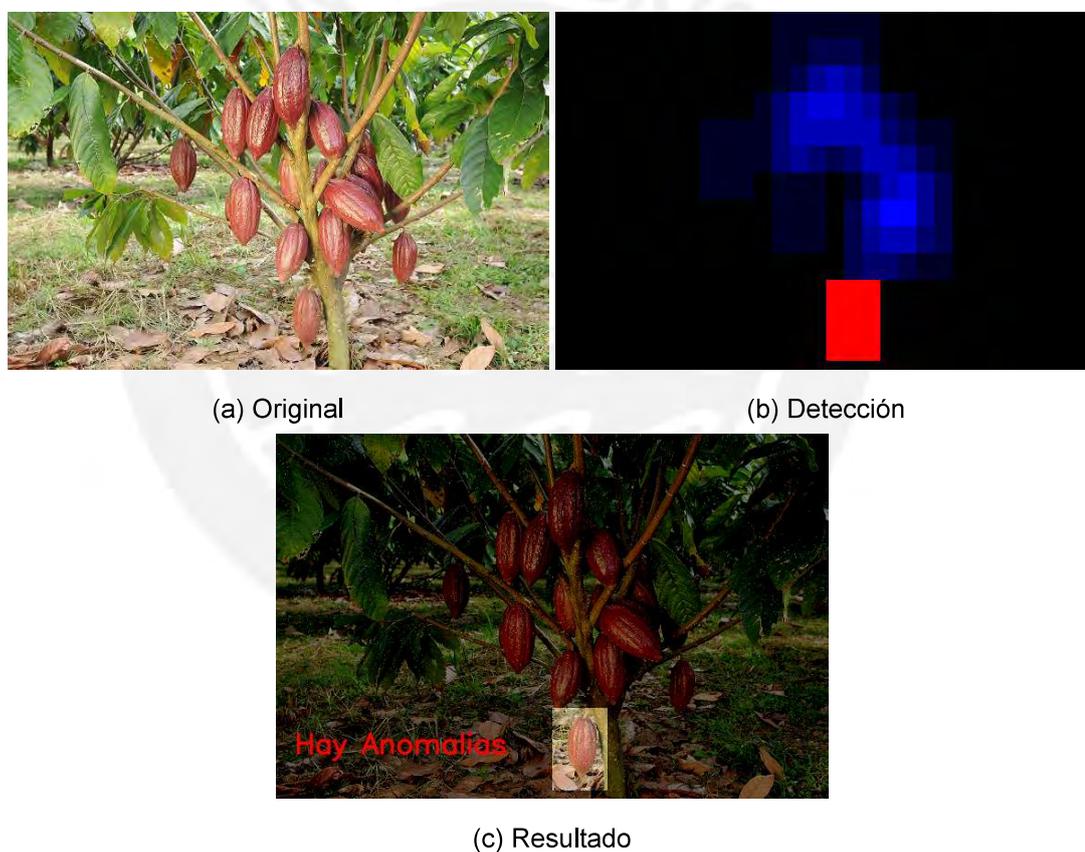


Figura 2.12: Sistema de detección de anomalías en el cacao (Fuente: Propia)

## 2.3 Diseño del sistema electrónico

En la figura 2.13 se puede observar la conexión general del sistema completo. El sistema está basado en la interconexión del sistema a través de un área local. De esta manera el procesador central podría obtener la información de los dispositivos y los sensores del vehículo a través de la red WI-FI generada por el módem que tiene una cobertura de hasta 7 millas. Además, permite que en caso de que fallara el procesador central, se podría controlar el sistema móvil con la estación central de forma directa. Por otro lado, también se observa la presencia de un procesador con GPU; este será el encargado del procesamiento de las imágenes para la detección de enfermedades del cacao. A continuación se detallarán los módulos y sus componentes.

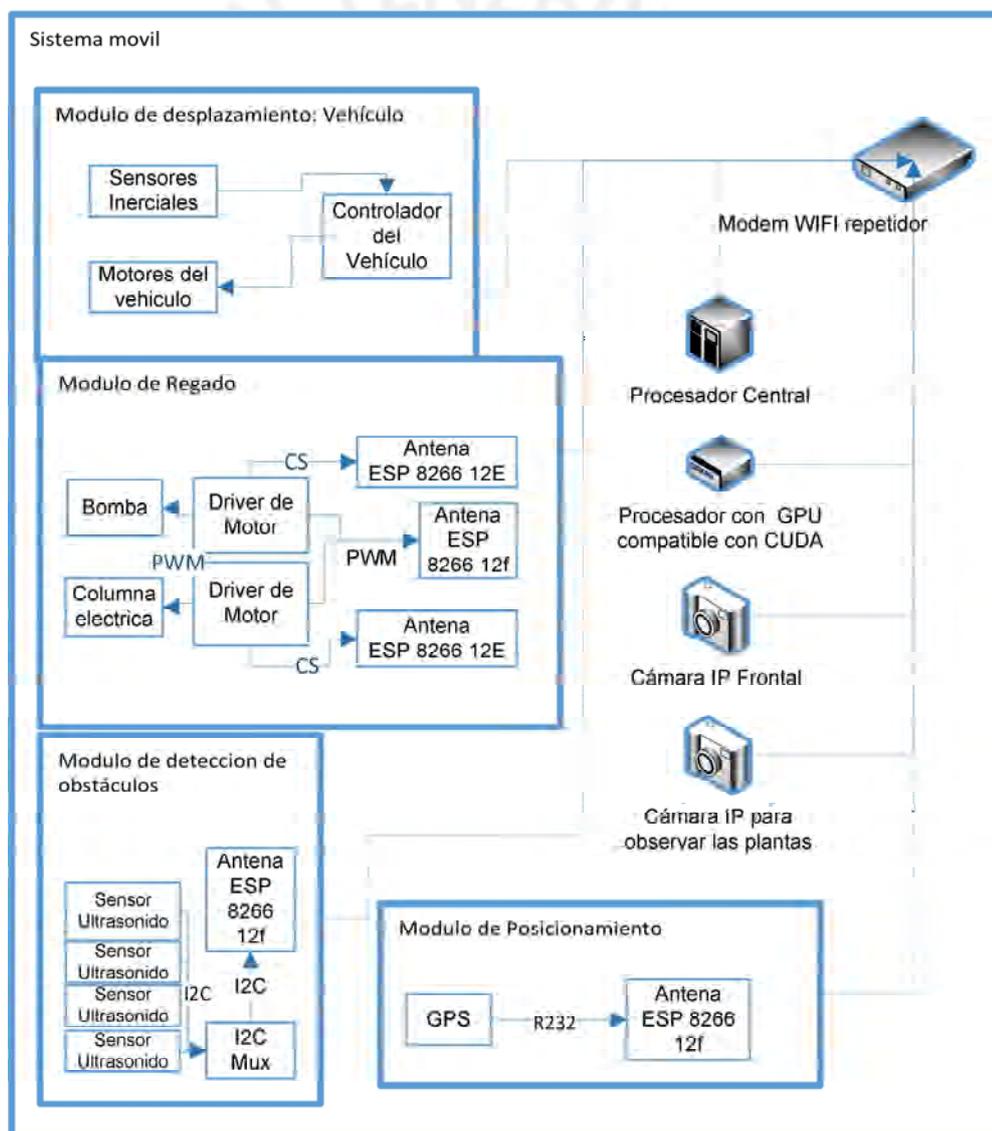


Figura 2.13: Diagrama general de conexión (Fuente: propia)

### 2.3.1 La estación de trabajo

La estación de trabajo contara con una PC o tablet con conexion WIFI habilitada. Este dispositivo se conectara a la red móvil interna del vehículo a través de un repetidor de señal de potente alcance que en campo abierto llega ha repetir señales lejanas de hasta 7 millas. En la tabla 2.1 se observan sus características

Tabla 2.1: Características de la antena de largo alcance Halo Long Range Marine & RV WiFi Extender System

Halo Long Range Marine & RV WiFi Extender System		
Compatibilidad Inalambrica	802.11bgn	
Alcance	7 millas	
Frecuencia	2.4Ghz	
Voltaje	12V DC	
Peso	1.12 lb	
Dimensiones	1x28x1 in	
Fuente	Amazon.com	

### 2.3.2 Módulo de comunicación

El vehículo tendrá un router con una antena repetidora que generara una zona con señal Wi-Fi de largo alcance también, capaz de ser captada por la antena de la estación. Se coloca el modem en el vehículo debido a que se desea que el procesador central se comunique con los sensores y actuadores . En las tablas 2.2 y 2.3 se puede observar las especificaciones de la antena y el router respectivamente. Es importante mencionar que la zona Wi-Fi solo esta activa durante la operación.

Tabla 2.2: Características de la antena de largo alcance Wavlink AC600

Wavlink AC600		
Compatibilidad Inalámbrica	802.11bgn	
Alcance	70 metros	
Frecuencia	2.4Ghz , 5Ghz	
Peso	1.1 lb	
Dimensiones	11.3 x 4.8 x 2.5 in.	
Proteccion	Protección contra el clima	
Voltaje	12V	
Fuente	Amazon.com	

Tabla 2.3: Router

Wavlink AC600		
Compatibilidad Inalámbrica	802.11bgn	
Frecuencia	2.4Ghz	
Peso	1.1 lb	
Dimensiones	174 x 120 x 28.8mm	
Consumo	1A con 12V	
Fuente	newegg.com	

### 2.3.3 Procesador Central

El procesador central es un Beaglebone Black Rev.C. Se selecciono este módulo ya que a pesar de su tamaño y pequeño consumo de energía posee un procesador potente que es el AM355x de 1 Ghz, puede usar un sistema operativo e interfaz gráfica. Se prefirió este computador en conjunto con el Jetson Tk1 de la sección 2.3.4 al uso de una *motherboard* de PC de escritorio con tarjeta de video o al uso de microcontroladores de gama baja debido a que los microcontroladores no pueden procesar imágenes a la velocidad de una tarjeta de video; por otro lado, colocar tareas adicionales a la de procesar imágenes a una *motherboard* podría ocasionar problemas (latencia por ejemplo) y necesita más área de montaje. Este computador seleccionado se encargara de la ejecución del sistema controlado; re programar el módem de ser necesario y servirá como soporte para el procesamiento de imágenes en caso el procesador con GPU falle. Cabe mencionar que se desea que el módulo Jetson Tk1 se dedique solamente al procesamiento de imágenes. En la tabla 2.4 se puede observar las especificaciones del dispositivo.

Tabla 2.4: Características del BeagleBone Black Rev.C

Beaglebone Black Rev.C		
Procesador	AM335x 1GHz ARM® Cortex-A8	
Memoria Ram	512MB DDR3 RAM	
Sistemas Operativos	Debian, Android, Ubuntu	
Conectividad	USB, Ethernet, HDMI, 2x46Cabezales	
Consumo	216-460mA con 5V DC	
Peso	39.68 g	
Tamaño	3.54 x 5.12 x 1.57 in	
Fuente	amazon.com	

### 2.3.4 Procesador compatible con CUDA

Este dispositivo sera el encargado de ejecutar solamente el algoritmo de detección de cacaos anómalos; sin embargo, de ser una emergencia (el procesador central fallara por algún motivo), podría realizar la tarea del procesador principal. Para el procesamiento de imágenes, se comunicara a través de IP con las Cámaras y procesara las imágenes rápidamente gracias a los núcleos CUDA que posee el Jetson TK1. Las especificaciones se pueden observar en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Características del NVIDIA Jetson TK1 Development Kit

NVIDIA Jetson TK1 Development Kit	
Procesador	NVIDIA 4-Plus-1 quad-core ARM Cortex-A15 CP
GPU	NVIDIA Kepler GPU with 192 CUDA cores
Memoria RAM	2 GB
Conectividad	USB, Ethernet, HDMI, 2x46Cabezales
Voltaje	12V DC
Amperaje	250-4800 mA
Peso	2 lb.
Tamaño	5 x 5 x 1 in
Fuente	amazon.com

A photograph of the NVIDIA Jetson TK1 Development Kit, a green printed circuit board (PCB) populated with various electronic components. It features a central processor, a GPU, and several ports including USB, Ethernet, and HDMI. The board is shown from a top-down perspective.

### 2.3.5 Dispositivo para la interconexión de los sensores y actuadores a la red móvil del vehículo

El dispositivo, cuyas especificaciones se pueden observar en la tabla 2.6, se comunica a través de ethernet con los procesadores y la estación de trabajo para poder controlar y obtener información de los sensores que utilizan comunicación serial (UART o I2C) y PWM respectivamente. Existen diferentes versiones pero en el vehículo se utilizaran el ESP8266 12F y el ESP8266 12E ya que el 12F posee comunicación I2C y el 12E posee un conversor Análogo-digital. Asimismo en las figuras 2.15, 2.18 y 2.20 se muestra su conexión con diferentes dispositivos.

Tabla 2.6: Características del ESP8266

ESP8266 12F	
Compatibilidad Inalámbrica	802.11 bgn
Precision ADC	10 bits
Frecuencia de comunicación Wi-Fi	2.4 GHz
Puertos disponibles	12C,PWM,GPIO,ADC (Varia con el modelo)
Voltaje	3 a 3.6 V
Amperaje	80 mA
Peso	3 g
Tamaño	2.5CM X 1.5CM X 0.5CM
Fuente	amazon.com



### 2.3.6 Módulo de desplazamiento

Este módulo esta compuesto por el vehículo de desplazamiento, cuya factibilidad para la tarea se ha calculado en la sección C.6. Este además de poseer con ruedas para propulsarse, cuenta con sensores inerciales para obtener su orientación en todo momento así como un estimado de su posición. Asimismo cuenta con una batería de larga duración que también puede energizar los componentes adicionales que se usarán en esta solución; el cálculo de factibilidad se presenta en la sección 2.3.11. Cabe mencionar que se eligió este vehículo envés de otros ya que por el tamaño de sus ruedas puede desplazarse sobre terreno forestal. En la tabla 2.7 se pueden observar las especificaciones del vehículo.

Tabla 2.7: Características del RMP 440 LE

SEGWAY RMP 440 LE	
Dimensiones	1105 x 842 x 533 mm
Peso	120 kg
Carga máxima	180 kg
Soporte de comunicacion	Ethernet, CAN, USB
Bateria y Capacidad	LIFEPO4 5x380Wh
Máxima velocidad	8 m/s
Maxima duracion de bateria	24 h
Máxima pendiente	30 °
Proteccion	IP66
Fuente	stanleyinnovation.com



### 2.3.7 Módulo de detección de obstáculos

Este módulo utiliza en 4 sensores basados en ultrasonido mostrado en la tabla 2.8) para medir el espacio libre delante del vehículo. Estos se conectan, usando el protocolo I2C a través de un multiplexor I2C mostrado en la tabla 2.9, con la antena ESP8266. El uso del protocolo I2C se debe a que permite la conexión de varios dispositivos a un solo puerto y el uso del multiplexor I2C se debe a que algunos de los sensores comparten la misma dirección I2C. En la figura 2.15 se muestra como se conectaría este módulo. Asimismo en la figura 2.14 se puede observar el lugar donde se montarían los sensores de ultrasonido.

Tabla 2.8: Características del I2CXL-MaxSonar MB7247

I2CXL-MaxSonar MB7247		
Comunicación	I2C	
Voltaje de operación	3.3V a 5V	
Frecuencia máxima de comunicación	40 HZ	
Maximo alcance	7.5 metros	
Fuente	maxbotix.com	

Tabla 2.9: Características del multiplexor I2C de 4 canales

Multiplexor I2C de 4 canales		
Comunicación	I2C	
Voltaje de operación	1.8V, 2.5V, 3.3V, 5V	
Fuente	dsscircuits.com/	

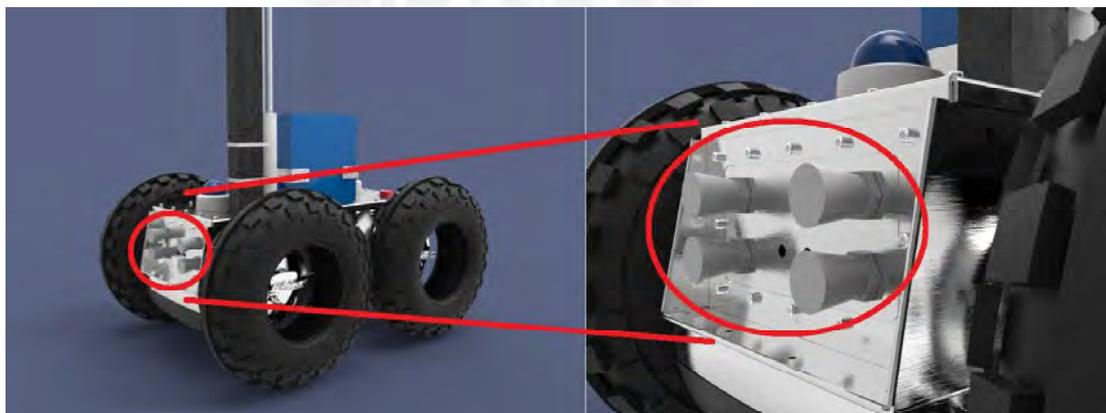


Figura 2.14: Ubicación de los sensores de ultrasonido(Fuente: propia)

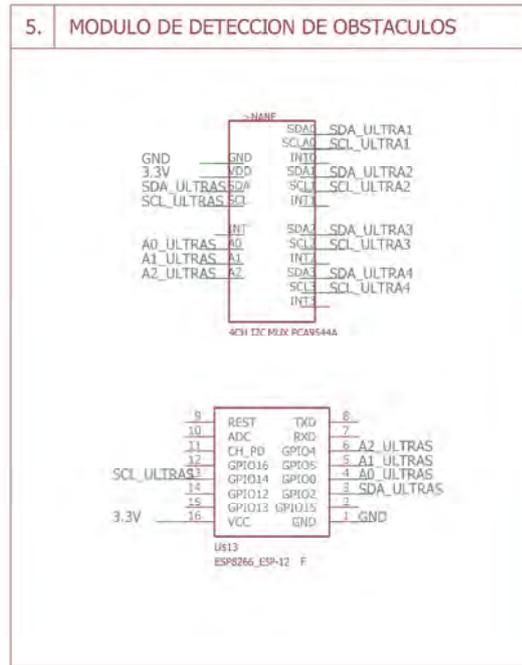


Figura 2.15: Esquema de conexión del módulo de detección de obstáculos(Fuente: propia)

Asimismo, es importante mostrar el rango que abarca los sensores de ultrasonido, de una manera gráfica. Para esto, del el manual del sensor de ultrasonido [39], se puede obtener los rangos en que funciona el sensor. De este modo en la figura 2.16 se puede observar el rango de detección frente a objetos de diferente diámetro. Luego se puede presentar el rango para uno de los casos como un volumen de captura para poder mostrar su rango en comparación con el vehículo y los árboles como se muestra en la figura 2.17.

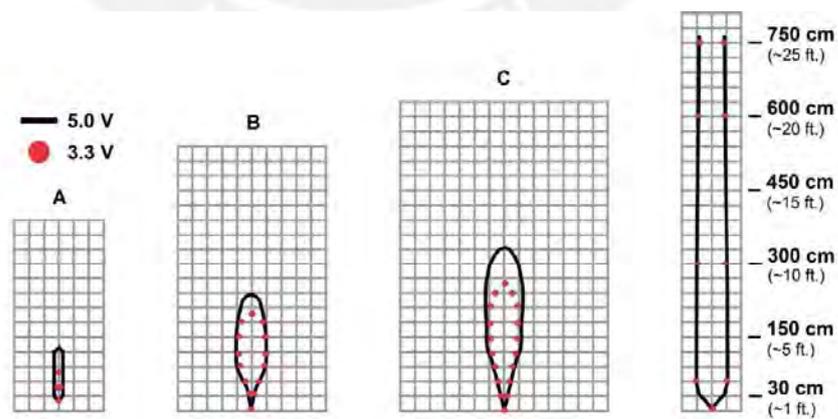


Figura 2.16: Alcance frente a objetos de 6mm(A), 2.54cm(B), 8.89cm(C) y 27.94cm(D) de diámetro (Fuente: Maxbotix.com)

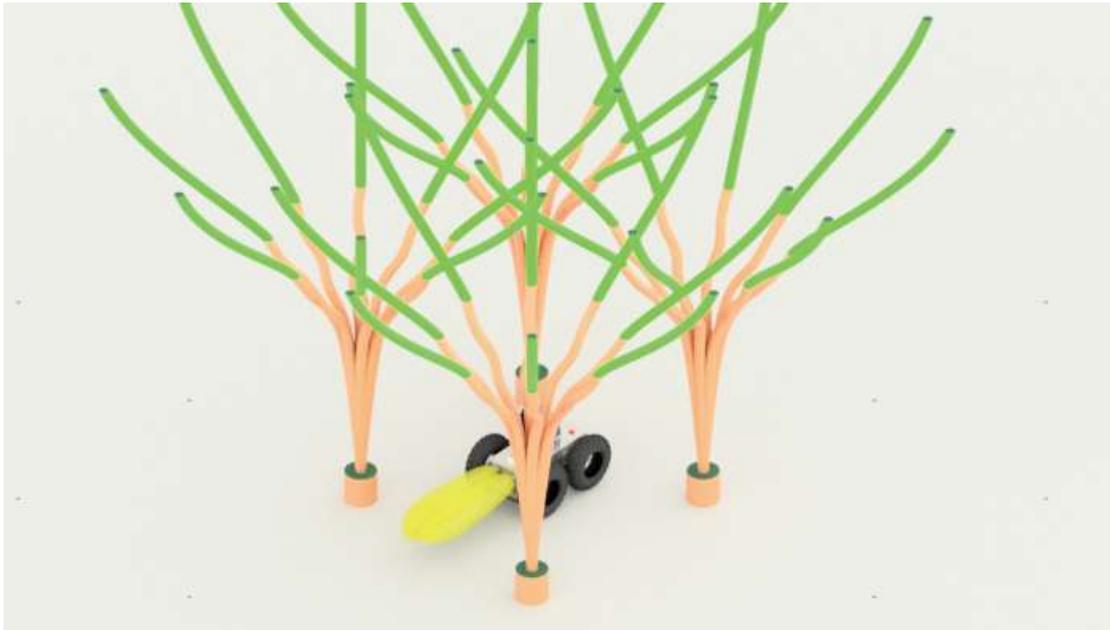


Figura 2.17: Volumen de captura de color amarillo del sonar para el caso C(Fuente: propia)

### 2.3.8 Módulo de posicionamiento

Este módulo está compuesto por un GPS (ver especificaciones en la tabla 2.10). Este dispositivo se comunicaría con el procesador a través del uso de una antena ESP8266 con el fin de ofrecer . De esta manera, aparte de poder observar lo que se encuentra alrededor del vehículo con las cámaras, podrá obtener una posición aproximada al operador del vehículo a pesar del error del GPS. En la figura 2.18 se puede ver como se conectaría el sistema.

Tabla 2.10: Características del GPS

Adafruit Ultimate GPS Breakout		
Voltaje	3.3V a 5V	
Amperaje	20 mA	
Sensibilidad	165 dbm	
Frecuencia de actualización	10 Hz	
Canales	66	
Error posible	3 metros	
Fuente	adafruit.com	

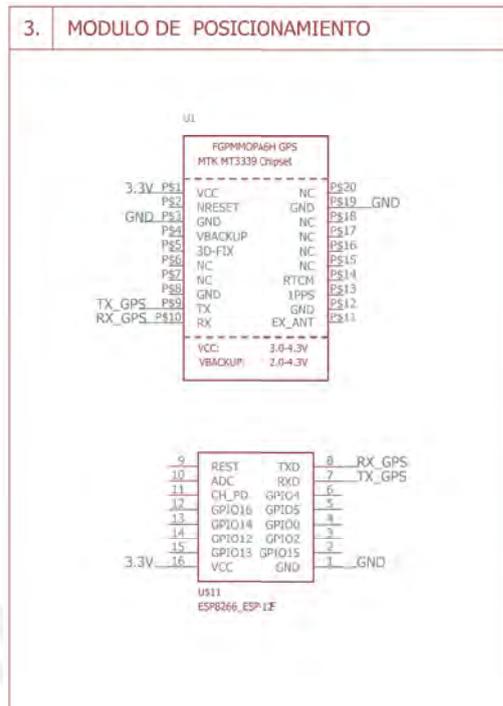


Figura 2.18: Esquema de conexión del módulo de posicionamiento(Fuente: propia)

### 2.3.9 Módulo de regado

El diagrama del sistema electrónico de este módulo se puede observar en la figura 2.19. Este utiliza dos controladores de motor POLOLU G224V1 ( ver especificaciones en 2.11) para la bomba y la columna eléctrica ya que su rango de operación es compatible y poseen un sensor de corriente integrado. Estos controladores reciben la señal PWM del módulo ESP826612F y envía la información de la corriente que utilizan a través de los módulos ESP826612E. La información de la corriente sirve para detectar una sobrecarga en la bomba y/o en la columna (que puede ser un atascamiento por ejemplo). En la figura 2.20 se puede observar la conexión de elementos. Por último las especificaciones de la columna y la bomba se observan en las tablas 2.12 y 2.13; asimismo el cálculo para justificar el uso de estos esta en la sección 2.4.

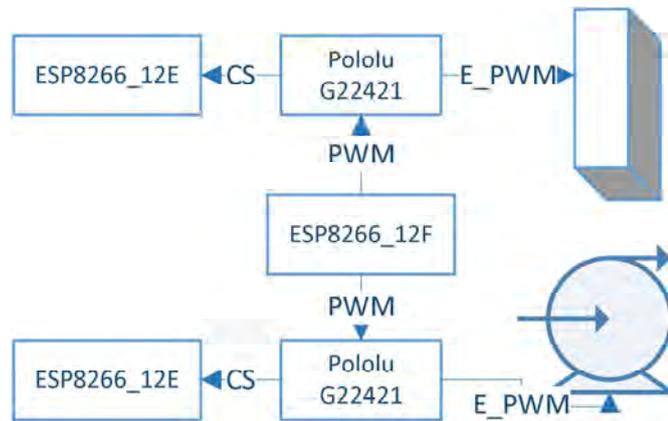


Figura 2.19: Esquema del módulo de riego(Fuente: propia)

Tabla 2.11: Características del controlador de motor POLOLU G2 2421

POLOLU G2 2421	
Canales de motor	1
Voltaje de operacion	6.5 a 40V
Corriente admitida	hasta 21A
Maxima Frecuencia PWM	100 Khz
Proteccion contra voljae opuesto	si
Dimensiones	1.3" x 0.8"
Peso	5g
Fuente	pololu.com



Tabla 2.12: Características de la SCL Series - Column Lift

SCL Series - Column Lift	
Voltaje	24V
Amperaje	2A
Potencia	48W
Proteccion	IP56
Carga Maxima	800N
Velocidad	31 mm/s
Altura maxima	1812 mm
Material	Aluminio
Fuente	firgelliauto.com



Tabla 2.13: Características de la bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V

Bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V		
Voltaje	24V	
Potencia máxima	312W	
Presion	60 bar (Max 70 bar)	
Flujo Ajustable	0.4 a 1Lmin	
Amperaje	13 A	
Medidas	233x132x80 mm	
Fuente	alibaba.com	

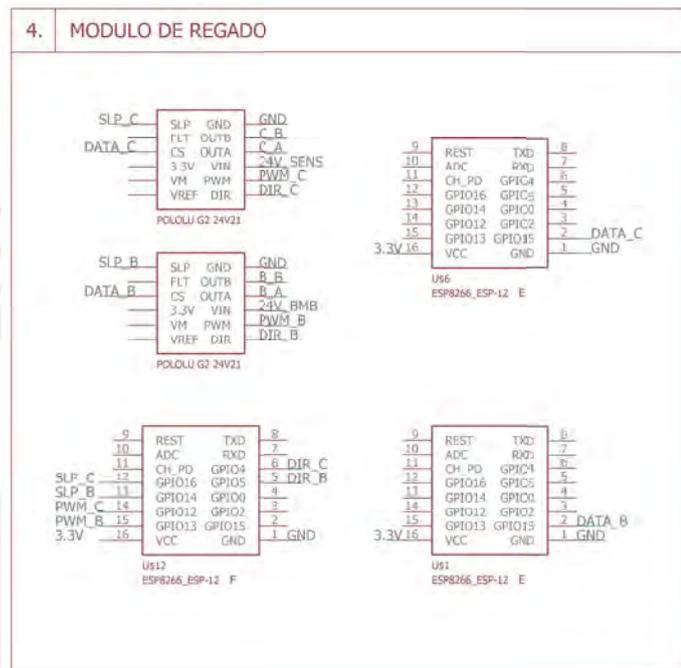
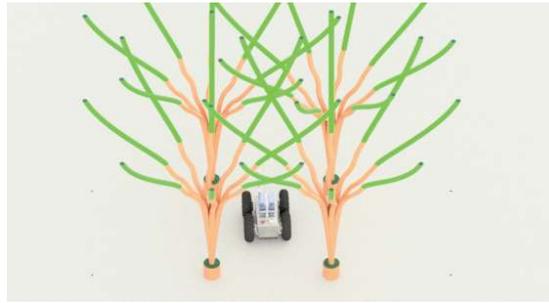


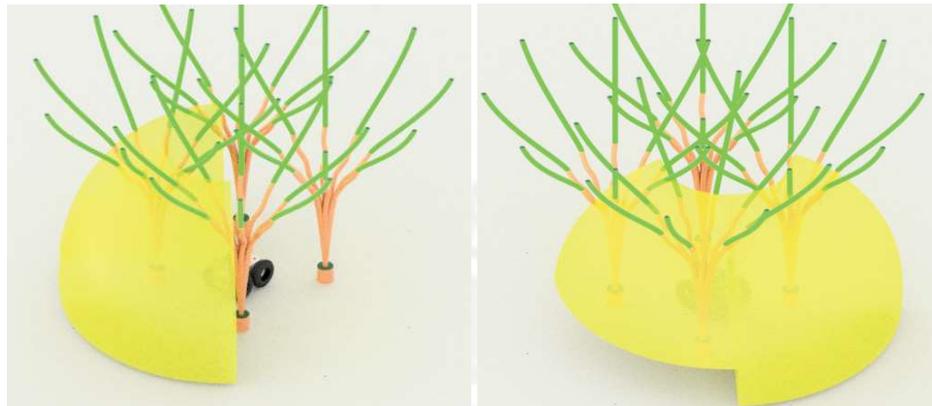
Figura 2.20: Diagrama de conexion de el módulo de regado(Fuente: propia)

### 2.3.10 Cámaras IP

Las cámaras IP que se usarán, se conectarán al módem por señal WIFI. Se usarán dos, una para observar lo que está al frente del vehículo y otra atrás; estas se montarán como se muestra en la figura 2.22. Cabe mencionar que debido a sus 4MP de resolución y a su lente de  $2.8mm$  se puede obtener definición desde distancias mayores a 3 metros con buena definición como se muestra en videos de prueba [40] donde a pesar de estar en un segundo piso, se logra captar las letras del vehículo que se estaciona frente a él. Adicionalmente, se muestra en la figura 2.21, un ejemplo del volumen que se abarcaría con las cámaras por lo menos. Otras especificaciones adicionales se pueden observar en la tabla 2.14.

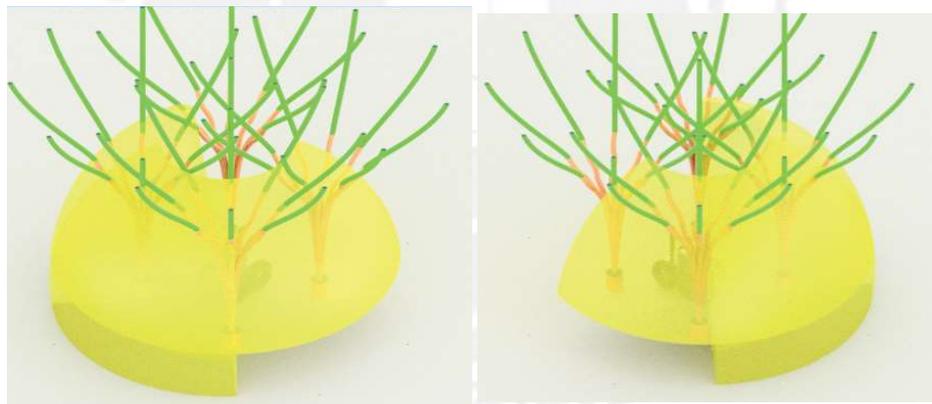


(a) Posición del móvil sin volumen de cámaras



(b) Cámara frontal

(c) Cámara frontal (otra vista)



(d) Cámara trasera

(e) Cámara trasera (otra vista)

Figura 2.21: Volumen de captura de las cámaras

Tabla 2.14: Características de las cámaras Hikvision DS-2CD2142FWD-IWS

cámaras Hikvision DS-2CD2142FWD-IWS		
Voltaje	12V	
Potencia maxima	5W	
Proteccion	IP66	
Resolucion maxima	4MP 2688 x 1520	
Rango de Pan y Tilt	0 a 355 °	
Fuente	hikvision.com	

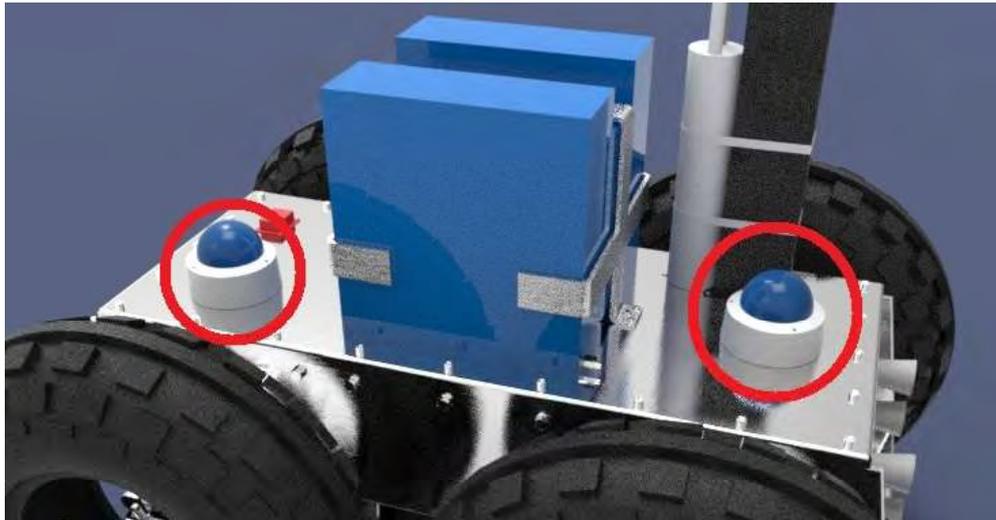


Figura 2.22: Montaje de las cámaras(Fuente: propia)

### 2.3.11 Módulo de energía y su distribución

El sistema de distribución de energía cuenta con los elementos que se muestran en la figura 2.23 y se conectan como se muestra en la figura 2.24. Estos elementos se irán mostrando a continuación.

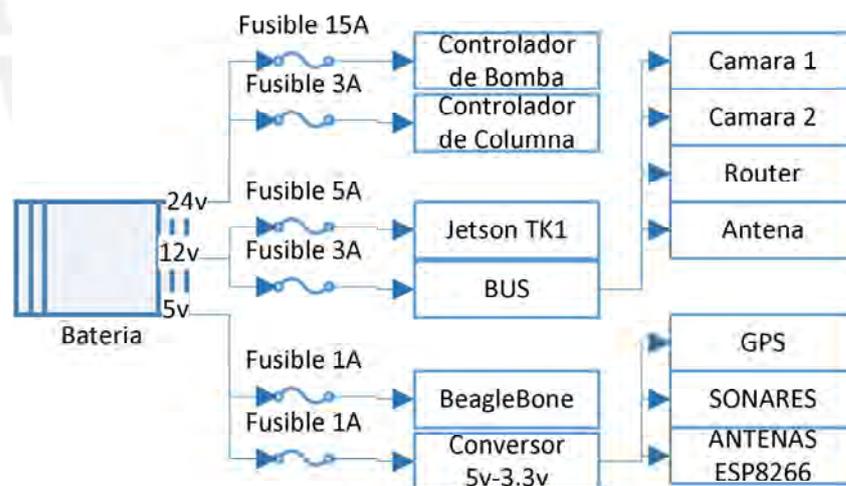


Figura 2.23: Diagrama de conexión del sistema de distribución de energía.(Fuente propia)

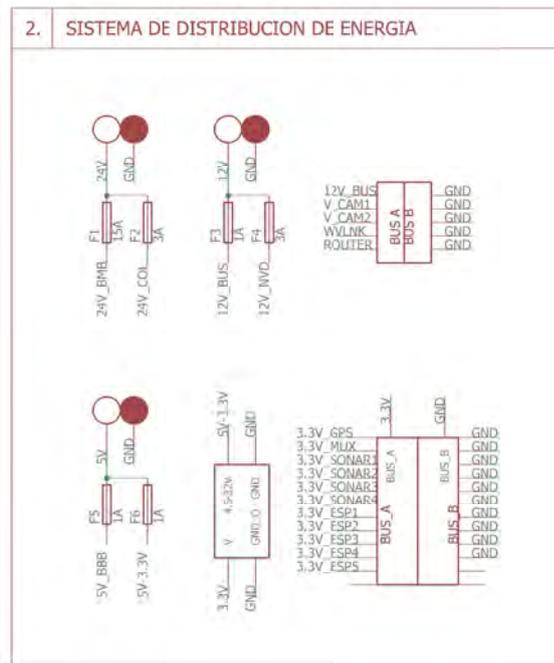


Figura 2.24: Esquema del sistema de distribución de energía.(Fuente propia)

Para empezar, lo compone la batería del vehículo RMP440LE, esta se eligió debido a que su capacidad es mucho mayor al consumo necesario por la operación total como se muestra en el anexo B.1 y agregar una batería independiente sería innecesario. Además el vehículo cuenta con convertor DCDC propios a 5V, 12V y 24V. En la tabla 2.15 se pueden las características de las baterías.

Tabla 2.15: Características de las baterías del vehículo RMP

Batería	
Voltaje	73.6
Capacidad	5.2Ah (380 Wh)
Peso	5.1 Kg
Dimensiones	35.7 cm x 19 cm x 8.2 cm
Cantidad máxima en el vehículo	5
Fuente	segway.com

Luego para proteger los componentes electrónicos de corriente eléctrica excesiva, se decidió usar fusibles de cuchilla debido a su tamaño envés de fusibles para montar en riel DIN. Estarán conectados como se mostró en la figura 2.23 donde esos valores límites se seleccionaron de la corriente máxima de los elementos electrónicos que protegen como se ve en los cálculos en el anexo B.2. Estos se montarán en el terminal de fusibles que se muestra en la tabla 2.16.

Tabla 2.16: Características del terminal de fusibles LFB08

Terminal de fusibles LFB08		
Fusibles	Blade Fuses	
Dimensiones	155x53x42 mm	
Peso	0.01 Kg	
Fuente	polevolt.co.uk	

Por otro lado, como se mostró en la figura 2.23 se necesita solo un convertor DCDC adicional que se muestra en la tabla 2.17 para alimentar componentes que utilizan 3.3V.

Tabla 2.17: Características del terminal del convertor DC DC

Step-down Converter		
Voltaje de entrada	4.5 32VDC	
Voltaje de salida	1.0 30VDC	
Dimensiones	6 * 5.8 * 2.2cm	
Peso	20g	
Fuente	current-logic.com	

Por último, se usan regletas de borneras para la distribución a los diferentes elementos. Cabe mencionar, que se prefirió esto a una riel DIN debido a su tamaño. En las figuras 2.25a- 2.25c se pueden apreciar estas.



(a) 100A BusBar (fuente: bluesea.com)



(b) 100A BusBar Cover



(c) Plataforma de distribución de energía(Fuente: Amazon.com)

Figura 2.25: Elementos adicionales para la transmisión de energía

## 2.4 Diseño del sistema Mecánico

El sistema mecánico esta compuesto por el sistema de irrigación, el de desplazamiento y los elementos adicionales de soporte que se muestra en la figura 2.26. A continuación, se presentará con más detalle estos componentes.

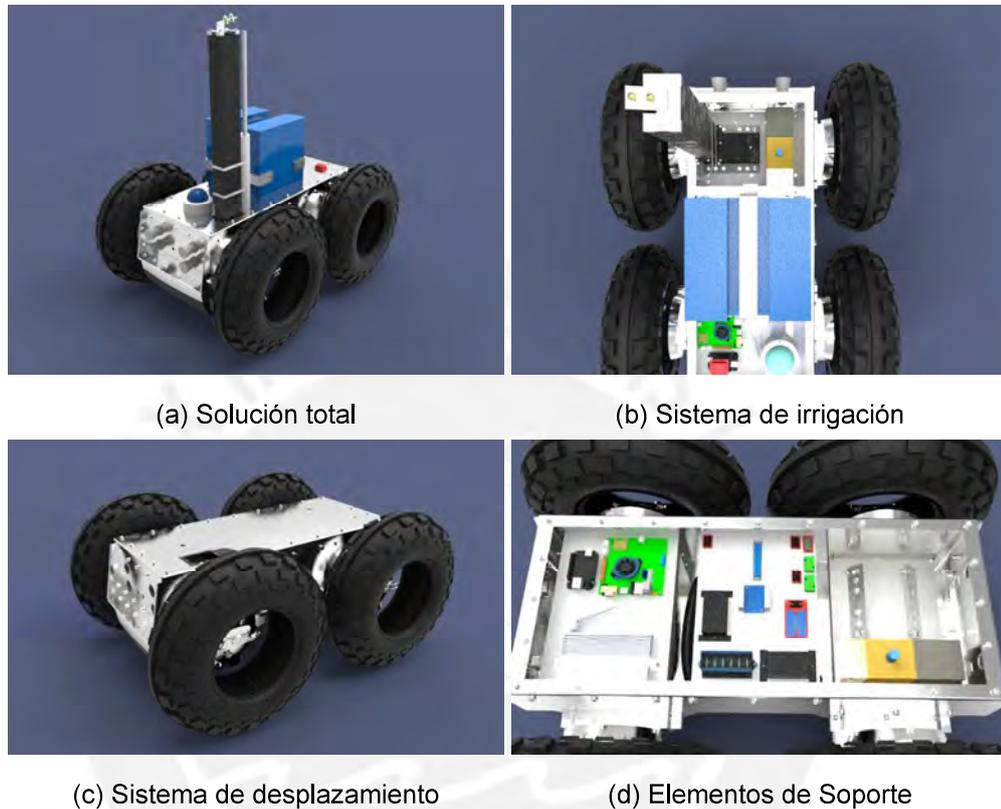


Figura 2.26: Diseño del sistema mecánico (Fuente: Propia)

### 2.4.1 Sistema de irrigación

El sistema de irrigación se obtuvo del concepto conseguido en el anexo A. Este está compuesto por la columna eléctrica, la bomba y elementos adicionales.

#### La columna eléctrica

Con el objetivo de elevar el montaje de las boquillas lo más alto posible, ya que la resistencia del aire sobre el chorro es mucho más difícil de contrarrestar que la pérdida de presión por gravedad, se decidió usar una columna en vez de un brazo robótico por ser más accesible. Entonces se eligió la columna mostrada en la sección 2.3.9 debido al alcance que se ve en la figura 2.27 y a la fuerza más que suficiente para la tarea, como se detalla en el anexo C.3.

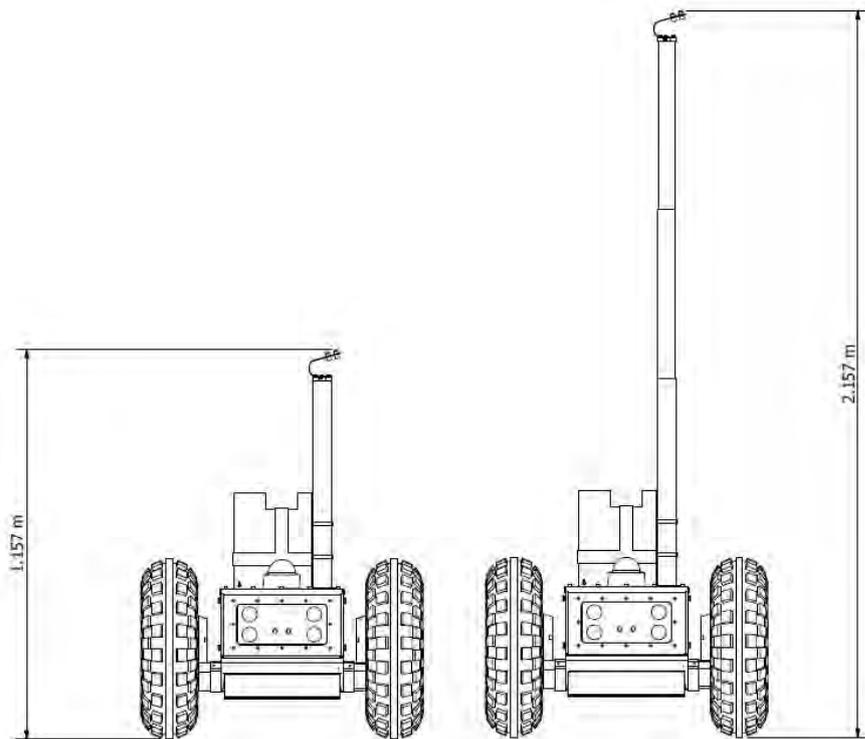


Figura 2.27: Alcance de la columna eléctrica(Fuente propia)

### Bomba eléctrica

Para mover el líquido a irrigar hasta los frutos es necesario una bomba capaz de ejercer la presión y caudal necesario. Entonces, se comenzó con el diagrama mostrado en la figura 2.28 donde se puede ver todos los orígenes de pérdidas.

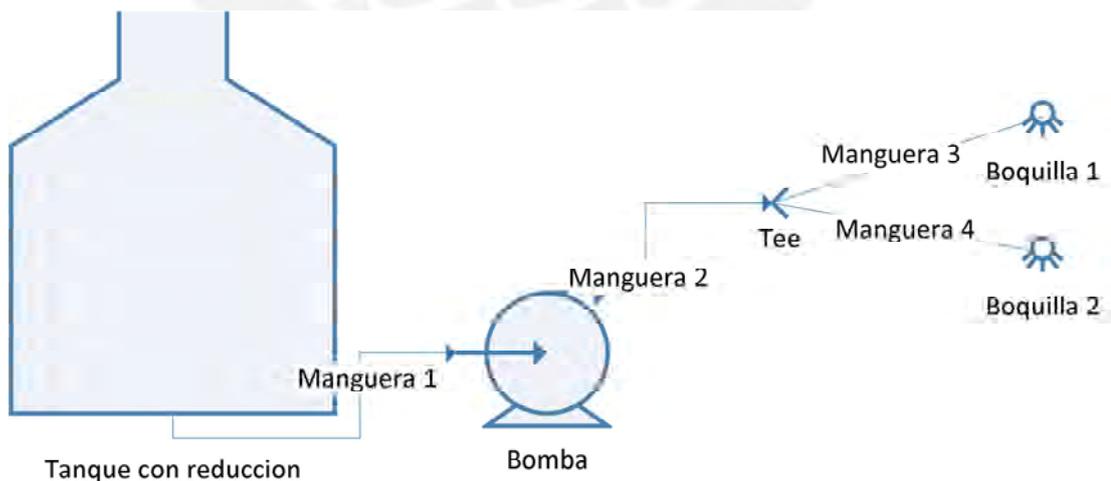


Figura 2.28: ( Diagrama de conexión del sistema de regado.(Fuente propia)

Luego, se uso la ecuación de Bernoulli con perdidas en accesorios que se muestra en la ecuación 2.1 para poder obtener la presión necesaria de la bomba en función de las perdidas.

$$P1 + \frac{\rho V1^2}{2} + \rho g z_1 + P_b = P2 + \frac{\rho V2^2}{2} + \rho g z_2 + P_p \quad (2.1)$$

$$P_b = P2 - P1 + \rho \frac{V1^2 - V2^2}{2} + \rho g(z_1 - z_2) + P_p$$

$P1$  = Presión del inicio del sistema(en  $Pa$ )

$V1$  = Velocidad inicial del fluido( $0m/s$ )

$\rho$  = densidad del agua( $1000kg/m^3$ )

$g$  = aceleración de la gravedad( $9.81m/s^2$ )

$z_1$  = altura inicial del sistema(en  $m$ )

$P_b$  = Presión dada por la bomba(en  $Pa$ )

$P2$  = Presión del fin del sistema(en  $Pa$ )

$V2$  = Velocidad al final del fluido(en  $m/s$ )

$z_2$  = altura del fin del sistema(en  $m$ )

$P_p$  = Presión perdida en los accesorios(en  $Pa$ )

Sin embargo no todas las perdidas son resolubles de forma analítica como es la perdida en tuberías y el cálculo del alcance del rociador. Para solucionar esto se obtuvo un modelo matemático en función del caudal y se evaluó si el punto de operación era posible para varias bombas y si alcanzaba el chorro necesario. De este modo, se pudo obtener un alcance de chorro satisfactorio de más de  $3m$  de alto y más de  $1.5m$  como se muestra en la figura 2.29. Todos los cálculos están en el anexo C.1.

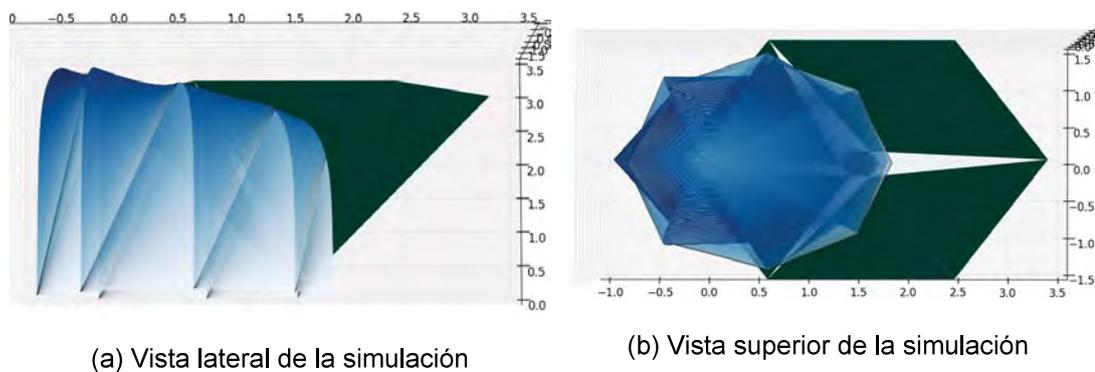


Figura 2.29: Resultados de la simulación(Fuente: Propia)

De este modo, se halló un punto de operación y una bomba que cumple con este que se muestra a continuación. Además la bomba escogida tiene la característica especial de que se usa para sistemas de aspersión. Las características de bomba se vuelven a mostrar en la tabla 2.18.

Presión de operación = 60bar

Caudal de operación = 0.983lpm

Tabla 2.18: Características de la bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V

Bomba SEMIFOG CPXB010L/DC024V		
Voltaje	24V	
Potencia maxima	250W	
Presion	60 bar (Max 70 bar)	
Flujo Ajustable	0.4 a 1Lmin	
Amperaje	13 A	
Medidas	233x132x80 mm	
Enlace	Alibaba.com	

### Contenedor

Aparte de esto también se realizó el cálculo del contenedor que se puede observar en el anexo C.4y se obtuvo que era necesario un tanque de 12.6l. Por eso, se seleccionó el contenedor mostrado en la tabla 2.19.

Tabla 2.19: Características del tanque

Reliance Products Aqua-Tainer		
Capacidad	4 gal.	
Color	Azul	
Dimensiones	11.3x11x10.8 in	
Fuente	amazon.com	

## Elementos adicionales

Para terminar con esta sección es necesario mostrar las características de los elementos adicionales a usar. Para empezar se usa una boquilla regulable, cuyas características se observan en la tabla 2.20, ya que es de uso común en sistemas de aspersión y ofrece un alcance hasta de *4 metros*. Asimismo se usa la manguera mostrada en la tabla 2.21, ya que soporta la presión necesaria para la irrigación. Por último, se usa el tee mostrado en la tabla 2.22 ya que su diametro es compatible con los demas elementos.

Tabla 2.20: Características de la boquilla

WANGSCANIS 1/2 Inch Garden Misting Nozzle		
Material	Latón	
Presion de agua	0.75 a 2.5 MPa	
Flujo	30 a 215 LPH	
Diametro de Coneccion	1/2 in	
Alcance radial	hasta 2m	
Alcance altitudinal	hasta 4m	
Enlace	Enlace Web	

Tabla 2.21: Características de la manguera

1/4" SAE 100R17 Hydraulic Hose Assembly		
Presion Maxima	3000 psi	
Diametro interno	1/4 in	
Diametro externo	0.5 in	
Temperatura de trabajo	-40 a 212 °F	
Fuente	discounthydraulicchase.com	

Tabla 2.22: Características del Tee

Tee		
Entradas	2	
Material	Bronce	
Entradas y Salidas	1/4 NPT	
Fuente	amazon.com	

## 2.4.2 Sistema de desplazamiento

El vehículo escogido para esta operación fue el RMP 440 LE por sus capacidades de desplazamiento, el tamaño de sus ruedas y porque posee un espacio interno para poder colocar elementos adicionales. Se decidió evitar el uso de UAV's debido a que por el peso del tanque y los sensores, el tamaño sería demasiado para volar entre árboles; asimismo no se decidió usar un vehículo a patas debido a que podría elevar demasiado el costo. Se muestra de nuevo la tabla 2.23 donde se puede observar las características del vehículo

Tabla 2.23: Características del RMP 440 LE

SEGWAY RMP 440 LE	
Dimensiones	1105 x 842 x 533 mm
Peso	120 kg
Carga máxima	180 kg
Soporte de comunicacion	Ethernet, CAN, USB
Bateria y Capacidad	LIFEPO4 5x380Wh
Máxima velocidad	8 m/s
Maxima duracion de bateria	24 h
Máxima pendiente	30 °
Proteccion	IP66
Fuente	stanleyinnovation.com



El vehículo, según sus especificaciones [41], tiene la capacidad de ir hasta 8ms y subir una pendiente de 30 ° en un terreno de concreto sin carga. Sin embargo, ya que el vehículo va a desplazarse con una carga de 60Kg en diferentes condiciones de terreno, fue necesaria una evaluación del desplazamiento del vehículo que se puede observar en el anexo C.6 para ver en qué pendientes no resbalaría. De esta evaluación, se obtuvo que las pendientes seguras serían las mostradas en la figura 2.30. De este modo, la zona segura sería la encerrada en la elipse azul que iría de -15° a 15° de ángulo lateral ( $\alpha$ ) y de -15° a 20° de ángulo frontal ( $\theta$ ). Cabe mencionar que de esta manera también se comprueba también que el vehículo puede sobrepasar obstáculos de 10cm como se observa en el anexo C.7.

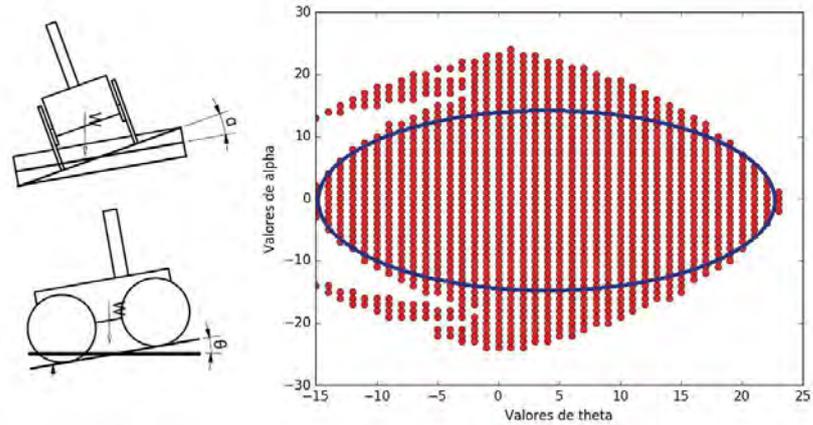


Figura 2.30: Pendientes posibles para el vehículo (Fuente propia)

### 2.4.3 Elementos de Soporte y Protección

Por otro lado, para poder ensamblar estos elementos fue necesario el diseño de diferentes piezas adicionales. A continuación, se presentará las piezas adicionales en cada subensamble. En la figura 2.31, se puede observar los subensambles que componen el sistema. Cabe mencionar que las medidas, materiales y detalles de las piezas diseñadas se encuentran en los planos.

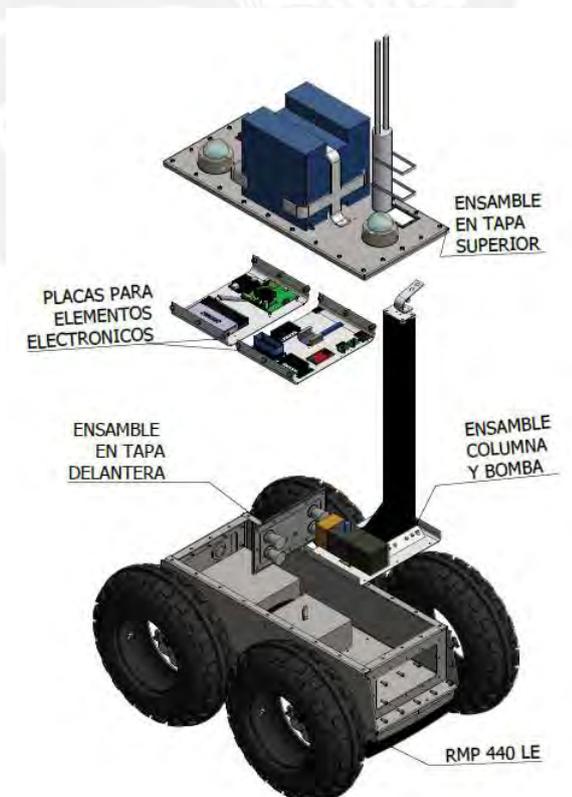


Figura 2.31: Ensamble general(Fuente propia)

## Ensamble columna y bomba

En la figura 2.32 se muestra el ensamble donde se monta la columna eléctrica, la bomba y las boquillas. Para empezar fue necesario el diseño de la bandeja base columna bomba que se une con el vehículo con el uso de las piezas base columna PT1 y PT2. Estos soportes dan espacio necesario para poder atornillar la bomba y la columna a la bandeja. Asimismo para dar más estabilidad, fue necesario el diseño de los soportes laterales. Por otro lado, para montar la boquilla sobre la columna se diseñó la base sobre columna que usa unos tarugos cuadrados para dar espacio necesario para el soporte de las boquillas.

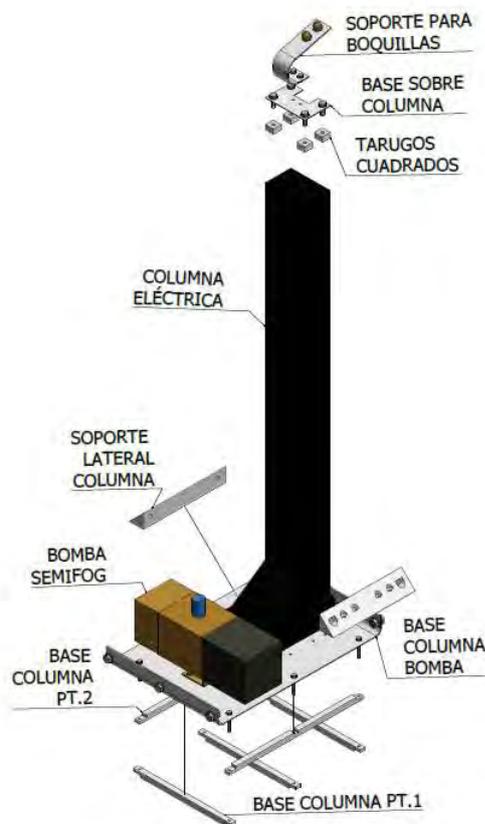


Figura 2.32: Bandejas para elementos electrónicos (Fuente propia)

## Ensamble en la tapa delantera

En la figura 2.33 se muestra el ensamble donde se montan los sensores de ultrasonido. Se puede observar el uso de unos sellos, los cuales están hechos de empaquetadura, para proteger la zona de unión de los sonares con la tapa delantera de filtraciones ocasionadas por la irrigación. además, cabe mencionar que los sonares elegidos pueden funcionar en ambientes no protegidos como se muestra en su manual [39].

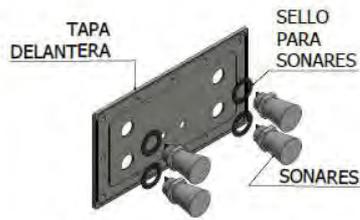


Figura 2.33: Ensamble en la tapa delantera (Fuente propia)

### Ensamble en la tapa superior

En la figura 2.34 se muestra como se monta el contenedor, las cámaras y el GPS en la tapa superior del RMP 440LE. Para esto también se diseñó sellos de empaquetadura para proteger de filtraciones en la zona de montaje de las cámaras, el GPS, la columna eléctrica y la antena. Además se diseñó una cobertura para el GPS el cual no interrumpe su señal. Por otro lado, también se diseñó un soporte para asegurar el contenedor a la tapa superior como se muestra en el anexo C.5.

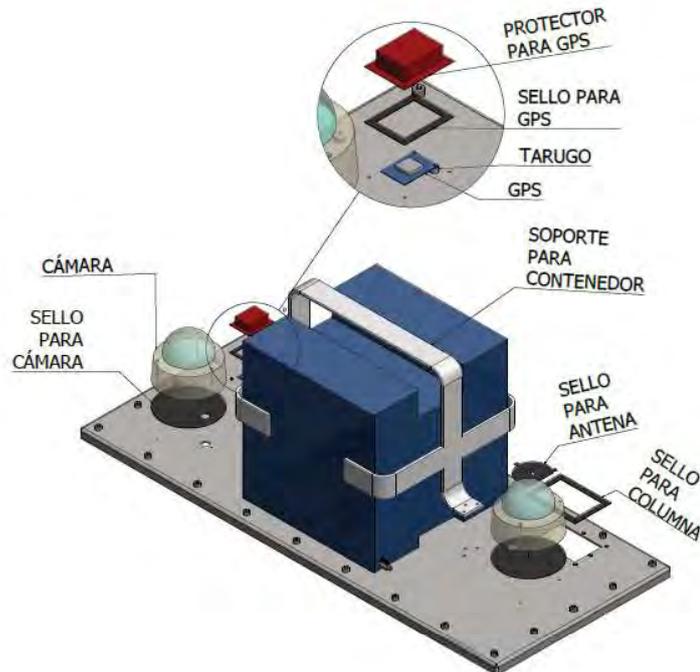


Figura 2.34: Ensamble en la tapa superior (Fuente propia)

## Bandejas para montaje de elementos electrónicos

Para el montaje de los elementos electrónicos fue necesario el diseño de las bandejas que se muestran en la figura 2.35. Estas irán montadas dentro del vehículo.

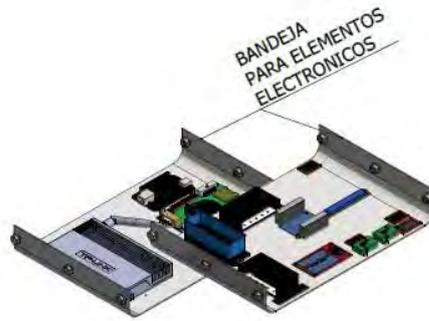
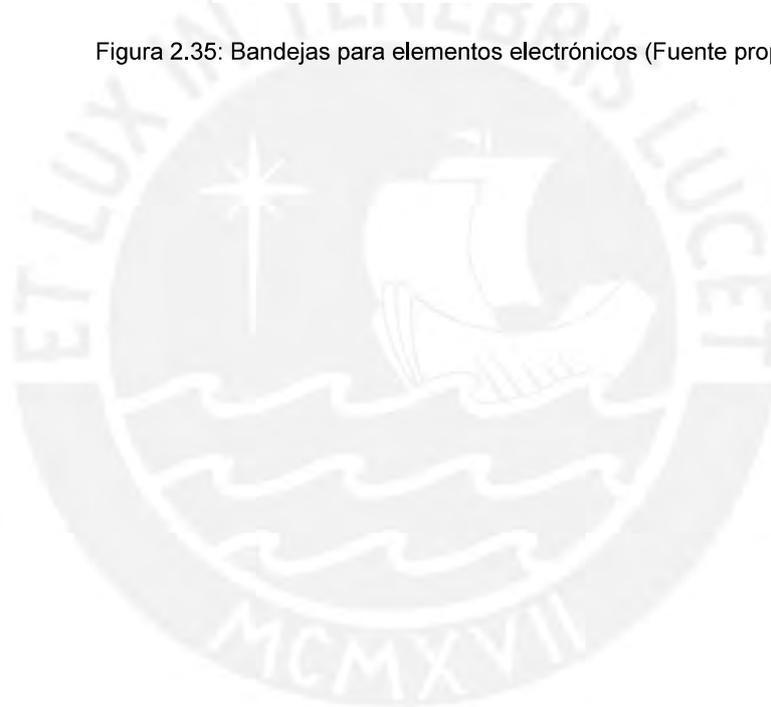


Figura 2.35: Bandejas para elementos electrónicos (Fuente propia)



## Capítulo 3

### Pruebas realizadas

#### 3.1 Prueba del sistema de detección de enfermedades del cacao

Aparte de la evaluación del sistema que se realiza en el entrenamiento para obtener la precisión estimada, es recomendable obtener una prueba manual del sistema. Para esto se evaluará los mejores modelos obtenidos para clasificar si una imagen es cacao o no; para clasificar si una imagen de cacao es de uno anómalo o no y el sistema en conjunto con el uso de sliding window usando las medidas de evaluación de rendimiento mostradas en la sección 1.2.2

##### 3.1.1 Prueba del modelo de detección de cacao

Para esta prueba se uso cierta cantidad de imágenes, en este caso 100, 50 imágenes de cacao, que se muestran en la figura 3.1, y 50 imágenes que no son cacao, que se muestran en la figura 3.2, que no han sido usados en la fase de entrenamiento de los modelos de CNN



Figura 3.1: Imágenes de cacao(Fuente:Google)

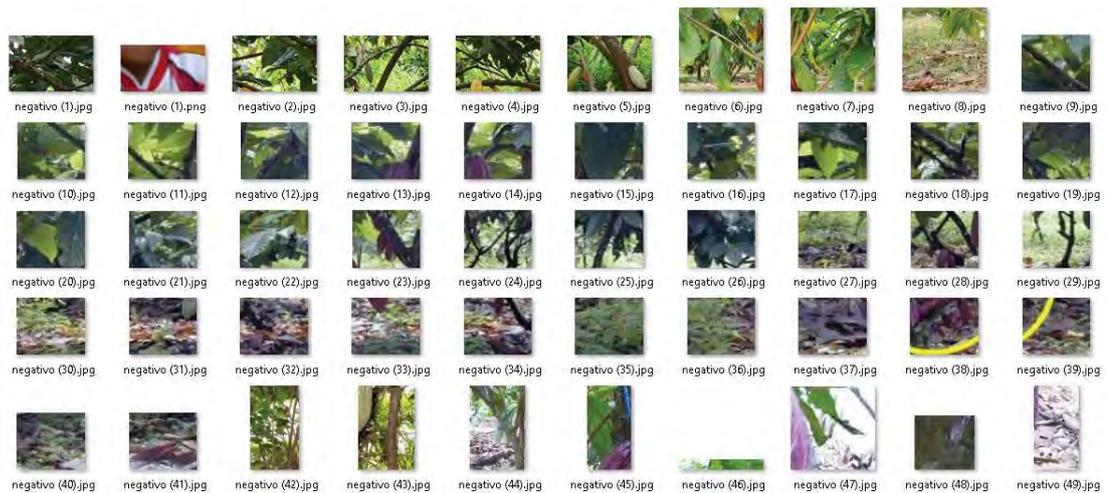


Figura 3.2: Imágenes que no son cacao(Fuente:Google)

Para la prueba, se uso el modelo de CNN basado en la arquitectura del módulo Inception en conjunto con el bloque Resnet que se mostró en la sección 2.2.1 que usa el sistema de detección de cacaos anómalos. Esta clasificó las imágenes usando como margen el valor de 0.9 (osea si la predicción es mayor a 0.9, es cacao). De este modo se obtuvo que las imágenes mostradas en la figura 3.3 y 3.4 han sido clasificadas como cacao y no cacao respectivamente.



Figura 3.3: Imágenes clasificadas como cacao (Fuente propia)

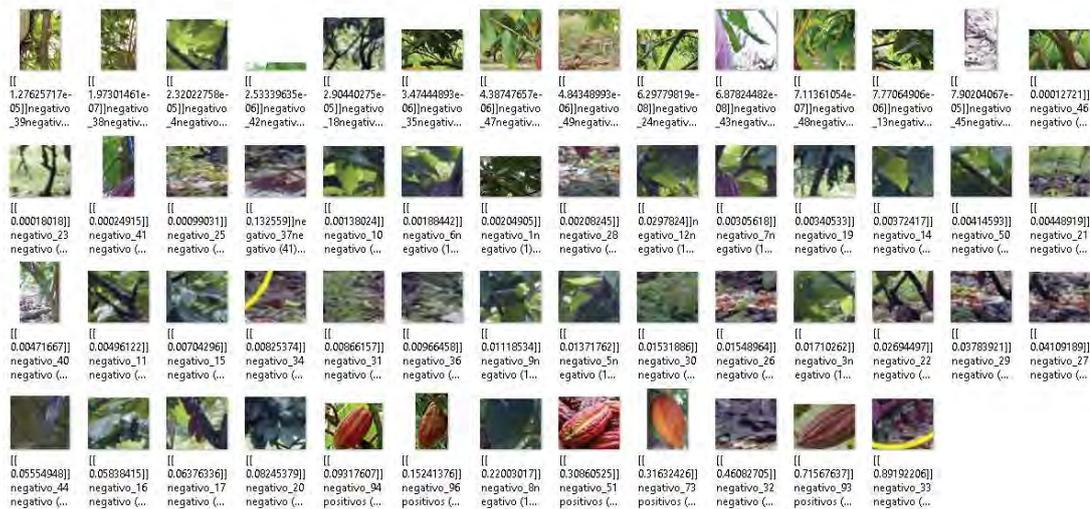


Figura 3.4: Imágenes clasificadas como no cacao (Fuente propia)

Entonces se anotó estos resultados en la matriz de confusión de la tabla 3.1 y se obtiene las medidas básicas de rendimiento mostradas en la tabla 3.2. De donde se comprobó la exactitud hallada al final del entrenamiento en el anexo D.1 que fue de 94.4% ya que es parecida a la hallada manualmente de 94%.

Tabla 3.1: Prueba del modelo de detección de cacao

		Resultado de la Clasificación	
		Cacao	No cacao
Clasificación Real	Cacao	VP	FN
		45	5
	No cacao	FP	VN
		1	49

Tabla 3.2: Rendimiento del modelo de clasificación de imágenes

Medida	Valor
Exactitud	94%
Ratio de error	6%
Sensitividad	90%
Especificidad	98%
Precisión	98%
Ratio de falsos positivos	2%

### 3.1.2 Prueba del modelo de detección de anomalías en el cacao

Para esta prueba, solo se usaron 25 imágenes de cacao anómalo y no anómalo que se puede ver en las figura 3.5 y 3.6 que no han sido usado en el entrenamiento del modelo.

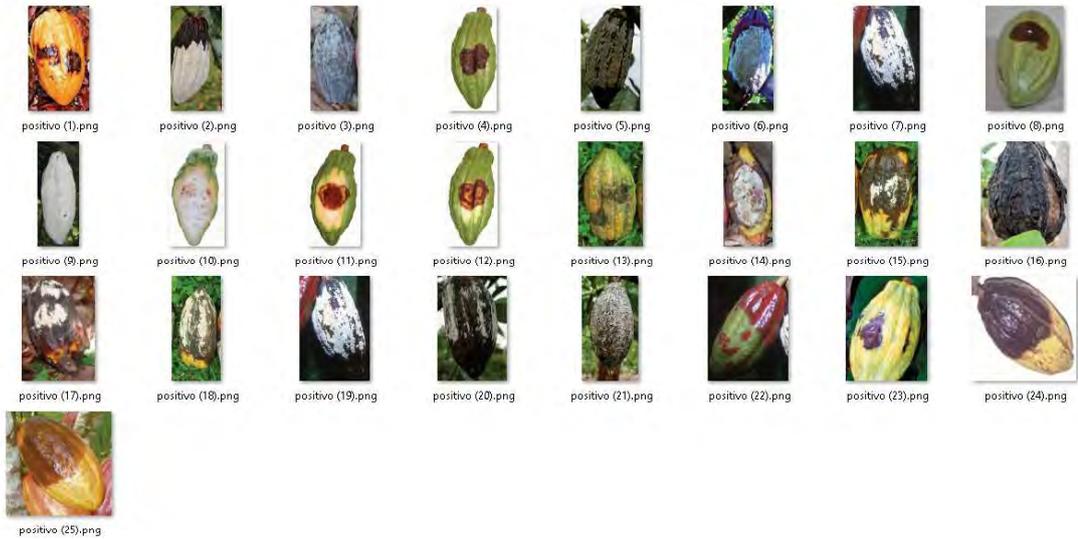


Figura 3.5: Cacao anómalo(Fuente:Google.com)



Figura 3.6: Cacao no anómalo(Fuente:Google.com)

Para la prueba se uso el modelo de CNN que usa un bloque Resnet para clasificar las imágenes basado en el histograma 2D del mapa de color HSL que se mostró en la sección 2.2.2 para el sistema de detección de cacaos anómalos. Esta clasificó las imágenes usando como margen el valor de 0.9 (osea si la predicción es mayor a 0.9, es un cacao anómalo). De este modo se obtuvo que las imágenes mostradas en la figura 3.7 y 3.8 han sido clasificadas como cacao anómalo y cacao no anómalo respectivamente.

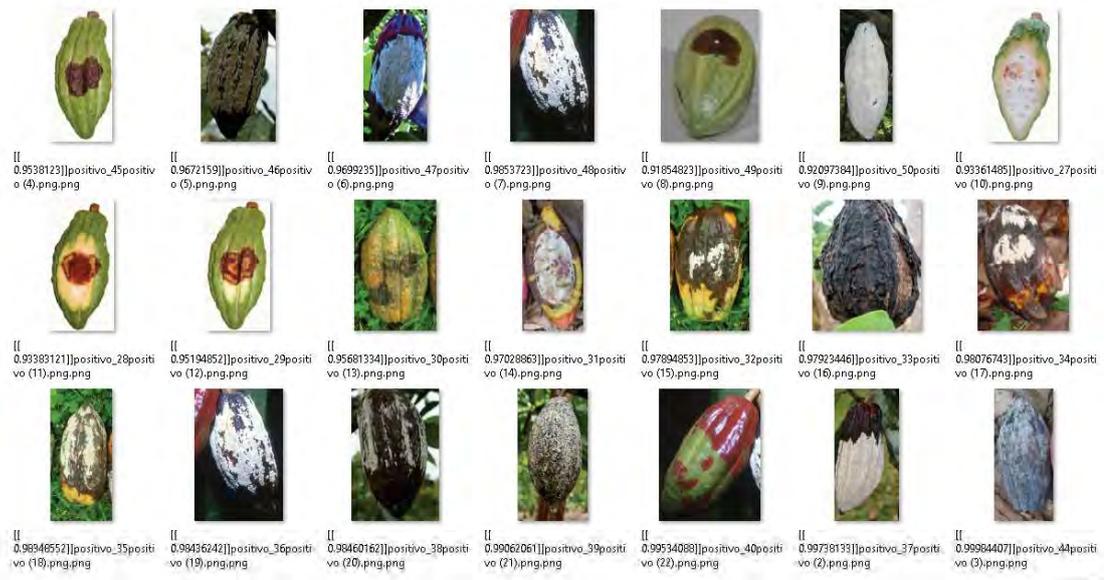


Figura 3.7: Cacaos clasificados como anómalos(Fuente propia)



Figura 3.8: Cacaos clasificados como no anómalos (Fuente propia)

Entonces se anotó estos resultados en la tabla 3.3 y se obtuvo las medidas básicas de rendimiento mostradas en la tabla 3.4. De esto se pudo observar que la exactitud de 92% es cercana a 94.8% del entrenamiento mostrada en el anexo D.2.

Tabla 3.3: prueba del modelo de detección de cacao

		Resultado de la Clasificación	
		Anómalo	No anómalo
Clasificación Real	Anómalo	VP	FN
		21	4
	No anómalo	FP	VN
		0	25

Tabla 3.4: Rendimiento del modelo de clasificación de imágenes

Medida	Valor
Exactitud	92%
Ratio de error	8%
Sensitividad	84%
Especificidad	100%
Precisión	100%
Ratio de falsos positivos	0%

### 3.1.3 Prueba del sistema de detección de anomalías en los cultivos de cacao

Para esta prueba, se uso 50 imágenes de árboles de cacao o porciones de ella donde se ha utilizado el sistema combinado con el mismo margen de 0.9 para los dos modelos que lo componen. Por otro lado, ya que se debe evaluar un sistema que combina dos modelos, se define los elementos de la matriz de confusión a continuación.

- Verdaderos Positivos: Cacaos con anomalías detectados como zonas con cacaos anómalos
- Verdaderos Negativos: Cacaos sin anomalías detectados como zonas con cacaos no anómalos
- Falsos Positivos: Cacaos o no cacaos detectados como zonas con cacaos anómalos
- Falsos Negativos: Cacaos o no cacaos anómalos detectados como zonas con cacaos no anómalos y cacaos en zonas donde no se detecto cacao

Considerando esto, se muestra el resumen de la prueba de cada caso en la tabla 3.5 pero la prueba imagen por imagen de cada caso se puede observar en el anexo F.

Tabla 3.5: Resumen (Fuente propia)

Caso	VP	VN	FP	FN	ACC	ERR	SN	SP	PREC	FPR
Caso 1	0	3	0	4	43%	57%	0%	100%	0%	0%
Caso 2	0	2	1	0	67%	33%	0%	67%	0%	33%
Caso 3	0	12	4	5	57%	43%	0%	75%	0%	25%
Caso 4	0	4	1	1	67%	33%	0%	80%	0%	20%
Caso 5	0	5	3	1	56%	44%	0%	63%	0%	38%
Caso 6	0	1	1	2	25%	75%	0%	50%	0%	50%
Caso 7	0	8	0	3	72%	27%	0%	100%	0%	0%
Caso 8	0	15	3	2	75%	25%	0%	83%	0%	17%
Caso 9	0	4	0	2	67%	33%	0%	100%	0%	0%
Caso 10	0	10	0	0	100%	0%	0%	1%	0%	0%
Caso 11	0	4	2	4	40%	60%	0%	67%	0%	33%
Caso 12	0	14	3	3	70%	30%	0%	82%	0%	18%
Caso 13	0	2	2	1	40%	60%	0%	50%	0%	50%
Caso 14	0	4	0	6	40%	60%	0%	100%	0%	0%
Caso 15	0	5	0	9	36%	64%	0%	100%	0%	0%
Caso 16	0	1	1	1	33%	67%	0%	50%	0%	50%
Caso 17	0	1	0	1	50%	50%	0%	100%	0%	0%
Caso 18	0	51	0	31	62%	38%	0%	100%	0%	0%
Caso 19	0	2	1	0	67%	33%	0%	67%	0%	33%
Caso 20	0	3	2	6	27%	73%	0%	60%	0%	40%
Caso 21	0	3	0	1	75%	25%	0%	100%	0%	0%
Caso 22	0	1	4	0	20%	80%	0%	20%	0%	80%
Caso 23	0	7	0	1	88%	13%	0%	100%	0%	0%
Caso 24	0	3	0	6	33%	67%	0%	100%	0%	0%
Caso 25	0	11	1	1	85%	15%	0%	92%	0%	8%
Caso 26	0	4	0	2	67%	33%	0%	100%	0%	0%
Caso 27	0	12	2	8	55%	45%	0%	86%	0%	14%
Caso 28	0	8	0	7	53%	47%	0%	100%	0%	0%
Caso 29	0	9	4	1	64%	36%	0%	69%	0%	31%
Caso 30	2	0	0	3	40%	60%	40%	0%	100%	0%
Caso 31	0	28	0	28	50%	50%	0%	100%	0%	0%
Caso 32	0	0	6	8	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Caso 33	0	2	2	2	33%	67%	0%	50%	0%	50%
Caso 34	0	5	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Caso 35	0	4	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Caso 36	0	2	2	2	33%	67%	0%	50%	0%	50%
Caso 37	0	4	12	8	17%	83%	0%	25%	0%	75%
Caso 38	0	10	0	2	83%	17%	0%	100%	0%	0%
Caso 39	0	2	1	1	50%	50%	0%	67%	0%	33%
Caso 40	0	0	3	3	0%	100%	0%	0%	0%	100%
Caso 41	1	0	2	5	13%	88%	17%	0%	33%	100%
Caso 42	0	3	0	5	38%	63%	0%	100%	0%	0%
Caso 43	0	5	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Caso 44	0	5	0	7	42%	58%	0%	100%	0%	0%
Caso 45	0	1	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Caso 46	0	7	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Caso 47	0	5	1	0	83%	17%	0%	83%	0%	17%
Caso 48	0	1	2	0	33%	67%	0%	33%	0%	67%
Caso 49	0	9	0	6	60%	40%	0%	100%	0%	0%
Caso 50	0	6	0	0	100%	0%	0%	100%	0%	0%
Total	3	308	66	189	55%	45%	2%	82%	4%	18%
Promedio					56%	43.9%	1.1%	75.3%	2.7%	22.6%

Con lo anterior, se obtuvo que a pesar de que los modelos por separado tengan exactitud de 94% y 92% respectivamente, si se usa de manera combinada con el *sliding window* se puede obtener una exactitud de 55%. Sin embargo con el aumento de numero de capturas por árbol se podría evitar falsos negativos.

## Capítulo 4

### Presupuesto estimado Necesitado

El presupuesto presentado a continuación es solamente para la compra de componentes. Además el precio mostrado esta en soles y el tipo de cambio que se ha usado es  $\$1 = S/.3.27285$ . Cabe mencionar que se considero un costo de importación igual al 50% del costo de componentes extranjeros.

#### 4.1 Presupuesto para el ensamble en Columna y Bomba

En la tabla 4.1, se puede observar el costo de la columna eléctrica, de la bomba y de todo el ensamble columna y bomba.

Tabla 4.1: Presupuesto del ensamble columna y bomba (Fuente Propia)

Componente	Cant.	P. unit.(S./.)	Import.(S./.)	Total (S./.)
Columna Electrica	1	S./1,145.00	S./572.50	S./1,717.50
Bomba Semifog	1	S./2,153.54	S./1,076.77	S./3,230.31
Boquilla	2	S./28.68	S./14.34	S./86.04
Mangueras	4	S./155.46	S./77.73	S./932.76
Base Para Columna Y Bomba	1	S./157.50	S./0.00	S./157.50
Soporte Lateral Para La Columna	2	S./150.00	S./0.00	S./300.00
Soporte Sobre Columna	1	S./50.00	S./0.00	S./50.00
Tarugo Cuadrado	4	S./25.00	S./0.00	S./100.00
Soporte Para Boquilla	1	S./50.00	S./0.00	S./50.00
Soporte De Base Parte 1	3	S./50.00	S./0.00	S./150.00
Soporte De Base Parte 2	2	S./75.00	S./0.00	S./150.00
Unión Atornillada	7	S./6.55	S./0.00	S./45.85
<b>Costo Total</b>				<b>S/.6,969.96</b>

## 4.2 Presupuesto para el ensamble en la tapa delantera

En este ensamble, solo se tienen 3 tipos de componentes, de los cuales uno, que es la tapa delantera, ya esta incluido en el precio del vehículo. El costo total de este ensamble se muestra en la tabla 4.2

Tabla 4.2: Presupuesto del ensamble en la tapa delantera(Fuente Propia)

Componente	Cant.	P. unit.(S./.)	Import.(S./.)	Total (S./.)
Maxsonar Mb7247	4	S./586.17	S./293.09	S./3,517.02
Sello Para El Sonar	4	S./30.00	S./0.00	S./120.00
<b>Costo Total</b>				<b>S./3,637.02</b>

## 4.3 Presupuesto para el ensamble en la tapa superior

En la tabla 4.3 se puede observar el costo del contenedor, las cámara IP, los sellos y de todos los componentes del ensamble en la tapa superior.

Tabla 4.3: Presupuesto del ensamble en la tapa superior(Fuente Propia)

Componente	Cant.	P. unit.(S./.)	Import.(S./.)	Total (S./.)
Contenedor	1	S./157.53	S./78.77	S./236.30
Adafruit Gps	1	S./130.98	S./65.49	S./196.47
Camera Ip Hikvision	2	S./363.85	S./181.93	S./1,091.55
WavlinkAc600	1	S./261.83	S./130.92	S./392.75
Porcion De Tarugo	6	S./1.00	S./0.00	S./6.00
Soporte Del Contenedor	1	S./150.00	S./0.00	S./150.00
Porcion De Tarugo	2	S./1.00	S./0.00	S./2.00
Protector Para Gps	1	S./50.00	S./0.00	S./50.00
Unión Atornillada	4	S./6.55	S./0.00	S./26.20
Sello Para La Camara	2	S./30.00	S./0.00	S./60.00
Sello Para El Gps	1	S./30.00	S./0.00	S./30.00
Sello Para La Columna	1	S./30.00	S./0.00	S./30.00
Sello Para Antena	1	S./30.00	S./0.00	S./30.00
<b>Costo Total</b>				<b>S./2,301.26</b>

## 4.4 Presupuesto para las bandejas con elementos electrónicos

En estas bandejas, se encuentran la mayoría de elementos electrónicos. En la tabla 4.4, se puede observar el costo total de los componentes para estas placas.

Tabla 4.4: Presupuesto para las bandejas con elementos electrónicos(Fuente Propia)

Componente	Cant.	P. unit.(S./.)	Import.(S./.)	Total (S./.)
Nvidia Jetson Tk1	1	S./631.63	S./315.82	S./947.45
Beaglebone Black Rev.C	1	S./185.54	S./92.77	S./278.31
Router V2	1	S./150.00	S./75.00	S./225.00
Esp8266F	3	S./64.80	S./32.40	S./291.60
Multiplexor I2C	1	S./21.27	S./10.64	S./31.91
Pololu G2 24V21	2	S./261.50	S./130.75	S./784.50
Tarjeta Distribuidora	1	S./32.50	S./16.25	S./48.75
Regulador 24V-3.3V	1	S./62.18	S./31.09	S./93.27
Terminal De Fusibles	1	S./19.41	S./9.71	S./29.12
Dual Bus 100A	2	S./144.60	S./72.30	S./433.80
Dual Vus 100A Cover	2	S./100.00	S./50.00	S./300.00
Esp8266E	2	S./42.48	S./21.24	S./127.44
Bandeja De Montaje 1	1	S./150.00	S./0.00	S./150.00
Tarugo	4	S./3.84	S./0.00	S./15.36
Unión Atornillada	2	S./6.55	S./0.00	S./13.10
Soporte Para Esp8266	3	S./50.00	S./0.00	S./150.00
Soporte Para Mux I2C Y Esp8266	1	S./50.00	S./0.00	S./50.00
Fusibles	6	S./10.00	S./0.00	S./60.00
Bandeja De Montaje 2	1	S./150.00	S./0.00	S./150.00
Unión Atornillada	7	S./6.55	S./0.00	S./45.85
<b>Costo Total</b>				<b>S./4,225.45</b>

## 4.5 Presupuesto del vehículo RMP 440

El costo estimado de la adquisición del vehículo se presenta en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Presupuesto del vehículo (Fuente Propia)

Componente	Cant.	P. unit.(S./.)	Import.(S./.)	Total (S./.)
RMP440LE	1	S/. 147,278.25	S/. 73639.13	S/.220,917.38
<b>Costo Total</b>				<b>S/.220,917.38</b>

## 4.6 Costo total de los componentes

Por último, en la tabla 4.6, se muestra el costo total de todos los ensambles, del vehículo, de las uniones atornilladas finales para unir los subensambles y el costo estimado total. De esto se obtiene que solo el presupuesto de los componentes del sistema móvil es S/.238,123.11.

Tabla 4.6: Presupuesto del ensamble en la tapa delantera(Fuente Propia)

Item	Total (S./.)
Ensamble columna y bomba	S/.6,969.96
Ensamble en la tapa delantera	S/.3,637.02
Ensamble en la tapa superior	S/.2,301.26
Bandejas y electrónicos	S/.4,225.45
RMP440LE	S/.220,917.38
Uniones finales	S/.72.05
<b>Costo Total</b>	<b>S/.238,123.11</b>

## Capítulo 5

### Conclusiones y Recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

Como resultado de los elementos escogidos y del sistema diseñado se ha obtenido las siguientes conclusiones a partir de los objetivos de diseños mostrados en la sección sobre el sistema móvil.

- Gracias al vehículo seleccionado y la evaluación realizada, se puede calcular que el sistema móvil puede revisar 60 árboles en dos horas debido a que su velocidad de desplazamiento lo permite; es capaz de soportar la carga de 60 Kg ya que su carga máxima es de 180 Kg; posee la habilidad de sobrepasar obstáculos de 10 cm como se obtuvo en la evaluación y puede alimentar al vehículo de energía en toda la operación ya que su capacidad es de 1900Wh
- Debido a que se elaboraron las bandejas y elementos de soporte, se pudo diseñar elementos de soporte para el montaje de los elementos electrónicos dentro del vehículo para brindarles una mayor protección
- Con el uso combinado del GPS, los sonares y las cámaras IP que tienen un alcance de más de 3 metros, se logró diseñar un sistema para navegar de modo teleoperado que puede detectar obstáculos, navegar por espacios abiertos y guiarse en el terreno
- Ya que se diseñó un sistema de procesamiento de imágenes por CNN, el sistema móvil sería capaz de analizar plantas de cacao en busca de cacaos anómalos y los podría detectar con 55% de exactitud.
- El uso de la antena WIFI de largo alcance permite que el sistema sea capaz de comunicarse con la estación y pueda ser manejado; asimismo, se puede obtener información de los sensores de manera independiente.
- Dado que el móvil cuenta con un sistema de irrigación que combina una bomba y una columna eléctrica, este posee la habilidad de irrigar zonas de hasta más de 3 metros de alto, sin necesidad de acercarse a los frutos de cacao; asimismo, gracias al contenedor de 4 gal., puede irrigar hasta 60 árboles por sesión.

## 5.2 Recomendaciones

Por otro lado, durante el desarrollo y evaluación del sistema a lo largo del diseño, se han obtenido mejoras que podrían aplicarse.

- Durante la búsqueda de antecedentes de este tipo de solución, se encontró que había sistemas para cultivar lechugas dentro de volúmenes controlados a modo de pequeños invernaderos cuyo clima se podría modificar fabricados por el MIT media lab [42]. Entonces, si se propusiera un proceso de selección artificial para reducir el tamaño de las plantas de cacao en conjunto con el uso de este tipo de invernaderos, la tarea podría ser más fácil de tecnificar ya que no sería necesario hacerlo en espacios abiertos
- El sistema de visión por computadora por CNN y el uso de procesamiento de imágenes podría ser reemplazado si se contara con una red de banda ancha dedicada para los sistemas móviles. El reemplazante sería un sistema de procesamiento de imágenes en la nube, la cual podría usar procesadores más potentes y una arquitectura de estado del arte que lo haría más rápido y podría elevar su exactitud
- El sistema de detección de cacaos anómalos está dividido en dos subsistemas pero este podría ser solo uno. Para esto, se tendría que elevar su base de datos de imágenes hasta conseguir una exactitud aceptable. Un ejemplo de tamaño de base de datos es el del ILSVRC que usa 14,197,122 imágenes pero su objetivo es clasificar en 10 tipos de elementos no solo uno
- El sistema podría dividirse en varios submódulos separados para cada tarea. Por ejemplo, un módulo móvil podría solo capturar las imágenes de las plantas y guardar la posición donde se tomó la captura. Luego al terminar esta tarea, este vehículo alimentaría las imágenes en otro módulo en la estación, este analizaría las imágenes y determinaría donde habrían anomalías para programar una irrigación manual o si se desea en otro módulo móvil. De esta manera podría reducirse el costo que ocasiona el transporte de todos los componentes por todo el campo cuando no es necesario.

## Bibliografía

- [1] B. Salas Vanini, "Demanda mundial de cacao fino aumenta y agricultores peruanos podrían cerrar actual déficit | Economía | Gestion.pe," *Gestion*, 2015. [Online]. Available: <http://gestion.pe/economia/demanda-mundial-cacao-fino-sigue-aumento-y-agricultores-peruanos-podria-cerrar-actual-deficit-2146905>
- [2] Gestion, "Volumen exportado de cacao y sus derivados creció 15,9% | Economía | Gestion.pe," *Gestion*, 2016. [Online]. Available: <http://gestion.pe/economia/volumen-exportado-cacao-y-sus-derivados-crecio-159-2153055>
- [3] O. Morales, A. Borda, A. Argandoña, R. Farach, L. Garcia Naranjo, and K. Lazo, *La Alianza Cacao Perú y la cadena productiva del cacao fino de aroma*, 2015, vol. 1.
- [4] R. Gomez Aliaga, R. Garcia Blas, F. Tong, and C. Gonzalez Huertas, "Paquete tecnológico del cultivo del cacao fino de aroma," p. 70, 2014.
- [5] C. R. Tucto, "MANUAL TÉCNICO DE CACAO APPCACAO," 2014. [Online]. Available: [http://appcacao.org/wp-content/uploads/2015/07/Manual-t{\char"00E9\relax}cnico-de-cacao.pdf](http://appcacao.org/wp-content/uploads/2015/07/Manual-t{\char)
- [6] D. Anthony, S. Elbaum, A. Lorenz, and C. Detweiler, "On crop height estimation with UAVs," *IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst.*, no. Iros, pp. 4805–4812, 2014.
- [7] M. Wang, J. Wei, J. Yuan, and K. Xu, "A Research for Intelligent Cotton Picking Robot Based on Machine Vision," pp. 800–803, 2008.
- [8] C. Xia, Y. Li, T. S. Chon, and J. M. Lee, "A stereo vision based method for autonomous spray of pesticides to plant leaves," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, no. ISIE, pp. 909–914, 2009.
- [9] K. Gotou, T. Fujiura, Y. Nishiura, H. Ikeda, and M. Dohi, "3-D vision system of tomato production robot," *IEEE/ASME Int. Conf. Adv. Intell. Mechatronics, AIM*, vol. 2, no. Aim, pp. 1210–1215, 2003.
- [10] S. K. Pilli, B. Nallathambi, S. J. George, and V. Diwanji, "EAGROBOT - A robot for early crop disease detection using image processing," *2nd Int. Conf. Electron. Commun. Syst. ICECS 2015*, no. Icecs, pp. 1684–1689, 2015.

- [11] H. Pota, R. Eaton, J. Katupitiya, and S. D. Pathirana, "Agricultural robotics: A streamlined approach to realization of autonomous farming," *ICIIS 2007 - 2nd Int. Conf. Ind. Inf. Syst. 2007, Conf. Proc.*, no. August, pp. 85–90, 2007.
- [12] T. Hague, J. A. Marchant, and N. D. Tillett, "Autonomous robot navigation for precision horticulture," *Robot. Autom. 1997. Proceedings., 1997 IEEE Int. Conf.*, vol. 3, no. April, pp. 1880–1885, 1997.
- [13] F. N. Dos Santos, H. Sobreira, D. Campos, R. Morais, A. Paulo Moreira, and O. Contente, "Towards a Reliable Robot for Steep Slope Vineyards Monitoring," *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, pp. 1–16, 2016.
- [14] S. A. Amrita, E. Abirami, A. Ankita, R. Mrs. Praveena, and R. Mrs. Srimeena, "Agricultural Robot for Automatic Ploughing and Seeding," *Ieee*, no. TIAR, pp. 17–23, 2015.
- [15] B. Yoon and S. Kim, "Design of paddy weeding robot," *2013 44th Int. Symp. Robot. ISR 2013*, 2013.
- [16] K. Nielsen and P. Andersen, "Control of an autonomous vehicle for registration of weed and crop in precision agriculture," *IEEE Int. Conf. Control Appl.*, vol. 18, no. 20, pp. 909–914, 2002. [Online]. Available: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1038723](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1038723)
- [17] Y. Diczbalis, J. Daniells, S. Lambert, and C. Searle, "Plantation Crops," in *Hortic. Plants People Places, Vol. 1*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014, pp. 263–299. [Online]. Available: [http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8578-5\\_8](http://link.springer.com/10.1007/978-94-017-8578-5_8)
- [18] U. Krauss and W. Soberanis, "Rehabilitation of diseased cacao fields in Peru through shade regulation and timing of Biocontrol measures," *Agrofor. Syst.*, vol. 53, no. 2, pp. 179–184, 2001.
- [19] Y. LeCun, Y. Bengio, and G. Hinton, "Deep learning," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, may 2015. [Online]. Available: <http://www.nature.com/doi/10.1038/nature14539>
- [20] J. Gibson, "The Perception of the Visual World," 1950.
- [21] R. Ennals, "Pamela McCorduck and A.K. Peters (eds): Machines who think: 25th anniversary update," *AI & SOCIETY*, vol. 18, no. 4, pp.

382–383, oct 2004. [Online]. Available: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921889005800259><http://link.springer.com/10.1007/s00146-004-0307-0>

- [22] R. Brunelli, *Template Matching Techniques in Computer Vision: Theory and Practice*. Wiley, 2009.
- [23] T. Ojala, M. Pietikainen, and D. Harwood, “Performance evaluation of texture measures with classification based on Kullback discrimination of distributions,” in *Proceedings of 12th International Conference on Pattern Recognition*, vol. 1. IEEE Comput. Soc. Press, pp. 582–585. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/576366/>
- [24] R. McConnell, “Method of and apparatus for pattern recognition,” 1986, uS Patent 4,567,610. [Online]. Available: <http://www.google.co.uk/patents/US4567610>
- [25] P. Viola and M. Jones, “Rapid object detection using a boosted cascade of simple features,” in *Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. CVPR 2001*, vol. 1. IEEE Comput. Soc, pp. I–511–I–518. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/990517/>
- [26] D. Lowe, “Object recognition from local scale-invariant features,” in *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*. IEEE, 1999, pp. 1150–1157 vol.2. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/790410/>
- [27] R. Funayama, H. Yanagihara, L. Van Gool, T. Tuytelaars, and H. Bay, “Robust interest point detector and descriptor,” 2012. [Online]. Available: <https://www.google.com/patents/US8165401>
- [28] T. M. Mitchell, “CHAPTER 1 GENERATIVE AND DISCRIMINATIVE CLASSIFIERS : NAIVE BAYES AND LOGISTIC REGRESSION Learning Classifiers based on Bayes Rule,” *Machine Learning*, vol. 1, no. Pt 1-2, pp. 1–17, 2010.
- [29] J. DeStefano, “Logistic regression and the Boltzmann machine,” in *1990 IJCNN International Joint Conference on Neural Networks*. IEEE, 1990, pp. 199–204 vol.3.

- [30] E. Osuna, R. Freund, and F. Girosit, "Training support vector machines: an application to face detection," in *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE Comput. Soc, pp. 130–136. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/609310/>
- [31] S. K. Tichkule and D. H. Gawali, "Plant diseases detection using image processing techniques," in *2016 Online International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET)*. IEEE, nov 2016, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7916653/>
- [32] H. Xiao, C. Tong, and Q. Liu, "A new method for discovery of vegetation changes based on satellite ground photographs," in *2015 8th International Congress on Image and Signal Processing (CISP)*. IEEE, oct 2015, pp. 851–855. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7407996/>
- [33] T. Valiollahi, A. Shahbahrami, and M. Zavareh, "Correlation estimation between nitrogen and bean plant colors," in *2015 9th Iranian Conference on Machine Vision and Image Processing (MVIP)*. IEEE, nov 2015, pp. 138–141. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7397522/>
- [34] M. V. Antonio López Peña, Ernest Valveny, Maria Vanrell,, "Detección de Objetos," 2015.
- [35] O. Russakovsky, J. Deng, H. Su, J. Krause, S. Satheesh, S. Ma, Z. Huang, A. Karpathy, A. Khosla, M. Bernstein, A. C. Berg, and L. Fei-Fei, "ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge," *International Journal of Computer Vision (IJCV)*, vol. 115, no. 3, pp. 211–252, 2015.
- [36] C. Szegedy, W. Liu, Y. Jia, P. Sermanet, S. Reed, D. Anguelov, D. Erhan, V. Vanhoucke, and A. Rabinovich, "Going deeper with convolutions," *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol. 07-12-June, pp. 1–9, 2015.
- [37] Y. L. Cun, L. Jackel, B. Boser, and J. Denker, "Handwritten Digit Recognition: Applications of Neural Net Chips and Automatic Learning," 1989. [Online]. Available: [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-76153-9\\_35](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-76153-9_35)
- [38] K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun, "Deep Residual Learning for Image Recognition," *Arxiv.Org*, vol. 7, no. 3, pp. 171–180, 2015. [Online]. Available: <http://arxiv.org/pdf/1512.03385v1.pdf>

- [39] H. Performance and S. Rangefinder, "I2CXL-MaxSonar ® - WR/WRC™ Series," pp. 1–18, 2012.
- [40] C. Aware, "Hikvision DS-2CD2142FWD-I 4MP Night Time Footage," 2017. [Online]. Available: <https://youtu.be/SddvTanee-c>
- [41] SEGWAY, "RMP440LE." [Online]. Available: <https://stanleyinnovation.com/wp-content/uploads/2014/09/Segway{ }SpecSheet{ }440LE1.pdf>
- [42] C. Harper, "This computer will grow your food in the future," 2015. [Online]. Available: <https://www.ted.com/talks/caleb{ }harper{ }this{ }computer{ }will{ }grow{ }your{ }food{ }in{ }the{ }future?utm{ }campaign=tedsread--b{ }utm{ }medium=referral{ }utm{ }source=tedcomshare>
- [43] P. De Santos, E. Garcia, J. A. Cobano, and A. Ramirez, "SIL06: A six-legged robot for humanitarian de-mining tasks," vol. 15, pp. 523–528, 2004.
- [44] Y. Cengel and R. Turner, *Fundamentals of Thermal-fluid Sciences*, ser. McGraw-Hill series in mechanical engineering. McGraw-Hill Companies, 2005. [Online]. Available: <https://books.google.com.pe/books?id=KmeC6b9hzwgC>
- [45] Wikipedia, "Stokes' law — wikipedia, the free encyclopedia," 2017, [Online; accessed 4-April-2017]. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stokes%27\\_law&oldid=773436134](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Stokes%27_law&oldid=773436134)
- [46] D. Zerihun, C. A. Sanchez, and A. W. Warrick, "Sprinkler Irrigation Droplet Dynamics . I : Review and Theoretical Development," pp. 1–16.
- [47] Y. Fukui and K. Nakanishi, "Irrigation cence Computer Evaluation of Sprinkler Irrigation Uniformity," vol. 32, pp. 23–32, 1980.
- [48] I. S. D. N. R. D. von Bernuth, "Simulation of wind&#x2010;distorted sprinkler patterns," *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 117, no. 2, pp. 285–306, Issue: object: doi:10.1061/jidedh.1991.117.issue-2, revision: rev:1479354673169-5650:doi:10.1061/jidedh.1991.117.issue-2, .
- [49] G. Lorenzini, "Simplified Modelling of Sprinkler Droplet Dynamics," vol. 87, pp. 1–11, 2004.

- [50] D. Kincaid and T. Longley, "A water Droplet Evaporation and Temperature Model," *ASAE Transactions*, vol. 32, no. 1952, pp. 457–463, 1989. [Online]. Available: <https://elibrary.asabe.org/azdez.asp?AID=31026&T=2>
- [51] M. L. Mokeba, D. W. Salt, B. E. Lee, and M. G. F, "Simulating the dynamics of spray droplets in the atmosphere using ballistic and random-walk models combined," vol. 68, 1997.
- [52] NASA, "Drag of Sphere." [Online]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/K-12/airplane/dragsphere.html>
- [53] R. J. List, "Smithsonian Meteorological Tables," *Smithsonian Meteorological Tables*, vol. 4014, no. 1963, 1963.
- [54] "Autodesk inventor," <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>, accessed: 2017-05-30.
- [55] "Friction coefficient," [http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d\\_778.html](http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html), accessed: 2017-05-30.
- [56] Google, "Google Images Search Engine." [Online]. Available: <https://images.google.com/>
- [57] Python Software Foundation, "Python3.5." [Online]. Available: <https://www.python.org/downloads/release/python-350/>
- [58] E. A. Margffoy Tuay, S. Silvester, C. Cordoba, D. A. Moré, G. Peña-Castellanos, J. Niesen, R. Laverde, and S. Corlay, "Spyder." [Online]. Available: <https://github.com/spyder-ide>
- [59] F. Chollet, "Keras," <https://github.com/fchollet/keras>, 2015.
- [60] R. A.-R. et al, "Theano: A Python framework for fast computation of mathematical expressions," *arXiv e-prints*, vol. abs/1605.02688, May 2016. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1605.02688>
- [61] X. Z. et al, "TensorFlow: Large-scale machine learning on heterogeneous systems," 2015, software available from [tensorflow.org](http://tensorflow.org/). [Online]. Available: <http://tensorflow.org/>
- [62] S. van der Walt, S. C. Colbert, and G. Varoquaux, "The numpy array: A structure for efficient numerical computation," *Computing in Science &*

*Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 22–30, 2011. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1109/MCSE.2011.37>

[63] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2d graphics environment,” *Computing in Science & Engineering*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, 2007. [Online]. Available: <http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1109/MCSE.2007.55>

[64] G. Bradski, “opencv,” *Dr. Dobb’s Journal of Software Tools*, 2000.

