

**Diseño de un Sistema de Visión Artificial para la Navegación de un Dron Terrestre  
Aplicado a la Agricultura de Precisión.**

**Autor:**

**Diego Mauricio Carrillo Tovar**

**Asesor:**

**Ángel Alejandro Rodríguez Aya**

**Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD**

**Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería**

**Ingeniería Electrónica**

**Villavicencio**

**2019**

## DEDICATORIA

ii

Le dedico este proyecto de grado primeramente a Dios por darme la vida, el entendimiento y sabiduría para llegar a este punto de mi vida.

También se la dedico a mis padres Omar y Olga que quienes con su esfuerzo y confianza permitieron que yo me formara como ingeniero y cumpliera uno de mis sueños, gracias por inculcar en mí todos los valores y la perseverancia, son ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer a las adversidades porque Dios siempre está conmigo.

A mi hermana Islena por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias.

El amor recibido, la paciencia y la dedicación con la que mis padres se preocupaban cada día por mi avance y desarrollo de mi trabajo de grado, es simplemente único. Cada una de estas cosas se refleja en la vida de un hijo.

Gracias a mis padres por ser los promotores principales de mis sueños, gracias a ellos por confiar en estos, por creer en mí y mis expectativas. Gracias a mi madre por la dedicación prestada, siempre dispuesta a tenderme la mano para ayudarme, por su compañía en las noches de desvelo y sus palabras de ánimo que renovaban mis fuerzas. Gracias a mi padre por confiar ciegamente en mí, por ser un polo a tierra en mis ideas y brindarme el apoyo económico en los momentos requeridos, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que han guiado durante la vida. Gracias a mi hermana que con sus locuras me acompañó en las noches de desvelo, gracias por ser mi mas grande fan y seguirme sin importar donde, gracias por ser ese hombro donde siempre puedo encontrar apoyo.

También agradezco a mis tutores de la universidad quienes con el don de compartir sus conocimientos me brindaron las bases para desarrollar este proyecto, pero en especial quiero agradecer a mi líder de tesis el ingeniero Ángel Rodríguez por sus consejos y tiempo dedicado al desarrollo e implementación de este proyecto de investigación gestado en el semillero renovatio de la UNAD.

Gracias a mi novia Jennifer por su entendimiento en estos largos meses donde la prioridad de mi vida fue terminar el proyecto y en ocasiones descuidando nuestra relación, gracias por el amor brindado, los consejos, el cariño, la paciencia y el acompañamiento durante el proceso de la investigación.

Gracias a Dios por la vida de mis padres, también porque cada día bendice mi vida con la hermosa oportunidad de estar y disfrutar al lado de las personas que me aman y a las que amo, gracias a Dios por permitirme amar a mis padres.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en la realización de mi proyecto de grado.

La visión artificial tiene como objetivo capturar información relevante del entorno (formas, colores, texturas, etc.) mediante el uso del procesamiento de imágenes. Esta información se puede utilizar en agricultura de precisión, domótica, seguridad, etc. En agricultura de precisión, el objetivo es utilizar esta información para movilizar drones en un entorno real y evaluar el estado del cultivo. Este proyecto muestra el desarrollo de una plataforma de bajo costo equipada con visión artificial con un rendimiento comparable a las opciones más sofisticadas, que navega a través de un entorno controlado. Esta reducción de costos se logró mediante el uso de sistemas embebidos para realizar el procesamiento lógico y de imágenes. Se incluye la validación experimental de la plataforma, sus limitaciones y proyecciones futuras.

**ABSTRACT**

Artificial vision aims to capture relevant information from the environment (shapes, colours, textures, etc.) through the use of image processing. This information can be used in precision agriculture, home automation, security, etc. In precision agriculture, the goal is to use this information to mobilize drones in a real environment and assess the state of the crop. This project shows the development of a low-cost platform equipped with artificial vision with performance comparable to more sophisticated options, which navigates through a controlled environment. This cost reduction was achieved by making use of embedded systems to perform logical and image processing. The experimental validation of the platform, its limitations and future projections are included.

## TABLA DE CONTENIDOS

vi

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	8
JUSTIFICACIÓN .....	12
¿Se Puede Implementar un Sistema de Navegación Autónoma para un Dron Terrestre por Medio de Brújula Electrónica, GPS, Ultrasonido o Visión Artificial?.....	12
OBJETIVOS .....	16
Objetivo General.....	16
Objetivos Específicos.....	16
MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO .....	17
Marco Conceptual.....	17
Agricultura de Precisión. ....	17
Navegación Robótica.....	17
Sistemas Embebidos. ....	18
Automatización.....	19
Sensor.....	19
Visión Artificial. ....	20
Marco Teórico.....	21
Sonido .....	21
Metodología .....	25
ESTADO DEL ARTE.....	30
EXPERIMENTACIÓN.....	33
Navegación por GPS.....	34

Navegación por brújula electrónica. ....	39
Navegación por Sensores de Ultrasonido. ....	42
Navegación por Visión Artificial.....	48
Prototipo Final. ....	53
Esquemático del prototipo final. ....	53
RESULTADOS.....	55
CONCLUSIONES .....	60
BIBLIOGRAFÍA .....	63

Tabla 1. Desempeño según el fabricante del Módulo GPS NEO-6M APM2 NEO6MV2 para  
Arduino. .... 36



Figura 1. a) Cuando la puerta se abre, se produce una compresión que se propaga por el recinto.  
 b) Cuando la puerta se cierra, se produce un rarefacción o enrarecimiento que se propaga por el recinto. (Adaptada de A. V. Baez, The New College Physics: A Spiral Approach. San Francisco: W. H. Freeman and Company. Copyright © 1967.) ..... 23

Figura 2. Las ondas sonoras se desvían en el aire, cuando éste tiene distintas temperaturas. .... 25

Figura 3. Causa (Variable Independiente) y Efecto (Variable Dependiente). ..... 26

Figura 4. Entorno del Arduino IDE. .... 33

Figura 5. Módulo GPS NEO-6M APM2 NEO6MV2 para Arduino. .... 34

Figura 6. Simulación del montaje del módulo GPS en una Arduino uno ..... 37

Figura 7. Montaje del módulo GPS con un Arduino Uno. .... 37

Figura 8. La línea roja representa la ruta realizada en el CEAD de Acacias. Las líneas verdes es la ruta demarcada por el GPS..... 39

Figura 9. Conexiones del HMC5883L..... 39

Figura 10. Ejes magnéticos de la brújula electrónica. Fórmula para calcular el ángulo de orientación..... 40

Figura 11. Prototipo de dron terrestre con brújula electrónica. .... 42

Figura 12. Conexiones del sensor HC-SR04. .... 42

Figura 13. Conexión de una Arduino y un sensor HC-SR04..... 43

Figura 14. Funcionamiento del HC-SR04 junco con un Arduino. .... 44

Figura 15. Prototipo de dron terrestre con un servomotor y encima el sensor HC-SR04..... 45

Figura 16. Prototipo de dron terrestre con tres sensores HC-SR04. .... 46

Figura 17. Prototipo de dron terrestre con tres sensores HC-SR04, montado en baquelita.....	48
Figura 18. Prototipo de dron terrestre con visión artificial usando Pixy Cam 2 y Arduino Uno.	50
Figura 19. Esquema final del prototipo funcional. ....	53
Figura 20. Visión de la pixycam2 parametrizada. ....	54
Figura 21. Primer diseño de plataforma móvil con dos motores 5 voltios, una rueda libre y batería.....	55
Figura 22. Plataforma con cuatro motores .....	56
Figura 23. Plataforma con visión artificial .....	57
Figura 24plataforma de visión artificial siguiendo línea en asfalto.....	58
Figura 25. Plataforma de visión artificial siguiendo línea en césped. ....	59

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad la agricultura se ha convertido en una de las principales prioridades en el mundo entero, debido a la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria a futuro, por esta razón se está en la búsqueda constante de tecnologías que puedan ayudar a mitigar los daños a los cultivos y reducir la pérdida de las cosechas. En el 2019 Colombia, según datos del Departamento Nacional de Planeación (DNP), en Colombia se pierden y desperdician anualmente de 9.76 millones de toneladas de alimentos, el equivalente al 34% de la producción total. (FAO,2019).

Con el gran impulso económico que se le está otorgando al sector agrícola se puede observar que el área destinada a cultivos es mayor, por ende, los cuidados de estos macro cultivos se convierten en un problema para los agricultores a cargo, como la dificultad al monitorear grandes extensiones de tierra o al momento de tomar decisiones claves, no se tiene un panorama completo de las variables que inciden en un cultivo. Estos inconvenientes se pueden traducir en una improductiva cosecha y pérdidas de recursos.

Juanita Rodríguez Kattah, viceministra de Economía Digital, del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, afirma que Colombia en el 2019 presentó una cifra de penetración de las TIC en el sector productivo del agro de 2,5% y ratificando el compromiso que tiene el país de aumentar el uso de las TIC en el sector productivo del agro. (SAC, 2019).

Unas de las nuevas tecnologías que se pueden aplicar para reducir estas pérdidas y tener una perspectiva mayor del cultivo son los drones terrestres, estos pueden abarcar

una gran área del cultivo tomando datos de variables que los seres humanos no podrían recopilar, entre estas: humedad relativa, energía solar, temperatura, pH del suelo y un análisis del crecimiento del cultivo por medio de cámaras. La aplicación de los drones se hace presente en la Agricultura de Precisión (AP), esta consiste en la implementación de máquinas desarrolladas a la medida para aumentar la productividad de los cultivos. El diseño de un dron terrestre que pueda efectuar todas estas tareas puede tardar un largo tiempo por la implementación y calibración de los sensores que tomen las variables requeridas, adicionalmente, se le suma la adecuación del sistema de alimentación por baterías y su autosuficiencia por medio de energía solar y el sistema de potencia. Para el desarrollo de este proyecto se va a centrar específicamente en la navegación del equipo y su autonomía.

Un sistema de navegación terrestre para drones basado en Global Position System (GPS) es un problema por el margen de error de estos dispositivos, éste puede llegar a ser de más o menos 6 metros en condiciones ideales, un GPS con una mayor precisión puede costar €500 aumentando los costos de producción de los agricultores. Este margen de error se podría disminuir contando con internet móvil en el cultivo.

Colombia cuenta con una cobertura de internet fijo por cable de alta velocidad del 98% de los municipios. (El Tiempo Tecnología, 2017). Esto se debe a la intervención del Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones MINTIC y su proyecto de los puntos de Vive Digital, pero estas conexiones se limitan a las cabeceras municipales, ocasionando que el resto del territorio no cuente con el servicio de internet fijo ni de internet móvil, este último esté ligado a la cobertura que puedan soportar los

operadores de dicho servicio, llegando al 61% del territorio nacional. (Dinero Tecnología, 2018).

Se sabe que Colombia no cuenta con una cobertura total en lo que se refiere a internet móvil. La Agencia Nacional del Espectro (ANE) presenta diferentes soluciones para esta temática, haciendo uso de las frecuencias no utilizadas por emisoras y TV, pero para acceder a estas frecuencias se debe pagar o tener una comunidad entera a quien otorgarle internet. Como la intención de este proyecto no es hacer llegar internet a diferentes comunidades en el país, se propone usar drones terrestres dotados de instrumentos para la navegación autónoma tales como sensores de ultrasonido, sensores infrarrojos y con visión artificial.

La idea principal es poder desarrollar el sistema de navegación de un dron terrestre sin hacer uso del GPS que sea de bajo costo y para esto se hará uso de los sistemas embebidos en especial Arduino y la Pixy 2, esta última permite reducir el consumo de procesamiento en el controlador principal de la Arduino, efectuando el procesamiento de imágenes en su propio sistema y manteniendo el bajo costo, aproximadamente U\$59.

Este proyecto se ajusta a la línea de investigación de Automatización y Herramientas Lógicas ya que se relaciona con las temáticas de:

- Acondicionamiento de señales: el dron tiene que captar los objetos a su alrededor por medio de diferentes instrumentos y realizar un traspaso de valores análogos a digitales y tomar decisiones.

- Metrología: el sistema resultante tiene que ser capaz de medir distancias y demás variables.
- Automatización de procesos: además de ser capaz de navegar autónomamente, la finalidad del proyecto es disminuir el margen de pérdida en la producción agrícola.
- Fabricación de equipos: Se diseñará un prototipo y se desarrollaran pruebas de campo con este prototipo.

Por otra parte, se puede decir también que se encuentra relacionada con la electrónica de potencia, al realizar un control sobre motores eléctricos.

## JUSTIFICACIÓN

### *¿Se Puede Implementar un Sistema de Navegación Autónoma para un Dron Terrestre por Medio de Brújula Electrónica, GPS, Ultrasonido o Visión Artificial?*

La implementación de sistemas electrónicos para la automatización de procesos hasta los finales de la década de 1990, era un uso exclusivo de grandes empresas y multinacionales debido a los costos de llevar acabo y disponibilidad del hardware, hoy en día, existen herramientas de bajo costo para la aplicación de automatización de procesos en pequeñas y medianas empresas, como por ejemplo Arduino y Raspberry Pi, las primeras son tarjetas embebidas basadas en microcontroladores de bajo costo para realizar diseños electrónicos en sensores y actuadores, estas son muy utilizadas actualmente en la academia y automatizaciones a baja escala, por otra parte también se cuenta con las tarjetas Raspberry Pi, las cuales se basan en el principio de tener un ordenador de bajo costo y de fácil uso para aplicaciones más robustas que las tarjetas Arduino no pueden realizar. (Sanchez A., 2016).

Un robot autónomo facilitaría a los agricultores mejorar la cosecha de productos como el arroz, el maíz, el plátano, la soya, entre otros, ya que con la ayuda de un sistema de navegación conformado por sensores podrá realizar recorridos y otorgar un aproximado del lugar de interés permitiendo minimizar los riesgos por las condiciones ambientales.

Aunque para muchos es claro que existe una relación directa entre tecnología y productividad, no necesariamente la inversión en tecnología lleva a aumentos de producción. En muchas ocasiones el agricultor toma el riesgo de tecnificar su cultivo y al

poco tiempo se desmotiva por no alcanzar los estándares de producción propuestos. Esto ocurre porque los equipos de mecanización que se ofrecen son en su mayoría obsoletos o sobredimensionados a lo que realmente necesitan los suelos colombianos. La ventaja de un dron terrestre con el sistema de navegación por visión artificial es que se puede adaptar a los múltiples cultivos que existen en el país y es fácil de operar. (Dienero, 2015).

Para empezar a abordar la agricultura de precisión, se debe considerar al menos tres etapas: toma de datos a nivel intensivo de las variables de suelo, cultivo y microclima, el procesamiento de dicha información, la aplicación de respuestas adecuadas en cada labor del proceso productivo agrícola. Esto indica que, aunque este enfoque no es en sí una tecnología, sí se apoya en esta para lograr sus fines mediante diversos componentes tecnológicos como: sensores de percepción remota (directos e indirectos), GPS, sistemas de información geográfica (SIG), tecnologías de aplicación de tasas diferenciadas (mecatrónica y electromecánica) y por supuesto, de las TIC. (ColombiaDigital, 2013).

El dron terrestre con navegación por visión artificial permitirá mejorar la toma de datos del cultivo a nivel del suelo y servirá como impulso para el desarrollo de la agricultura de precisión en Colombia.

En la primera etapa, es decir, en la toma de datos a nivel intensivo, se utilizan ampliamente las TIC en el monitoreo de parámetros característicos del suelo, el cultivo, plagas, microclima, entre otros. Pero igualmente, se empiezan a generar datos sobre el rendimiento espacial y temporal del cultivo; incluyendo nuevas técnicas de muestreo



donde los sensores y la transmisión de la información en tiempo real son de gran relevancia. (ColombiaDigital, 2013).

Una de las tareas que debe llevar a cabo un robot móvil de manera autónoma es la exploración segura de su entorno de trabajo, para esto registra información proveniente de los sensores, la cual es útil para la elaboración de modelos computacionales que a su vez son empleados en la navegación del robot. Sin embargo, la navegación autónoma se torna compleja por dos razones, la primera es la incertidumbre inherente a la sensorica (este concepto hace referencia a diferentes tipos de sensores que emiten una señal analógica y/o binaria) del robot y la segunda, frecuentemente los robots deben explorar entornos desconocidos para los cuales no se dispone previamente de mapas confiables y precisos, con los cuales se puedan trazar trayectorias seguras de navegación.

La propuesta de este proyecto es trabajar en la primera etapa, la toma de datos del terreno por medio de los sensores y navegación del dron, ya que es de suma importancia que el dron pueda movilizarse a través del cultivo sin ocasionar daño alguno. Haciendo uso de los sistemas embebidos (Arduino), el cuál va a ser la parte lógica del equipo, cuatro motores nos otorgarán la potencia, los sensores de ultrasonido y cámara Pixy 2, representará la visión artificial que simulará la visión de los seres humanos.

En la actualidad el procesamiento de imágenes se desarrolla por medio de programas especializados como MatLab y LabVIEW, los cuales requieren un conocimiento previo en su lenguaje de programación de alto nivel además de licencias pagas para poder desarrollar cualquier tipo de aplicaciones. Estos sistemas consumen gran cantidad de hardware que no es fácil de suministrar en otros dispositivos diferentes a

una computadora. En este proyecto el procesamiento de imágenes se realiza por medio de dos sistemas embebidos que son programados para poder realizar esta tarea de forma satisfactoria sin tener costos elevados y compra de licencias.

Con el sistema embebido Arduino se puede realizar el control directamente con sus puertos, sin tener que acceder a Hardware diferente a este, reduciendo costos y mejorando la capacidad de reacción del sistema frente a un ambiente dinámico. En comparación a otros sistemas embebidos como la Raspberry Pi, la cual requiere de Hardware diferentes a esta como relés, acondicionamiento de señales como PWM entre otros, para realizar controles externos y actuar frente al mismo ambiente dinámico lo que incrementa los costos para el consumidor final.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General*

- ✚ Desarrollar un sistema de visión artificial para la navegación de un dron terrestre autónomo aplicado a un entorno dinámico en el CEAD Acacias.

### *Objetivos Específicos*

- ✚ Aplicar los conocimientos adquiridos en el semillero renovatio sobre la visión artificial y reconocimiento de objetos para el diseño de un sistema de navegación autónoma del dron terrestre.
- ✚ Usar sistemas electrónicos estándar de monitoreo de distancias para la navegación del dron en un entorno dinámico.
- ✚ Construir una plataforma terrestre para pruebas que sea versátil y permita la implementación de diferentes sistemas embebidos.

## MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO

### *Marco Conceptual*

#### *Agricultura de Precisión.*

Puede definirse como el proceso por el cual se garantiza la uniformidad de la eficiencia en cada metro cuadrado del área de manejo, optimizando la producción y disminuyendo la variabilidad de las áreas de labranza. (Pierce & Nowak, 1999). Este proceso se da a través de la implementación de herramientas de sistemas de información y maquinaria adaptada, unida a la adopción de técnicas de tratamiento de cada área de acuerdo con sus deficiencias y potenciales. (Miranda & Clara, 2017). Estas técnicas incluyen la utilización de mapas por satélite, navegación autónoma, visión artificial, fotografías aéreas, muestreo de suelo georreferenciada, sensores de precipitación y mapas de cosecha entre otras (Antuniassi, Baio, & Sharp, 2015).

#### *Navegación Robótica.*

Se enfoca en la ubicación espacial de un robot con respecto al entorno que lo rodea, normalmente con la intención de que se desplace desde una ubicación inicial hasta una ubicación deseada. Para coordinar el movimiento normalmente se utilizan estrategias de control como:

- Navegación autónoma, particularmente útil en ambientes dinámicos y desconocidos. En ella se tiene en cuenta variaciones del entorno en tiempo real.

- Reprogramación de ruta, útil en entornos estructurados, normalmente estáticos y observables globalmente.

La falta de libre albedrío en un robot limita sus posibilidades de movimiento a una sola, siendo incapaz de reaccionar frente a estímulos externos, lo cual es un problema cuando se enfrenta a situaciones no preprogramadas. Los robots con estrategias de navegación predeterminadas son en este sentido ineficientes, ya que la gran mayoría de los entornos reales se encuentran en constante cambio (ambientes dinámicos). (Rendón C., 2015).

### *Sistemas Embebidos.*

El término (sistema embebido) hace referencia a todo circuito electrónico digital capaz de realizar operaciones de computación, generalmente en tiempo real, que sirve para cumplir una tarea específica en un producto. Los sistemas embebidos no son equivalentes a los sistemas de cómputo usados en las laptops o en computadoras de escritorio que se venden en las tiendas tecnológicas, ya que los sistemas embebidos suelen tener recursos limitados y aplicaciones específicas que los hacen sumamente útiles en múltiples ambientes, como en el campo automotriz (sistemas de inyección de gasolina, alarmas contra robos, control de climatización, sistema de frenado ABS) o en teléfonos móviles, iPad, reproductores Blu-ray, refrigeradores, alarmas de casa, lavadoras, cámaras fotográficas, instrumentación industrial, equipos médicos, Set Top Boxes, entre otros. (Arriarán, 2015).

### *Automatización.*

La palabra automatización, proviene del griego antiguo auto: guiado por uno mismo. La automatización como una disciplina de la ingeniería, es más amplia que un simple sistema de control porque abarca la instrumentación industrial que incluye los sensores y transmisores de campo, los sistemas de control y supervisión, los sistemas de transmisión y recolección de datos y las aplicaciones de software en tiempo real para supervisar y controlar las operaciones de plantas o procesos industriales. Esto se lleva a cabo mediante el siguiente conjunto de técnicas: diseño (con ayuda de un computador Computer-Aided Design (CAD)), simulación (el diseño aplicado a la ingeniería Computer Aided Engineering (CAE)) y fabricación (desarrollo del producto aplicando el diseño y la ingeniería Computer Aided Manufacturing (CAM)). (Villada Molina, Hincapié Marín, & Henaó Castañeda, 2017).

### *Sensor.*

La definición del concepto de sensor está íntimamente relacionada con la definición de transductor, ya que un sensor siempre hará uso de un transductor. No obstante, la principal diferencia entre un transductor y un sensor radica en que el sensor no solo cambia el dominio de la variable física medida, sino que además la salida del sensor será un dato útil para un sistema de medición. De este modo, un sensor se define como un dispositivo de entrada que provee una salida manipulable de la variable física medida. (Corona Ramirez, 2014).

A diferencia de un transductor, el sensor solo puede ser un dispositivo de entrada, ya que este siempre será un intermediario entre la variable física y el sistema de medida. Así que en un sensor no basta con transformar la energía, este debe tener el tipo de dominio requerido. Hoy en día los sensores entregan señales eléctricas a la salida, ya sean analógicas o digitales, debido a que este tipo de dominio físico es el más utilizado en los sistemas de medida. (Corona Ramirez, 2014).

### *Visión Artificial.*

También llamada Visión por Computador, pretende capturar la información visual del entorno físico para extraer características visuales relevantes, utilizando procedimientos automáticos. Según Marr, “Visión es un proceso que produce a partir de imágenes del mundo exterior una descripción útil para el observador y no tiene información irrelevante” (Departamento de Electrónica, Universidad Politécnica de Madrid, 2009).

En la construcción de sus artefactos, el ser humano ha imitado muchas veces, a la naturaleza. En este caso, sucede lo mismo, las cámaras de vídeo con sus ópticas hacen las veces del globo ocular, mientras el computador realiza las tareas de procesamiento, emulando el comportamiento del cerebro (Riveros Guevara, Salas López, & Solaque Guzmán, 2012). Las principales ventajas de la visión artificial respecto de la humana son:

- ✓ Es superior midiendo magnitudes físicas.
- ✓ Es más eficiente para la realización de tareas rutinarias.
- ✓ Es mejor en tareas de bajo nivel de proceso.

## ***Marco Teórico***

### *Sonido*

El sonido es una onda longitudinal y como tal, consta de áreas alternas de alta presión, compresiones, y de baja presión, rarefacciones. Puede caracterizarse por la velocidad, frecuencia, longitud de onda y la amplitud, de igual manera que cualquier otra onda periódica. Tiene en común con las otras propiedades de reflexión, refracción e interferencia. Los seres vivos emplean sonidos para obtener información de su entorno y para comunicarse con otros por medio del habla y de la música (Zitzewitz & Neff, 1996).

Hewitt (2004) afirma:

Naturaleza del sonido en el aire: Cuando aplaudimos, el sonido que se produce no es periódico. Está formado por un impulso o pulso ondulatorio que se propaga en todas direcciones. El impulso perturba el aire en la misma forma que un impulso similar perturbaría un resorte o slinky. Cada partícula se mueve con ir y venir a lo largo de la onda que se expande. (p.382)

Para tener una idea más clara de este proceso, imagina una habitación larga, como la de la figura 1.a. En un extremo hay una ventana abierta con una cortina que cuelga de ella. En el otro extremo hay una puerta. Al abrir la puerta nos podemos imaginar que empuja las moléculas que están junto a ella, y las mueve respecto a sus posiciones iniciales hacia las posiciones de las moléculas vecinas.



A la vez, éstas empujan a sus vecinas, y así sucesivamente, como una compresión que se propaga por un resorte, hasta que la cortina se sacude y sale de la ventana.

Un impulso de aire comprimido se ha movido desde la puerta hasta la cortina.

A este impulso de aire comprimido se le llama compresión. (Hewitt, 2004, p. 382).

Cuando cerramos la puerta (figura 1.b), ésta empuja algunas moléculas de aire fuera del recinto. De esta forma se produce una zona de baja presión tras la puerta. Las moléculas vecinas, entonces, se mueven hacia ellas y dejan tras de sí una zona de baja presión. Se dice que esta zona de baja presión de aire está enrarecida. Otras moléculas más alejadas de la puerta, a su vez, se mueven hacia esas regiones enrarecidas y, de nuevo, la perturbación se propaga por la habitación. Ello se nota en la cortina, que se agita hacia adentro. Esta vez, la perturbación es un enrarecimiento o rarefacción. (Hewitt, 2004,p.382).

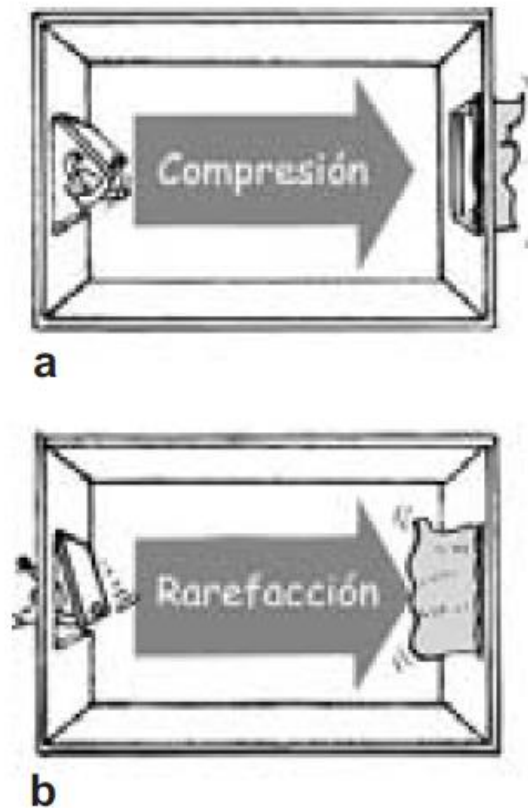


Figura 1. a) Cuando la puerta se abre, se produce una compresión que se propaga por el recinto. b) Cuando la puerta se cierra, se produce una rarefacción o enrarecimiento que se propaga por el recinto. (Adaptada de A. V. Baez, *The New College Physics: A Spiral Approach*. San Francisco: W. H. Freeman and Company. Copyright © 1967.)

La velocidad del sonido depende de las condiciones del viento, la temperatura, la humedad, la densidad del medio de propagación y su elasticidad; No depende de la intensidad, ni de la frecuencia de éste. La velocidad del sonido en el aire seco a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  es, aproximadamente, de 330 metros por segundo, es decir, casi 1,200 kilómetros por hora “un poco más que un millonésimo de la rapidez de la luz”. El vapor de agua en el aire aumenta un poco la velocidad. El sonido se propaga con mayor velocidad en el aire cálido que en el aire frío. Esto era de esperarse, porque las moléculas del aire caliente son

más rápidas, chocan entre sí con más frecuencia y en consecuencia pueden transmitir un impulso en menos tiempo. Por cada grado de aumento de temperatura sobre 0 °C, la rapidez del sonido en el aire aumenta 0.6 metros por segundo. Así, en el aire a la temperatura normal de un recinto, de unos 20 °C, el sonido se propaga a unos 340 metros por segundo (Hewitt, 2004).

Las ondas sonoras se desvían cuando algunas partes de sus frentes viajan a distintas velocidades. Esto sucede en vientos erráticos o cuando el sonido se propaga a través de aire a distintas temperaturas. Esta desviación del sonido se llama refracción. (Hewitt, 2004).

Escuchamos el relámpago cuando el destello está más o menos cercano, pero con frecuencia no lo escuchamos cuando está muy lejos, debido a la refracción. El sonido se propaga con más lentitud a mayor altitud, y se desvía apartándose del suelo. Con frecuencia sucede lo contrario en un día frío o por la noche, cuando la capa de aire cercana al suelo está más fría que el aire sobre ella. Entonces, se reduce la rapidez del sonido cerca del suelo. La mayor rapidez de los frentes de onda causa una flexión del sonido hacia el suelo, y hace que el sonido se pueda escuchar a distancias bastante mayores (figura 2) (Hewitt, 2004,p.386).

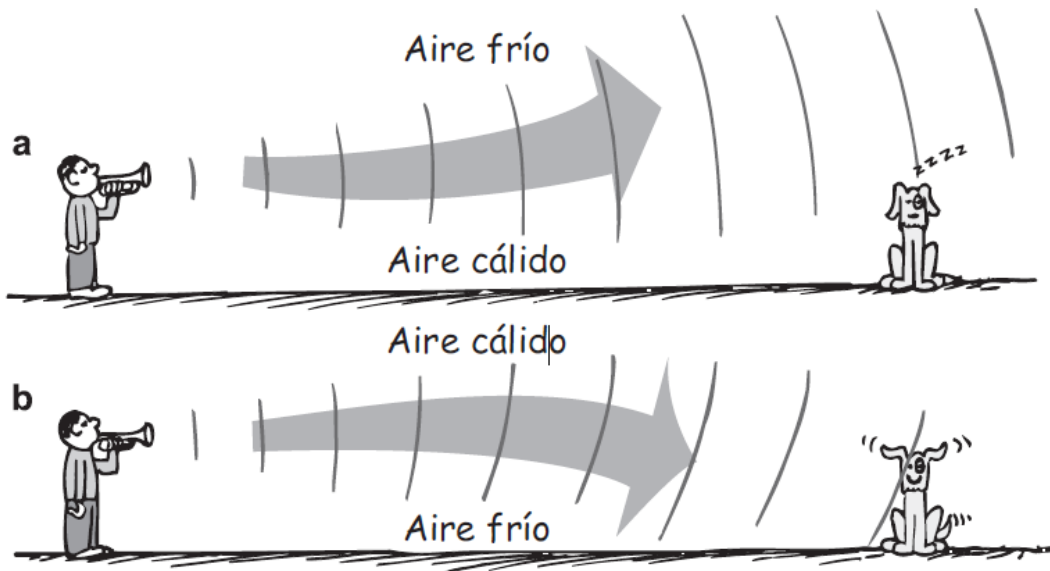


Figura 2. Las ondas sonoras se desvían en el aire, cuando éste tiene distintas temperaturas.

### Metodología

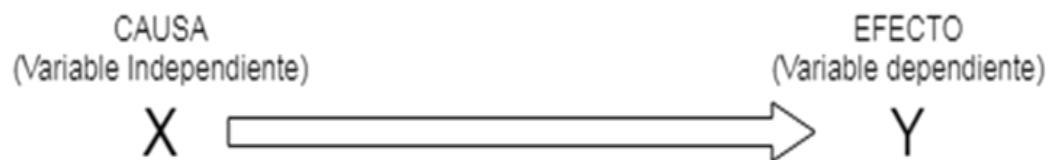
#### La Investigación Experimental.

¿Qué es un experimento? El término experimento puede tener, al menos, dos acepciones, una general y otra particular. La general se refiere a tomar una acción y después observar las consecuencias de esa acción. Este uso del término es bastante común, un ejemplo de experimento es cuando mezclamos dos sustancias químicas y se observa la reacción de este evento. La esencia de esta concepción de experimento es que éste involucra la manipulación intencional de una acción para analizar sus posibles efectos. La acepción particular que va más de acuerdo con un sentido científico del término se refiere a: “Un estudio de investigación en el que manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias de

esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro de una situación de control para el investigador”. (Toro Jaramillo & Parra Ramírez, 2010).

Los experimentos auténticos o puros manipulan variables independientes para ver efectos sobre variables dependientes en una situación de control. Con estas dos acepciones se expresa lo que es un experimento y una introducción a la investigación experimental, donde se manipulan las variables independientes y se observan los resultados en las variables dependientes.

El primer requisito de un experimento puro es la manipulación intencional de una o más variables independientes. La variable independiente es la que se considera como supuesta causa en una relación entre variables, es la condición antecedente; y al efecto provocado por dicha causa se le denomina variable dependiente (consecuencia). (Toro Jaramillo & Parra Ramírez, 2010).



*Figura 3. Causa (Variable Independiente) y Efecto (Variable Dependiente).*

Fase de un experimento.

Un experimento es una situación simulada, en la que el investigador manipula conscientemente las condiciones de una o de diversas situaciones precedentes (Variable independiente) para comprobar los efectos que causa dicha variable en otra situación

consiguiente (Variable dependiente). Esta situación se da en varias etapas, que pueden resumirse de la siguiente forma:

- 1) Planteamiento de un problema de conocimiento: la elección del problema está ligada a los intereses del investigador, estos pueden ser: comprobar una teoría, descubrir o generar conocimientos, mejorar algún proceso ya existente. Dichos intereses deben estar relacionados con la variable dependiente. Las preguntas planteadas deben poder resolverse con la aplicación de un proceso experimental.
- 2) Formulación de hipótesis: la hipótesis es una respuesta conjetural al problema, dicho de otro modo, es la anticipación de un resultado posible de la investigación experimental. La hipótesis relaciona dos o más variables, éstas deben ser planteadas en términos empíricos, es decir, que se puedan observar o medir.
- 3) Realización de un diseño adecuado a la hipótesis: el diseño refleja el plan o esquema de trabajo del investigador, es su organización formal. El diseño incluye diversos subprocesos, describe con detalle qué se debe hacer y cómo realizarlo.

4) Recogida y análisis de datos: para recoger los datos de los experimentos el investigador tiene a su alcance diferentes instrumentos o técnicas (test, cuestionarios, escalas, sistemas de observación, etc.). Cada uno posee ventajas e inconvenientes y tiene diferentes usos, por ello, a la hora de elegir un instrumento, el investigador debe tener en cuenta su validez y fiabilidad. Una vez obtenidos los resultados se analizan siguiendo un plan que se tendrá que haber determinado con anterioridad. El análisis de datos consiste en organizar y tratar la información para que se pueda describir, analizar e interpretar.

5) Elaboración de conclusiones: se incluyen aspectos como hasta qué punto y con qué limitaciones queda confirmada la hipótesis experimental, el poder de generalización de los datos obtenidos, las coincidencias o desacuerdos con otras investigaciones, implicaciones para la práctica y sugerencias para posteriores investigaciones. (Toro Jaramillo & Parra Ramírez, 2010).

**Variables independientes:** es la característica o propiedades que suponemos es la causa del fenómeno estudiado y es este término el que vamos a emplear para referirnos a la variable que el investigador va a manipular.

**Variables dependientes:** es la variable que recopila las modificaciones que tienen lugar al manipular la variable independiente. Será aquello que debemos observar, lo que

tendremos que medir y aquello que nos facilitará la obtención de información para tener en cuenta.

Limitaciones de la investigación del enfoque experimental.

Debido a que la realidad es cambiante y compleja, cuando se estudia esta realidad se pueden encontrar limitaciones y obstáculos propios.

Limitaciones de tipo ambiental.

Son limitaciones propias del ambiente como, por ejemplo, las características propias de los sujetos o diferentes ambientes y que puedan afectar el resultado. Estas limitaciones ambientales cambian según sea los contextos.

Limitaciones derivadas del objeto.

El problema que se plantea es si la investigación ha de tratar tanto los hechos observables y cuantificables como aquellos que no se pueden observar.



## **ESTADO DEL ARTE.**

Teniendo en cuenta las aplicaciones de navegación robótica basada en patrones estáticos utilizando el sistema embebido CMUcam3 de Jurado-Gutiérrez, Víctor M.; Botero-Valencia, Juan S.; Serna-Garcés, Sergio I.; Madrigal-González, Carlos A, en el 2013, donde se refieren al uso de la visión artificial para la navegación de robots en entornos controlados, para ser concretos seguir la línea vectorizada y reducir el espacio visible por medio de la transformada de Hough Lineal y la distancia Hausdorff para el reconocimiento de figuras y rutas, esta investigación arrojó como resultados que su efectividad es del 87.5% lo cual es una gran cifra, ya que el algoritmo que implementa la transformada de Hough consume gran parte de la capacidad de procesamiento del sistema embebido CMUcam3 y se puede saturar el sistema (Jurado-Gutiérrez, Botero-Valencia, Serna-Garcés, & Madrigal-González, 2013). Teniendo como referencia esta investigación en este caso se utilizarán un conjunto de sistemas embebidos que puedan reducir el margen de consumo del procesador, se utilizará la cámara Pixy 2 (CMUcam5) y una tarjeta Arduino Uno R3 para el procesamiento de imágenes y navegación.

Según Angelica Rendón en el artículo “Evaluación de estrategia de navegación autónoma basada en comportamiento reactivo para plataformas robóticas móviles” del 2015 (Rendón C., 2015), se determina que la navegación robótica se enfoca en la ubicación espacial de un robot con respecto al entorno que lo rodea, además que normalmente se usan dos tipos de navegación, navegación autónoma y navegación preprogramada. Todo evento de navegación robótica requiere de estas dos, ya que la

preprogramada se utiliza para otorgar la primera movilidad al robot y la navegación autónoma le permite visualizar los cambios en su entorno, estos cambios se encuentran gracias a la utilización de sensores (sensor ultrasónico, sensor de tope, sensor infrarrojo).

Este artículo hace uso del algoritmo I-Bug. Sus resultados fueron congruentes, dando como consenso en la práctica que un robot tiene un 100% de efectividad para encontrar su objetivo y realizarlo en el menor tiempo. De este artículo se tomará la idea de usar sensores ultrasónicos y sensores infrarrojos, los sensores ultrasónicos otorgan una distancia de cobertura superior a los 4 metros y los sensores infrarrojos me permiten tener claridad a distancias cortas 15 centímetros o menos.

En el artículo “Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar”, una revisión de Arley Orozco y Gonzalo Ramírez afirman que en Colombia la agricultura de precisión es una tecnología incentivada por el Ministerio de las TIC (Tecnologías de la información y las Comunicaciones), ya que las TICs son importantes al momento de diseñar un sistema basado en agricultura de precisión (Orozco & Ramirez, 2016). Del aporte de estos autores se puede rescatar la importancia de crear un sistema simbiótico, adaptable y de fácil acceso e interpretación para los agricultores colombianos.

Li Jeng-Han, Ho Yi-Shing y Huang Jia-Jie en su artículo “Line Tracking with Pixy Cameras on a Wheeled Robot Prototype” publicado en la página del Institute of

Electrical and Electronics Engineers (IEEE) en agosto del 2018, hacen énfasis en la utilización de la cámara Pixy para la navegación de robots seguidores de línea y reconocimiento de objetos, al reconocer la línea se relacionan movimientos al robot (hacia adelante, atrás, derecha o izquierda) y los objetos pueden cambiar esta directriz (Jeng-Han, Yi-Shing, & Jia-Jie, 2018). Es importante resaltar el enfoque práctico y sus usos, ya que teniendo como referencia este artículo se puede extrapolar el uso del reconocimiento de objetos para las bases del diagnóstico que debe hacer un robot en un entorno dinámico.

También se puede ver el avance de la visión artificial en el artículo de Pérez Miguel, Cavanzo Andres y Villavisán Fabian de título “Sistema embebido de detección de movimiento mediante visión artificial”, donde se utiliza una Raspberry Pi 3, RaspiCam junto con el sistema operativo GNU/Linux con el programa Python para el uso de la técnica de sustracción de fondos, Python usa como librería de procesamiento de video OpenCV y la librería de los cálculos es Matplotlib, dando resultados estables y un tiempo de reacción de 85 ms (Perez, Cavanzo, & Villavisán, 2018). De esta investigación se tomará la opción de usar un sistema embebido más robusto como lo son la Pixy Cam 2 y Arduino.

## EXPERIMENTACIÓN

El semillero Renovatio es un espacio de investigación al cual el autor de este trabajo pertenece desde el año 2017, este semillero fue conformado en el CEAD de Acacias, de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD en el año 2016, en este semillero de investigación se desarrollan proyectos relacionados con la robótica, energías renovables e internet de las cosas. Uno de los proyectos gestados en el semillero es la agricultura de precisión, en este proyecto se enfoca en el desarrollo de un dron terrestre que desempeñe las mediciones de las variables de un cultivo tales como humedad relativa, temperatura, pH del suelo.

Para la programación de las diferentes placas de Arduino se utilizará el Arduino IDE, el cual presenta un entorno sencillo e intuitivo para realizar el código requerido, además cuenta con palabras reservadas verificables en <https://www.arduino.cc/reference/en/> estas permitirán un mayor desempeño.

The image shows a screenshot of the Arduino IDE interface. The window title is "Pixy\_V\_0\_1 Arduino 1.8.9 (Windows Store 1.8.21.0)". The menu bar includes "Archivo", "Editar", "Programa", "Herramientas", and "Ayuda". The toolbar contains icons for file operations and a Pixy2 sensor icon. The code editor shows the following code:

```
1 #include <Pixy2.h>
2 |
3 Pixy2 pixy;
4
5 void setup()
6 {
7   Serial.begin(115200);
8   Serial.print("Comenzando...\n");
9
10  pixy.init();
11 }
12
13 .....
```

Figura 4. Entorno del Arduino IDE.

El proyecto de agricultura de precisión tiene un enfoque amplio y se tomó la decisión de dividir este proyecto en etapas específicas, las etapas resultantes se dividieron en: la primera etapa el desarrollo de una estación meteorológica; la segunda etapa es la navegación autónoma de un dron terrestre; vale la pena resaltar que para este trabajo se basó en la segunda etapa.

### *Navegación por GPS.*

El GY-NEO6MV2 módulo GPS NEO-6M APM2 NEO6MV2 para Arduino con EEPROM MWC de la empresa suiza UBlox es una excelente alternativa de precisión y costo beneficio. Es de un tamaño reducido por lo que es fácilmente portable en los proyectos. Se comunica a través de puerto serial UART. Esta presentación viene en modo modular para que se pueda usar en cualquier plataforma como Arduino, RaspberryPi, pcDuino o con un portátil. Mide parámetros como latitud, longitud, velocidad y altitud. (Ublox, 2011, 5-7p).



*Figura 5. Módulo GPS NEO-6M APM2 NEO6MV2 para Arduino.*

**Características:**

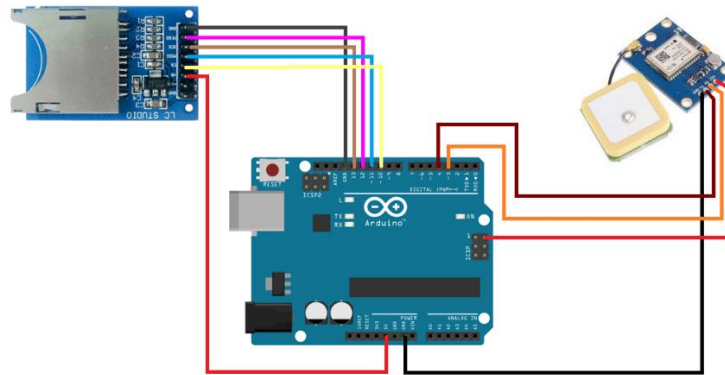
- Ultra sensibilidad: -165dBm
- 22 tracking/66 acquisition-channel receiver
- Frecuencia de actualización 5Hz velocidad de desplazamiento máxima: 500m/seg
- Protocolo NMEA (a 9600bps)
- 01 puerto serial
- Antena incorporada de 18.2 x 18.2 x 4.0 mm

Tabla 1.

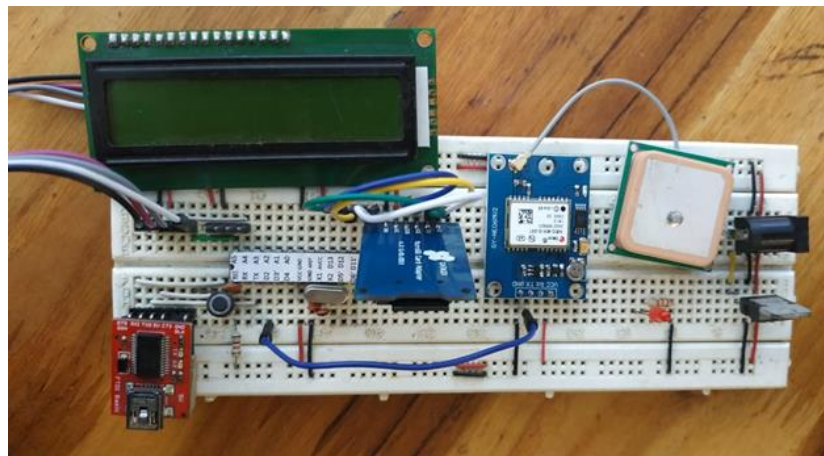
*Desempeño según el fabricante del Módulo GPS NEO-6M APM2 NEO6MV2 para Arduino.*

<b>Sensibilidad</b>	TRACKING	165DBM
	Adquisición	148dBm
<b>Precisión</b>	Posición	$\pm < 3\text{mts}$ 3D RMS sin SA
	Velocidad	0,1 m/s sin SA
	Timing (PPS)	60 ns RMS
<b>Tiempo de lectura</b>	Cold Start	36s
	Warm Start	33s
	Hot Start	1s
	Re-Adquisición	<1s
<b>Frecuencia de actualización de datos de navegación</b>	1Hz	
<b>Límites de operación</b>	Altitud	Max 18000 m
	Velocidad	Max 515 m/s
	Aceleración	Menor a 4g
<b>Fuente: Ublox 2011</b>		

Desde abril a julio del 2017 se desarrolló un código de prueba para el módulo GPS GY-NEO6MV2 conectado a una Arduino Uno y una memoria SD para poder tomar los datos y con estos trazar la ruta recorrida. La ruta seleccionada fue Villavicencio-Acacias realizando recorridos de ida y vuelta, también se hicieron recorridos más cortos en las instalaciones del CEAD de Acacias de la UNAD.



*Figura 6. Simulación del montaje del módulo GPS en una Arduino uno*



*Figura 7. Montaje del módulo GPS con un Arduino Uno.*



Durante estos recorridos el semillero identificó que las rutas trazadas con la aplicación TinyGPSPlus y Google Maps tenían un desfase de más o menos 6 metros con respecto a la ruta original (llegando a ser en su máxima extensión de 12 metros). Posteriormente, dentro de las instalaciones de la universidad se realizaron diferentes recorridos con distintas condiciones atmosféricas (lluvia, cielo despejado y cielo nublado) con la intención de monitorear la estabilidad de la conectividad de los satélites con el módulo GPS GY-NEO6MV2 y se obtuvo resultados con el mismo desfase de más o menos 6 metros. A estos 6 metros de diferencia con la ruta original se le puede agregar las condiciones geográficas y la ubicación del departamento del Meta no permite una conexión continua con los satélites.

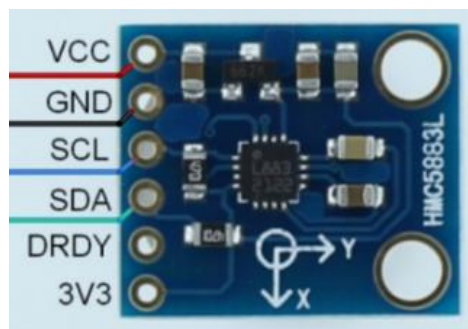
Debido a los resultados mencionados anteriormente, el semillero determinó que la navegación con el módulo GPS GY-NEO6MV2 fue imprecisa debido a su límite máximo de 12 metros de desviación, por lo cual no podría llegar a utilizarse en aplicaciones de navegación que requieran precisión. Asimismo, se identificó que para obtener un alto nivel de precisión se requiere la utilización de módulos que se conecten con una mayor cantidad de satélites, pero aun así, es necesario hacer una mayor cantidad de experimentos que determinen la cantidad mínima de satélites para desempeñar una navegación con altos márgenes de precisión.



*Figura 8. La línea roja representa la ruta realizada en el CEAD de Acacias. Las líneas verdes es la ruta demarcada por el GPS.*

### ***Navegación por brújula electrónica.***

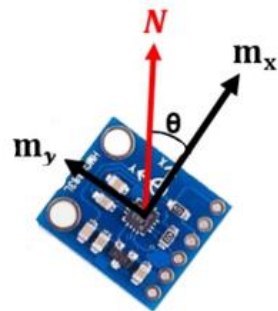
Se realizó una serie de experimentos desde el 26 de agosto al 9 de septiembre de 2017 en el campus del CEAD Acacias de la UNAD con un prototipo de dron terrestre que consta de una batería, un puente H L298N, una Arduino Nano, dos motores de 5 voltios y una brújula digital HMC5883L.



*Figura 9. Conexiones del HMC5883L.*

El HMC5883L es un magnetómetro de 3 ejes, con este se puede leer las componentes del campo magnético presente y de este modo conocer la dirección del campo magnético terrestre, con esta información se puede calcular la orientación con respecto al norte magnético de la tierra. El HMC5883L trabaja a 3.3 voltios, este módulo cuenta con un regulador de voltaje que le permite ser alimentado con 5 voltios. Cuenta con dos modos de funcionamiento, un modo Continuous-Measurement (continuo), en donde el magnetómetro está constantemente realizando mediciones y actualizando los registros, correspondientes a las lecturas y el modo Single-Measurement, aquí el magnetómetro solo realiza una medida cuando el Arduino le solicite. (Honeywell, 2010).

Al utilizar una brújula digital necesitamos calcular el ángulo de la orientación con respecto al norte magnético, para esto se usa la siguiente fórmula:



$$\theta = \text{atan}\left(\frac{m_y}{m_x}\right)$$

Figura 10. Ejes magnéticos de la brújula electrónica. Fórmula para calcular el ángulo de orientación

Luego de obtener el norte magnético con la fórmula anterior, se debe tener en cuenta la declinación magnética que es la diferencia entre el norte geográfico y el norte magnético. El valor de la declinación magnética depende de la ubicación del dispositivo

y se puede obtener en la siguiente página: <http://www.magnetic-declination.com/>, para el caso de Acacias-Meta-Colombia, el CEAD de Acacias de la UNAD es de  $-7^{\circ}37'$ . Si no se tiene claridad de la declinación magnética la navegación no sería precisa. (Magnetic Declination, 2018).

En la primera prueba del dron terrestre con brújula electrónica, se observó que el campo magnético generado por los equipos electrónicos del laboratorio interfería en la corrección de la ubicación del dron, en la primera prueba se descubrió que el equipo no desarrolla de forma automática la diferencia entre el norte geográfico y el norte magnético, por tanto, se modificó la programación teniendo en cuenta la declinación magnética.

Con las pruebas anteriores al dron terrestre se le realizaron modificaciones al código de Arduino con los cálculos del norte geográfico, norte magnético y agregando la declinación magnética, la nueva programación realiza una corrección de rumbo cuando se desvía más de 5 grados con respecto al norte geográfico. Esta corrección consiste en un giro hacia la dirección inmediatamente contraria a la desviación.

Esta configuración del dron terrestre, arrojó como resultados que al momento de corregir el rumbo para mantenerse en la dirección del norte real magnético, este es afectado por la composición del suelo donde este ubicado (concentración de minerales y metales), estos factores naturales combinados con los artificiales tales como cables de alta tensión enterrados, aljibes de cobre y los campos magnéticos creados por los motores instalados en el dron ocasionan errores al momento de corregir el rumbo.

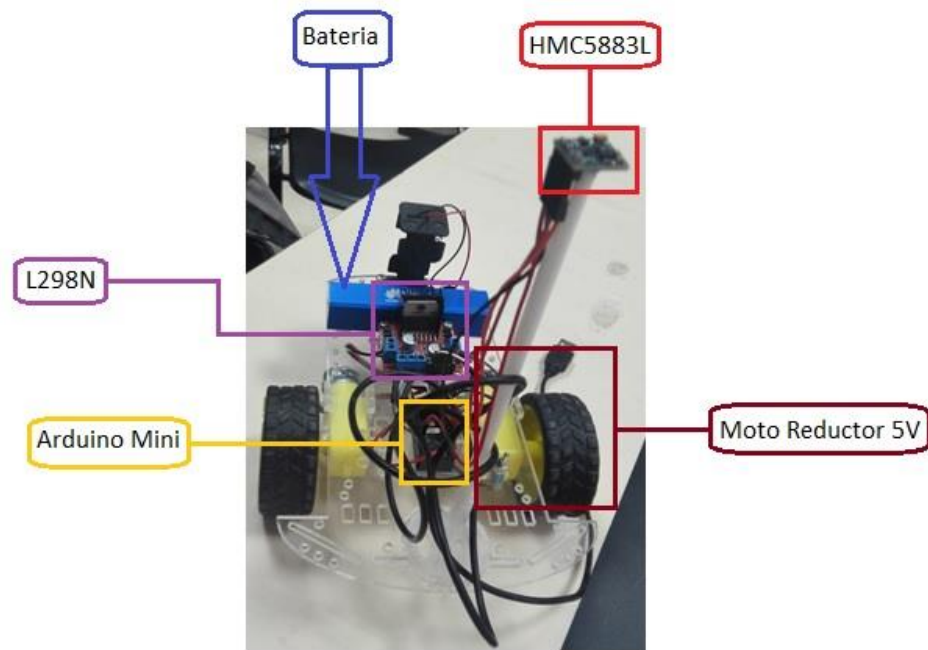


Figura 11. Prototipo de dron terrestre con brújula electrónica.

### ***Navegación por Sensores de Ultrasonido.***

Se realizó una serie de experimentos con sensores de ultrasonido desde el 14 de julio al 08 de septiembre de 2018, donde se probó diferentes configuraciones del dron terrestre para comprobar el funcionamiento de estos sensores en ambientes externos del laboratorio bajo ambientes dinámicos. El sensor de ultrasonido seleccionado para ser la base de los experimentos es HC-SR04.

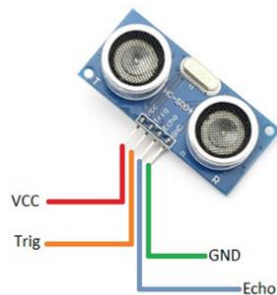


Figura 12. Conexiones del sensor HC-SR04.

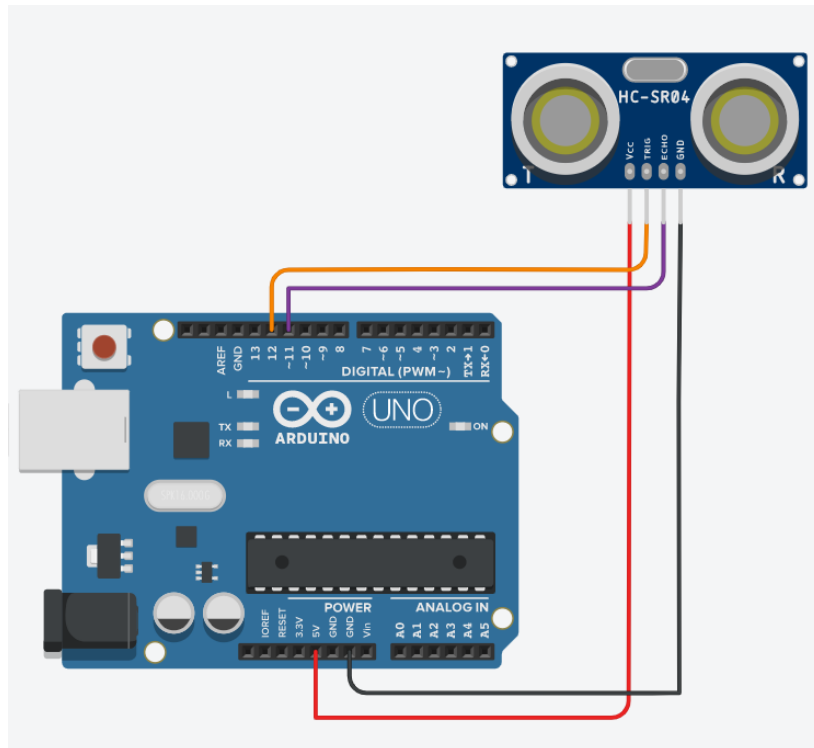


Figura 13. Conexión de una Arduino y un sensor HC-SR04

El sensor HC-SR04 posee dos transductores piezoeléctricos: un emisor y un receptor, además de los sistemas electrónicos necesarios para su operación. El funcionamiento del sensor es el siguiente: el pin disparador (Trigger) da la orden y el emisor emite 8 pulsos de ultrasonido (40KHz), las ondas viajan en el aire y rebotan al encontrar un objeto, el sonido de rebote es detectado por el receptor, luego el pin Echo cambia a Alto (5V) por un tiempo igual al que demoró la onda desde que fue emitida hasta que fue detectada, el tiempo del pulso Echo es medido por el microcontrolador y así se puede calcular la distancia al objeto. Debe indicarse que algunos materiales como la tela y lana no son favorables para la reflexión del sonido lo que afecta su medición. (Elec Freaks, 2019).

### Características:

- Consumo en reposo:  $< 2mA$
- Corriente de trabajo:  $15mA$
- Angulo efectivo:  $15^\circ$
- Rango:  $2cm - 400cm$
- Resolución:  $0,3 cm$
- Ancho de pulso de entrada del disparador:  $10\mu s$

El primero de los experimentos fue realizado el día 14 de julio de 2018 donde se ensambló un prototipo de dron terrestre con un servomotor y ubicando encima el sensor HC-SR04, esto le permitió realizar giros de 180 grados y regresar a su posición inicial para cubrir en su totalidad la parte frontal del dron. Esta información llegaba al Arduino y lo hacía corregir su rumbo. Al principio, para el movimiento del servomotor se utilizó una modulación PWM de 100% con la que no se detectaba ningún tipo de obstáculo, por ello se decidió utilizar una modulación del 60%.

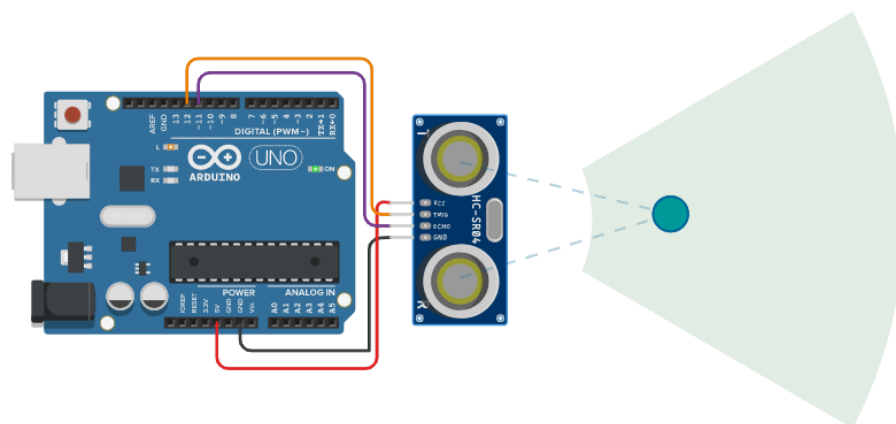


Figura 14. Funcionamiento del HC-SR04 junco con un Arduino.

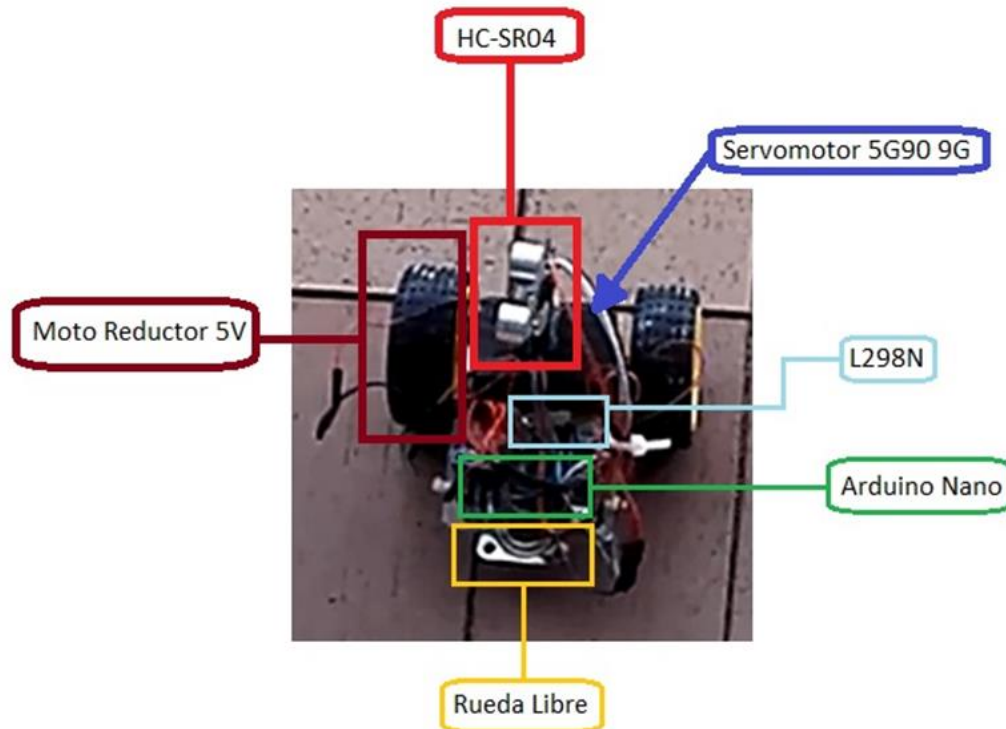


Figura 15. Prototipo de dron terrestre con un servomotor y encima el sensor HC-SR04.

Los resultados de este prototipo con respecto a la navegación presentaron una falla porque el sensor realizaba un recorrido de 180 grados y si los lugares por donde cruzaba se modificaban mientras el dron continuaba su movimiento dejaba demasiado tiempo sin volver a tomar un registro en ese lugar. Esto ocasionaba que no se detectara los obstáculos que aparecieran de forma inesperada. Por esta razón, se decidió hacer uso de tres sensores estáticos repartidos en el frente y en los costados laterales del dron. El 25 de agosto de 2018 se realizó un segundo experimento donde se reemplazó el único sensor móvil por tres sensores de ultrasonido HC-SR04 ubicados a los costados y al frente del dron como se puede apreciar en la figura 16:



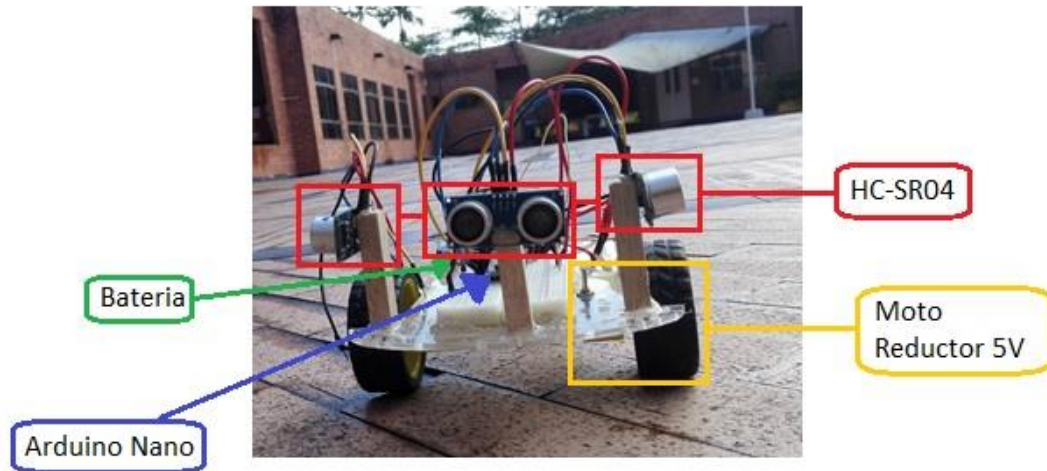


Figura 16. Prototipo de dron terrestre con tres sensores HC-SR04.

Al hacer funcionar este dron terrestre se llegó a dos hallazgos: el primero, fue que tuvo la estabilidad de percibir obstáculos a la distancia programada en las tres direcciones y respondió a los comandos establecidos. Esta navegación dinámica por ultrasonido presentó mejores resultados que la navegación por GPS, debido a que esta última no tiene presente los obstáculos que pueda tener el terreno. El segundo hallazgo tuvo que ver con el uso de protoboard y su impacto sobre circuitos que no admiten altos niveles de ruido, debido a la conexión intermitente que generan los pines y su contacto con la protoboard, esto provocó medidas de obstáculos inexistentes, además causó fallas en los sensores por picos elevados de voltaje, ocasionando daños irreparables a los sensores.

Debido a los hallazgos anteriores el 1 de septiembre de 2018 se tomó la decisión de cambiar la protoboard por una baquelita para evitar el ruido y los picos de voltaje, se

mantuvo la programación del sistema y se le añadieron dos motores para realizar pruebas en terrenos agrestes, como se muestra en la figura 17.

Con la nueva configuración el dron terrestre, detectó los obstáculos a la distancia programada y midió los parámetros establecidos para la navegación en terreno agreste; sin embargo, cuando el dron fue llevado sobre asfalto presentó errores en la lectura de obstáculos, detectando obstáculos inexistentes afectando directamente la navegación. Analizando las posibles razones por las que se presentó esta falla se observó que por la propiedad de la refracción del sonido, el cual es el efecto que se presenta por el cambio de medio de propagación, esto ocurre debido al aumento de temperatura en el asfalto, liberando vapor de agua y generando una diferencia de densidad en el aire, al ser el sonido una onda longitudinal el cambio de densidad afecta directamente a la onda de sonido emitida por el HC-SR04, distorsionando el funcionamiento del sensor.

Teniendo en cuenta esta situación se recomienda que en el momento de utilizar navegación por ultrasonido se tome en consideración la forma en que la temperatura y la humedad afectan el funcionamiento de los sensores. En consecuencia, se sugiere que los fabricantes de dichos sensores deben incluir en las especificaciones los rangos de temperatura y humedad en que sus productos operan adecuadamente.

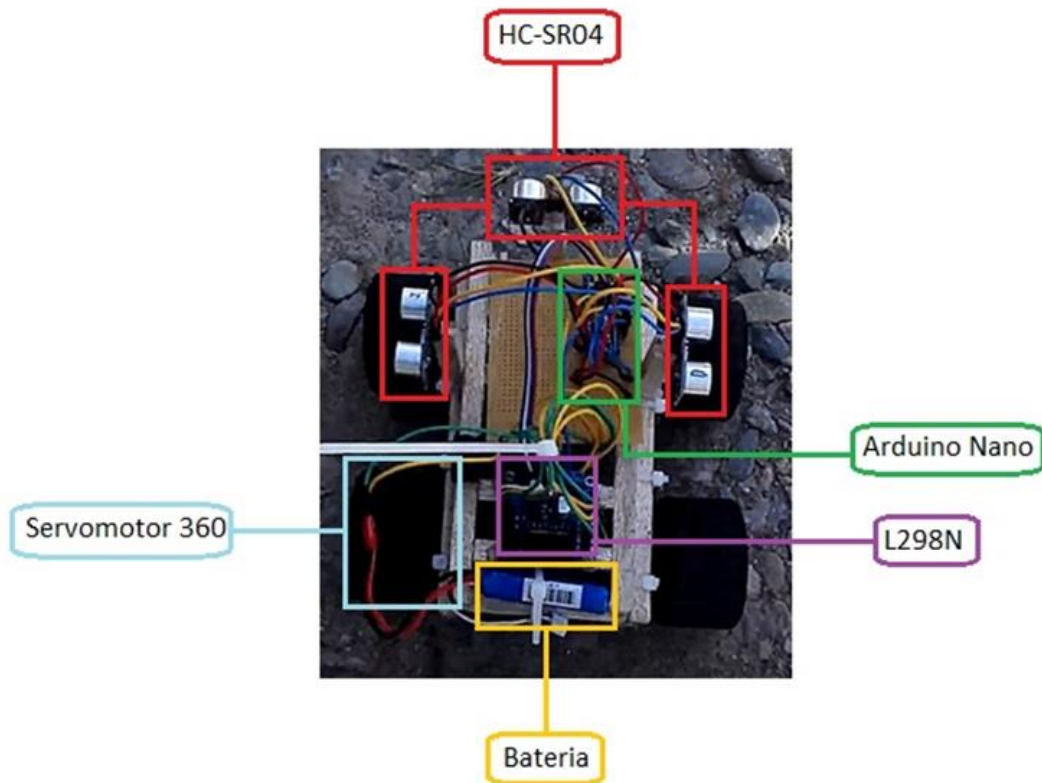


Figura 17. Prototipo de dron terrestre con tres sensores HC-SR04, montado en baquelita.

### *Navegación por Visión Artificial*

Entre septiembre y octubre de 2018 se llevó a cabo la construcción de un dron terrestre con un sistema de navegación por visión artificial. Este dron está conformado por una batería de 5 voltios, cuatro servomotores de 5 voltios controlados por un puente H (HL298N), una tarjeta Arduino Uno que es el procesador lógico y una PixyCam2, el cual es un sensor óptico que se comunica con la Arduino por medio del puerto serial.

El sensor PixyCam2 CMUcam5 de Charmed Labs, es un sensor pequeño, rápido, fácil de usar y de bajo costo. Capaz de registrar 60 fotogramas por segundo y realizar procesamiento de imágenes gracias a su procesador NXP LPC4330. Además, cuenta con un lente M12 estándar junto con un sensor de imagen Aptina MT9M114, resolución de 1296 x 976 píxeles con un campo de visión de 60 grados horizontales y 40 grados verticales. Compatible con los lenguajes de programación C/C++ y Python, así como con los sistemas embebidos de Arduino, BeagleBone y Raspberry Pi. (PIXY, 2018).

En 2018 la PixyCam2 fue la segunda versión que salió al mercado de la empresa de Charmed Labs, en Julio el semillero adquirió este sensor e inició la experimentación identificando que en comparación a la PixyCam1 tiene mayor velocidad de procesamiento, campo de visión y fotogramas por segundo. Tiene mejor ubicación de sus puertos micro USB, serial y cuenta con leds propios de 20 Lumens. Adicionalmente, gracias a su pequeño tamaño y contando con un procesador propio es ideal para usarlos en sistemas de navegación por visión artificial.

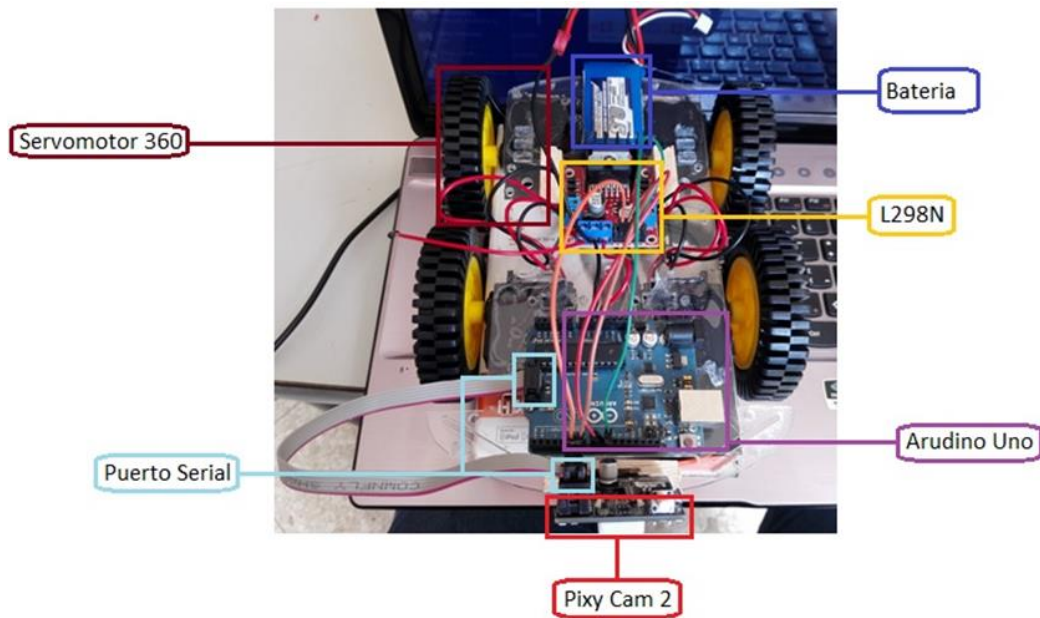


Figura 18. Prototipo de dron terrestre con visión artificial usando Pixy Cam 2 y Arduino Uno.

Para realizar la navegación por visión artificial se debe hacer antes el procesamiento de imágenes por medio de los procesadores de la PixyCam2 y la tarjeta Arduino. Dicho procesamiento es el conjunto de técnicas que se aplican a las imágenes digitales con el objetivo de mejorar la calidad o facilitar la búsqueda de información, este análisis se realiza por medio de unas mascarar o filtros que modifican digitalmente la imagen y con esto se puede recaudar la información necesaria. Estas mascarar funcionan como filtros pasa bajo, pasa alto y pasa banda, sus rangos son suministrados por el modelo cromático RGB dando la selección de colores, con estos colores se dibuja un contorno alrededor de los objetos identificando su forma.

El dron terrestre construido en el experimento hacia uso del procesamiento de imágenes para detectar una línea previamente marcada en el suelo, formando un vector entre dos puntos llamados cabeza y cola, estos puntos fueron situados en un plano

cartesiano, el cual fue programado y trazado virtualmente teniendo como referencia 648 x 488 pixeles que son los puntos medios de la capacidad visual del sensor para dividir el campo de visión en 4 partes iguales. Teniendo como referencia el plano cartesiano y la ubicación de la cabeza del vector, el dron siguió la línea de forma estable.

La comunicación con los servomotores del dron se realizó por medio de los puertos PWM del Arduino, otorgándoles una escala de 0 a 255 donde 0 equivale a un 0% y 255 equivale al 100% del ciclo útil. Por otra parte, se tuvo presente esta condición para establecer los rangos de corrección de rumbo del dron por medio de un controlador PID (Proporcional, Integrativo y Derivativo) programado en el código de la Arduino. Gracias a la cantidad de pixeles que ofrece el rango de visión del sensor este controlador permitió gran estabilidad en el momento de seguir la línea.

A través de los experimentos realizados se encontró que la navegación con visión artificial tiene varias ventajas, entre ellas:

- Capacidad de detectar colores.
- Movilización estable en rectas y curvas.
- Poco consumo de espacio en el procesador Arduino.

Sin embargo, se identificaron algunas limitaciones de los sistemas de navegación por visión artificial:

- El modelo cromático RGB tiene como inconveniente la luminosidad que recibe el objeto al momento de ser observado, cuando la PixyCam2 recibe más de 200 Lumens no capta el color deseado.
- Los objetos transparentes no son detectados.
- En condiciones de total oscuridad esta navegación no funciona.
- Variaciones en la humedad y la temperatura pueden afectar su rango de visión.
- Dependiendo del ángulo que tenga el sensor con respecto al ángulo del horizonte, la programación y parámetros cambian drásticamente. Por esta razón deben ser programados directamente en el dron en el que van a ser usados.
- Este sistema de navegación va a ser tan eficiente como las condiciones programadas. Por esta razón el ingeniero debe entrenar el sistema, realizando los filtros para los colores y las condiciones de luminosidad presentes durante el día, el ángulo de visión del sensor debe ser el mismo.





La PixyCam2 desarrolla el procesamiento de imágenes como lo podemos ver en la Figura 20. La imagen muestra como es el reconocimiento de vectores realizado por la PixyCam2 parametrizada, reconociendo un solo vector, este es ubicado en un plano cartesiano, este nos permite realizar la corrección de rumbo del dron terrestre.

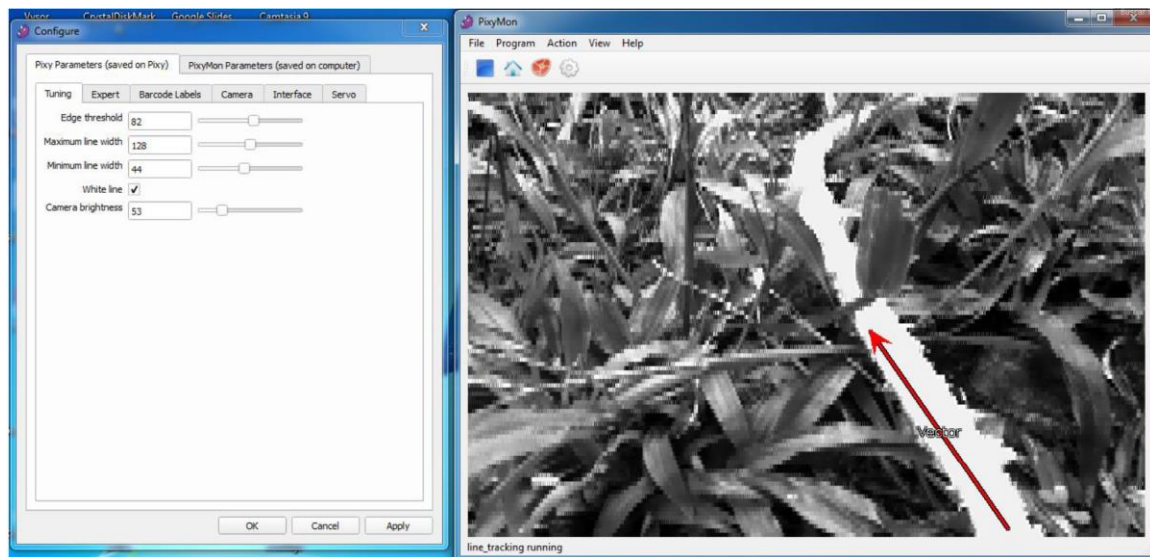
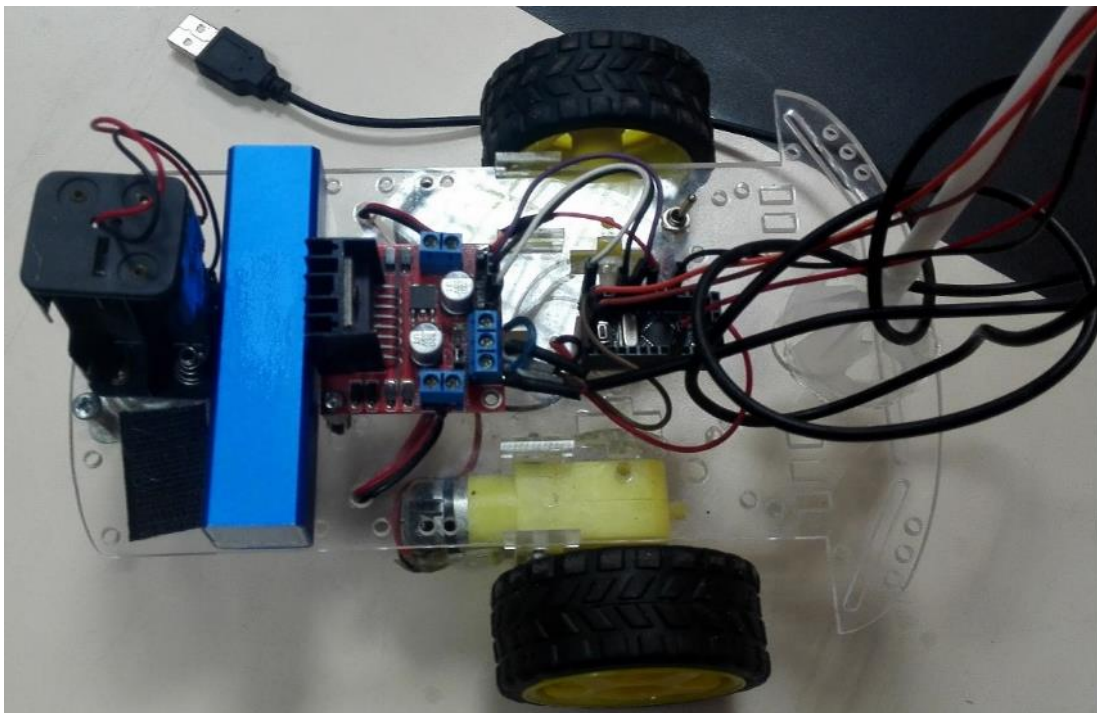


Figura 20. Visión de la pixycam2 parametrizada.

Se puede observar que la PixyCam2 es un excelente sensor al momento de seguir la línea guía, para seguir esta línea no requiere que el fondo sea total mente liso o de un mismo color, convirtiéndola en la mejor opción de bajo costo para realizar navegación por visión artificial en terreno agreste. La parametrización del sensor depende del contraste que tenga la superficie, por esta razón al cabo de unas horas se debe reconfigurar el parámetro de contraste para continuar realizando un correcto procesamiento de imágenes.

## RESULTADOS

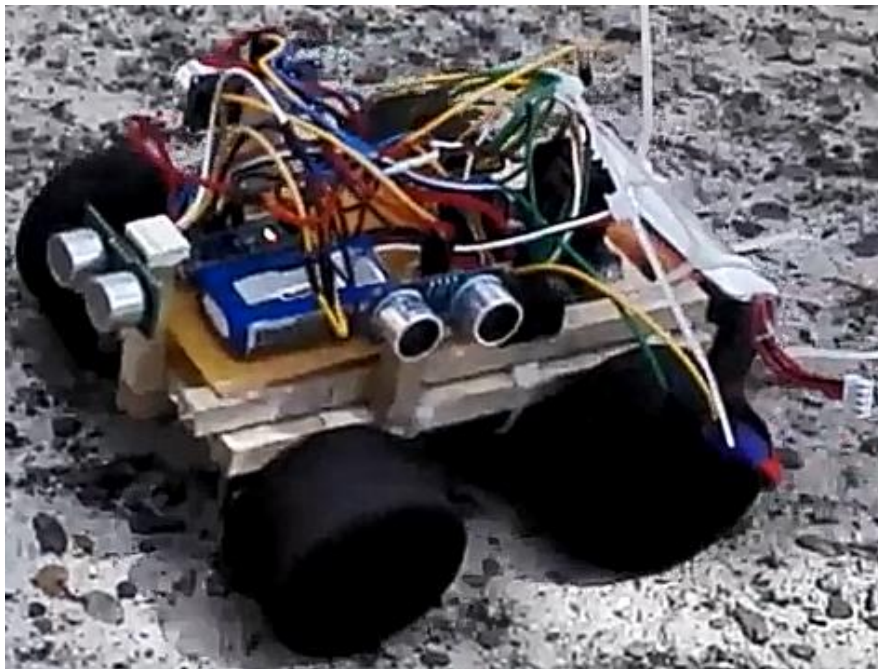
El proceso más básico para la navegación de un robot móvil se basa en el modelo cinemático del sistema de propulsión. Este sistema es el que permite al robot moverse dentro de un determinado entorno. El sistema más usual se basa en el uso de ruedas de tracción diferencial, debido a que es un sistema simple y adecuado para la navegación en entornos cotidianos sin mayores exigencias. Este tipo de direccionamiento viene dado por la diferencia de velocidades de las ruedas laterales; dos ruedas montadas en un único eje son propulsadas y controladas independientemente, proporcionando tracción y direccionamiento, adicionalmente, permite cambiar la orientación del robot sin movimientos de traslación.



*Figura 21. Primer diseño de plataforma móvil con dos motores 5 voltios, una rueda libre y batería*

Se puede observar en la figura 21, los componentes de la plataforma con tracción diferencial para el desarrollo de las pruebas con los sensores y sistemas de navegación seleccionados. En la plataforma se realizaron las pruebas de la brújula electrónica y los sensores de ultrasonido, otorgando resultados favorables en escenarios controlados, la constante en estos medios fue el terreno uniforme.

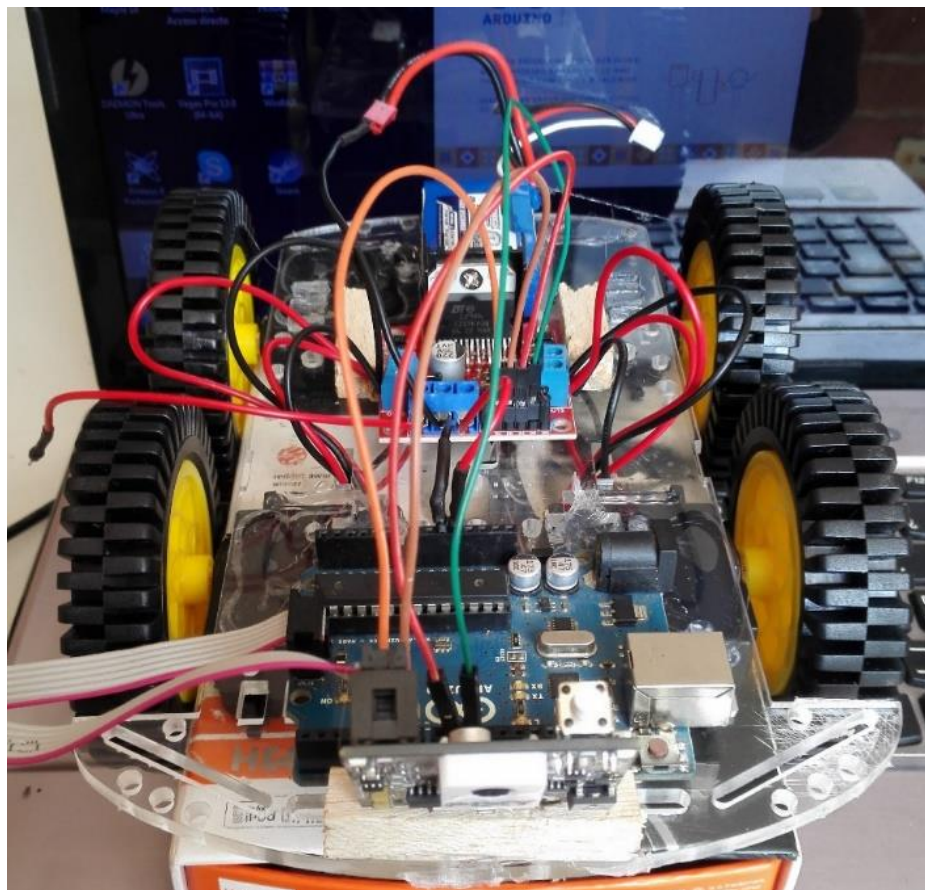
En el momento que la plataforma fue enviada a terrenos irregulares y no controlados se presentaron problemas por falta de potencia junto con la direccionalidad, por esta razón se decidió pasar de dos motores a cuatro motores manteniendo de esta forma la configuración de tracción diferencial y aumentando la potencia.



*Figura 22. Plataforma con cuatro motores*

En la figura 22 se puede observar una plataforma con cuatro motores que además de ofrecer fuerza al momento de la movilización en línea recta, también le otorga estabilidad y mayor maniobrabilidad. Durante la experimentación con esta plataforma se

identificaron dos fallas, la primera fue la forma de las ruedas que le dificultaba su movilización en terrenos agrestes, la segunda fue el poco espacio en el chasis para ubicar la tarjeta Arduino y los módulos como puente H, sensores ultrasónicos y la batería. Para corregir estas fallas se diseñó un base en acrílico, se cambiaron las llantas por unas más delgadas y con labrado para ser utilizadas en todo terreno, con este nuevo modelo se mejoró la distribución de los elementos, además, se cambiaron los sensores de ultrasonido por una Pixy Cam. La nueva plataforma se diseñó pensando en la estabilidad que le debe aportar al sistema de visión artificial, para ello los motores de 5 voltios fueron remplazados por servomotores de 360 grados.



*Figura 23. Plataforma con visión artificial*



La figura 23 es el prototipo final del dron terrestre con visión artificial para su navegación, esta plataforma cuenta con cuatro servomotores que giran 360 grados otorgándole estabilidad, fuerza y maniobrabilidad, lo cual es aprovechado por el sistema de visión artificial para poder realizar el análisis del entorno además cuenta con una Arduino Uno que junto con la Pixy Cam desempeñan el procesamiento lógico de las imágenes, con las cuales el equipo toma la decisión del rumbo a seguir, la potencia y direccionalidad de los motores es controlada por un puente H. El sistema de visión artificial implementado en el dron de la figura 21 está diseñado para seguir el rumbo impuesto por una cuerda o laso guía, este lazo puede estar sobre cualquier superficie sin importar el color o tipo.



*Figura 24. Plataforma de visión artificial siguiendo línea en asfalto.*



*Figura 25. Plataforma de visión artificial siguiendo línea en césped.*

## CONCLUSIONES

- ✚ La navegación por medio de una brújula electrónica se realiza calculando la diferencia entre el norte magnético y el norte real, permitiendo la movilización de drones de sur a norte. Sin embargo, presenta errores debido a los objetos que generan campos magnéticos, estos afectan la orientación hacia el norte.
- ✚ La navegación por GPS hace uso de rutas previamente programadas teniendo en cuenta la latitud y longitud por donde se quiere que transite el dron, en este tipo de navegación y su precisión depende de la cantidad de satélites con los que se pueda enlazar. Esta conexión se puede ver afectada por las condiciones climatológicas, la velocidad de movimiento y su ubicación geográfica.
- ✚ Los sensores de ultrasonido dividen el tiempo a la mitad del pulso emitido y recibido, conociendo la velocidad del sonido podemos calcular la distancia entre el objeto y el sensor. Este principio se utiliza para la navegación por sensores de ultrasonido otorgando excelentes resultados al esquivar objetos y su comportamiento en ambientes dinámicos; no obstante, las variaciones de temperatura y humedad pueden afectar la medición del sensor alterando el movimiento.

- ✚ Los métodos de procesamiento de imágenes aplicados a la navegación por visión artificial en condiciones controladas de luminosidad, ruta y obstáculos permitieron al dron movilizarse dentro de la ruta establecida con estabilidad y velocidad. A pesar de esto, si se varia alguna de las condiciones ya mencionadas la navegación se verá afectada.
  
- ✚ A través los experimentos se ha podido conocer las principales características de los sistemas de navegación por brújula electrónica, GPS, ultrasonido y navegación por visión artificial. Además, gracias a los experimentos realizados se han identificado las fortalezas y limitaciones de cada uno de estos sistemas y a partir de esto se puede concluir que ningún sistema por si solo pueda navegar independiente, por esta razón se requiere unir dos o más sistemas para así poder suplir sus debilidades.
  
- ✚ Desarrollar montajes en protoboard para equipos móviles no es recomendable debido a la intermitencia de contacto que genera la vibración del movimiento. La baquelita es la mejor opción teniendo en cuenta que los componentes van fijos con soldadura, evitando la intermitencia de los contactos.
  
- ✚ Un sistema dinámico no solo cuenta con obstáculos, dentro de estos las condiciones atmosféricas se deben tener presentes al momento de diseñar un



sistema de navegación autónoma, factores como la humedad, intensidad solar, lluvia y viento, que afectan directamente las capacidades de los sensores.

- ✚ El prototipo final desarrolló con éxito el 80% de los recorridos en terreno agreste, este alto porcentaje de efectividad se debe a dos aspectos, el primero es la configuración física como los 4 servomotores con sus llantas de goma y la altura que estas le otorgan; el segundo es la parametrización del sensor.
- ✚ El 20% de las pruebas que resultan erróneas se debe a la varianza en el contraste que ocurre, este contraste se debe a la incidencia de luz sobre una superficie, es diferente la cantidad de luz solar en horas de la mañana a las presentada al mediodía donde la intensidad del sol es máxima, en estas condiciones el dron presenta errores y debe ser parametrizado constantemente.
- ✚ El cambio de una plataforma de dos motores y una rueda libre a una plataforma con cuatro servomotores le proporciono al dron una estabilidad y altura adecuada para su movilidad a través de terrenos irregulares, la estabilidad al momento de realizar giros por medio de una tracción diferencial le proporciona es ideal para realizar el procesamiento de imágenes.

## BIBLIOGRAFÍA

- AgroNegocios. (27 de Marzo de 2018). *EN EL SECTOR AGRÍCOLA SE PIERDEN 6 MILLONES DE TONELADAS DE ALIMENTOS AL AÑO*. Obtenido de *La meta que ha proyectado el Gobierno nacional a 2030 es reducir el desperdicio per cápita a 16,2 kilogramos*. Obtenido de <https://www.agronegocios.co/agricultura/en-el-sector-agricola-se-pierden-6-millones-de-toneladas-de-alimentos-al-ano-2706145>
- Antuniassi, U., Baio, F., & Sharp, T. (2015). *Agricultura de Precisão*. Recuperado el 04 de Octubre de 2018, de [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/1622\\_000fkl0f2ta02wyiv80sq98yqf7jpgf0.pdf](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/1622_000fkl0f2ta02wyiv80sq98yqf7jpgf0.pdf).
- Arriarán, S. (Septiembre de 2015). *Todo Sobre Sistemas Embebidos*. Obtenido de *Arquitectura, Programación y Diseño de Aplicaciones Prácticas con el PIC18F*. Obtenido de <https://bibliotecavirtual.unad.edu.co:2538/lib/unadsp/reader.action?docID=4850235&query=>
- ColombiaDigital. (06 de Mayo de 2013). *¿Cómo las TIC complementan la agricultura de precisión?* Obtenido de <https://colombiadigital.net/opinion/columnistas/artifice-innovacion/item/4866-como-las-tic-complementan-la-agricultura-de-precision.html>
- Corona, L. G., Abarca, G. S., & Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores: aplicaciones con Arduino*, Grupo Editorial Patria, 2014. ProQuest Ebook Central.

- Recuperado el 05 de Octubre de 2018. Obtenido de*  
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/unadsp/detail.action?docID=4569609>
- Dinero. (22 de Mayo de 2015). *Agricultura de precisión: del azadón al GPS*. Obtenido de  
<https://www.dinero.com/especiales-comerciales/articulo/agricultura-precision-del-azadon-gps/208779>
- Dinero Tecnología. (18 de Julio de 2018). *Colombia Incrementó en un 70% sus Conexiones a internet*. Obtenido de [www.dinero.com](http://www.dinero.com):  
<https://www.dinero.com/pais/articulo/balance-conexiones-a-internet-en-colombia-2010-2008/260104>
- Elec Freaks. (06 de Mayo de 2019). *HC-SR04*. Obtenido de Ultrasonic:  
[https://elecfreaks.com/estore/download/EF03085-HC-SR04\\_Ultrasonic\\_Module\\_User\\_Guide.pdf](https://elecfreaks.com/estore/download/EF03085-HC-SR04_Ultrasonic_Module_User_Guide.pdf)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (10 de Diciembre de 2019).  
*Alimentación: pasando de pérdidas a soluciones*. Obtenido de  
<http://www.fao.org/colombia/noticias/detail-events/en/c/1238132/>
- Hewitt, P. (2004). *Física Conceptual*. México DF: Person Educación .
- Honeywell. (Octubre de 2010). *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*. Obtenido de  
<http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/428790/HONEYWELL/HMC5883L.html>
- Jeng-Han, L., Yi-Shing, H., & Jia-Jie, H. (30 de Agosto de 2018). *Line Tracking with Pixy Cameras on a Wheeled Robot Prototype*. . Obtenido de  
<http://bibliotecavirtual.unad.edu.co:2162/openurl?sid=EBSCO:edsee&genre=bo>

- ok&issn=25758284&ISBN=9781538663011&volume=&issue=&date=&spage=1  
&pages=1-  
2&title=2018%20IEEE%20International%20Conference%20on%20Consumer%20  
0Electronics-Taiwan%20(ICCE-TW),%20Consum
- Jurado, V., Botero, J., & Serna, S. (Octubre de 2013). *Navegación Robótica Basada en Patrones Estáticos Utilizando el Sistema Embebido CMUcam3 Tecno Lógicas, octubre, 2013, pp. 617-629. Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellin, Colombia.* Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234341047>
- Magnetic Declination. (2018). *Find the magnetic declination at your location.* Obtenido de <http://www.magnetic-declination.com/>
- Orozco, O., & Ramirez, G. (2016). *Sistemas de información enfocados en tecnologías de agricultura de precisión y aplicables a la caña de azúcar, una revisión. Revista Ingenierías Universidad de Medellin, 15(28), 103–124.* . Obtenido de <http://bibliotecavirtual.unad.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=119305659&lang=es&site=eds-live>
- Perez, M., Cavanzo, A., & Villavisán, F. (Enero de 2018). *Sistema embebido de detección de movimiento mediante visión artificial. Visión electrónica, algo más que un estado sólido, vol. 12, n°1.* . Obtenido de <http://bibliotecavirtual.unad.edu.co:2139/eds/pdfviewer/pdfviewer?vid=0&sid=66a4bdb9-fbc5-4c62-ae77-cbb21bb84a0c%40sessionmgr104>
- PIXY. (05 de Abril de 2018). *Introduciendo Pixy 2.* Obtenido de <https://pixycam.com/>

- Rendón, C. (05 de Junio de 2015). *Evaluación de Estrategia de Navegación Autónoma Basada en Comportamiento Reactivo para Plataformas Rpbóticas Móviles.* .  
Obtenido de [ps://revistas.udistrital.edu.co](https://revistas.udistrital.edu.co):  
<https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:ncE4uQitvx4J:https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/tekhne/article/download/10663/11625+&cd=1&hl=es-419&ct=clnk&gl=co>
- Riveros, A., Salas, C., & Solaque, L. (03 de Diciembre de 2012). *Aproximación a la Navegación Autónoma de una Plataforma Móvil, Mediante Visión Estereoscópica Artificial.* Obtenido de <http://www.scielo.org.co>:  
<http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v22n2/v22n2a07.pdf>
- Rodríguez, Á., Figueredo, J., & Chica, J. (2019). Navegación de un robot móvil autónomo aplicado a la agricultura de precisión: Principios y aplicaciones de geolocalización en un cultivo de prueba. En P. S. M., *Desarrollo e innovación en Ingeniería* (Vol. Cuarta Edición, págs. 280-289). Medellín, Colombia: Instituto Antioqueño de Investigación. Obtenido de  
<https://drive.google.com/file/d/1DPVwmCQPOW5JjBD1-fHpbZAvue7dSVP7/view>
- SAC. (05 de Marzo de 2019). *TIC para el agro.* Obtenido de <https://sac.org.co/tic-para-el-agro/>
- Sanchez, A. (2016). *Raspberry Pi & Arduino, los artesanos del siglo XXI y el movimiento maker ACIS(1-89).* Bogota: ACIS.

- Sierra, J. (23 de Noviembre de 2017). *Uso TIC agrícola aún tiene ajustes en la cosecha*.  
Obtenido de <http://www.elcolombiano.com/negocios/uso-tic-agricola-aun-tiene-ajustes-en-la-cosecha-FX7752304>
- Toro, I., & Parra, R. (2010). *Fundamentos Epistemológicos de la Investigación y la Metodología de la Investigación Cualitativa/Cuantitativa*. Bogotá: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- U-blox. (2011). *NEO-6 U-blox 6 GPS Modules Data Sheet*. Obtenido de [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_%28GPS.G6-HW-09005%29.pdf)
- Univercidad Politécnica de Madrid. (2009). *Intruducción a la Visión Artificial*. Obtenido de [http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP\\_VisionArtificial/ApuntesVA/cap1IntroVA.pdf](http://www.elai.upm.es/webantigua/spain/Asignaturas/MIP_VisionArtificial/ApuntesVA/cap1IntroVA.pdf)
- Villada, O., Hincapié, O., & Henao, F. (2017). *Diseño, construcción y simulación de la automatización de una máquina selectora de tuercas según su tamaño*. *Scientia et Technica*, 22(2), 137-144. Recuperado el 05 de Octubre de 2018, de. Obtenido de <http://bibliotecavirtual.unad.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=129781863&lang=es&site=eds-live>
- Zitzewitz, P., & Neff, R. (1996). *Física 2 Principios y Problemas*. Sabtafé de Bogotá: McGraw Hill Interamericana S.A.