



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

"Diseño de un sistema de almacenamiento y visualización offline de rutas definidas por aeronaves a través de bitácoras de posicionamiento GPS como ayuda al análisis de misiones de vuelo"

Autores:

Andrés Alexander Haro Domínguez
Andrés Paúl Jácome Benavides

Director del Proyecto:

Ing. Enrique Vinicio Carrera Erazo, PhD



Agenda

1.- INTRODUCCIÓN

2.- MARCO TEÓRICO

3.- DESARROLLO

4.- PRUEBAS Y RESULTADOS

5.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

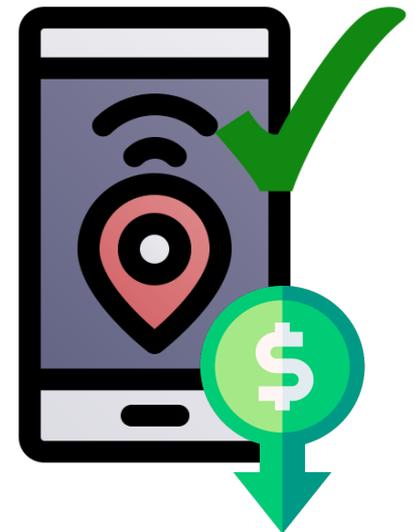
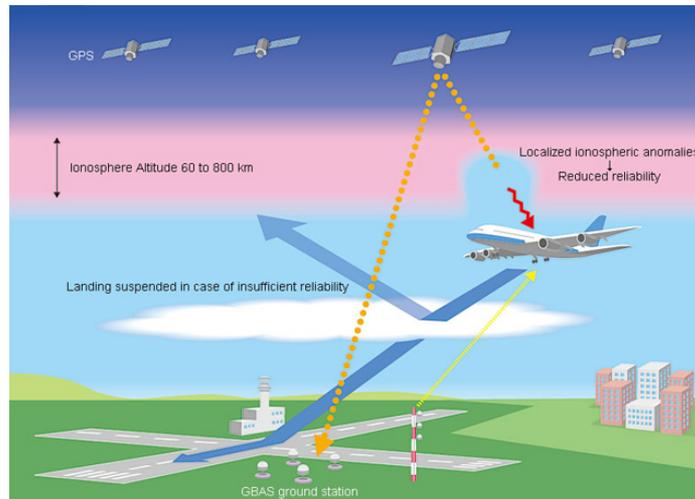
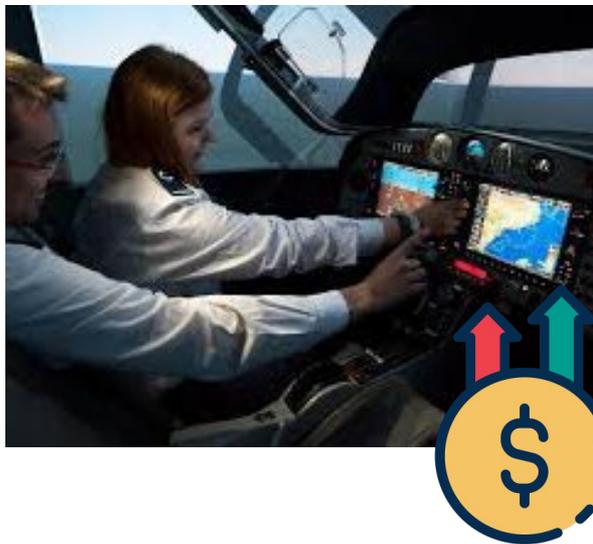
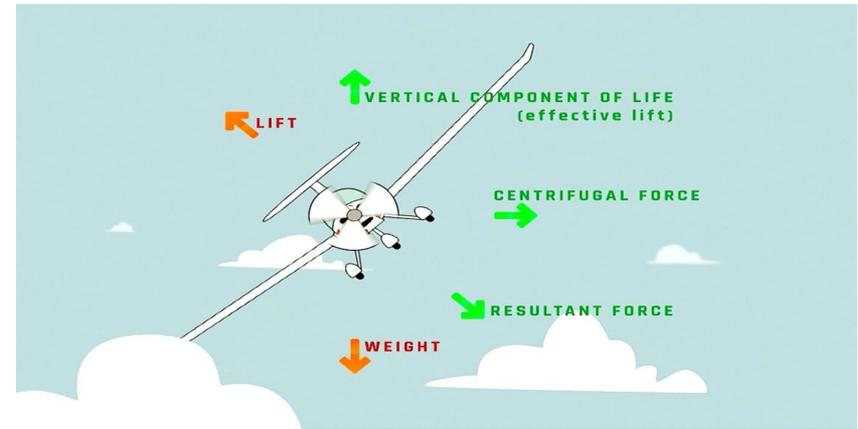




[f /AVOLDAERONAUTICA](#) [t /AVOLDAERONAUTIC](#) [p /AVOLDAERONAUTICA](#)



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Objetivo General

Diseñar un sistema de almacenamiento y visualización offline de rutas definidas por aeronaves a través de bitácoras de posicionamiento GPS como ayuda al análisis de misiones de vuelo.

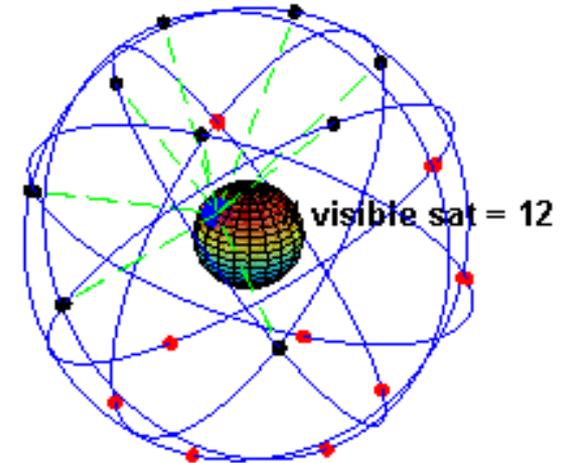
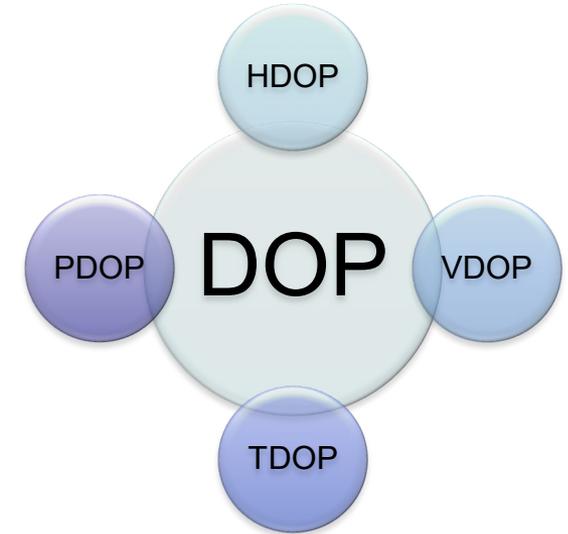
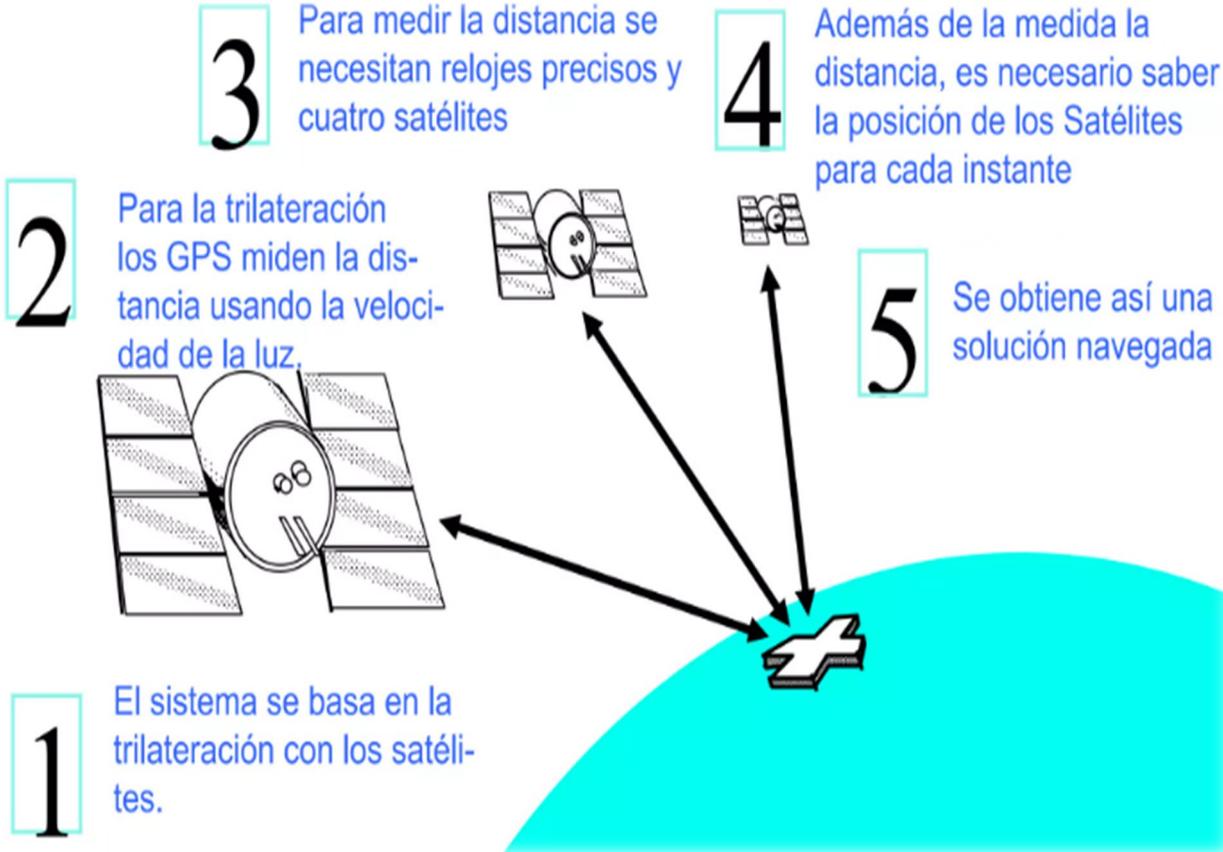
Objetivos Específicos

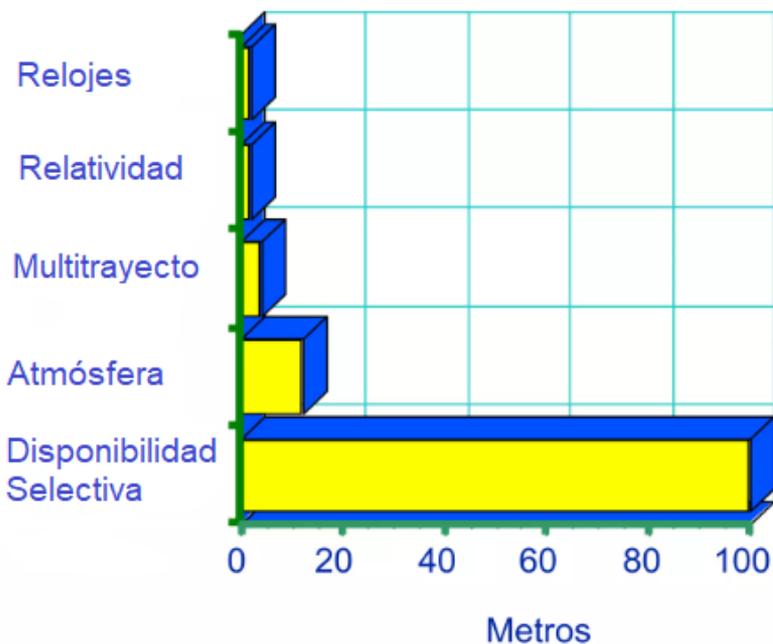
- Caracterizar un sistema de recolección, tratamiento y visualización de las coordenadas obtenidas por una aeronave.
- Identificar los requerimientos necesarios para el procesamiento de los datos obtenidos por GPS.
- Aplicar métodos de filtrado de Kalman y aprendizaje supervisado para el suavizado de la ruta trazada por una aeronave.
- Calcular los parámetros físicos como velocidad y aceleración promedio e instantánea como elementos de retroalimentación para el análisis de las misiones.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita observar el recorrido trazado y las variables calculadas.



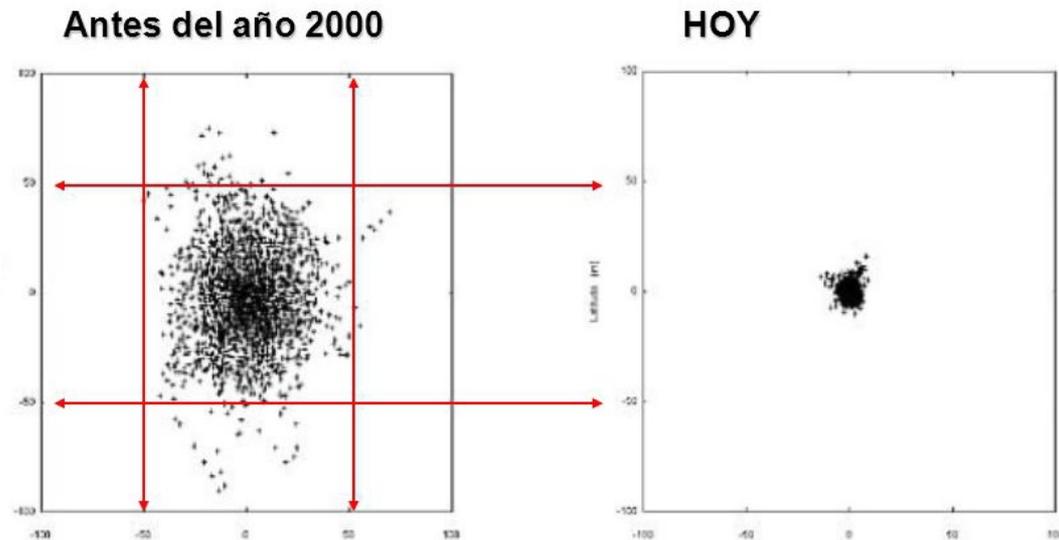
Triangulación GPS

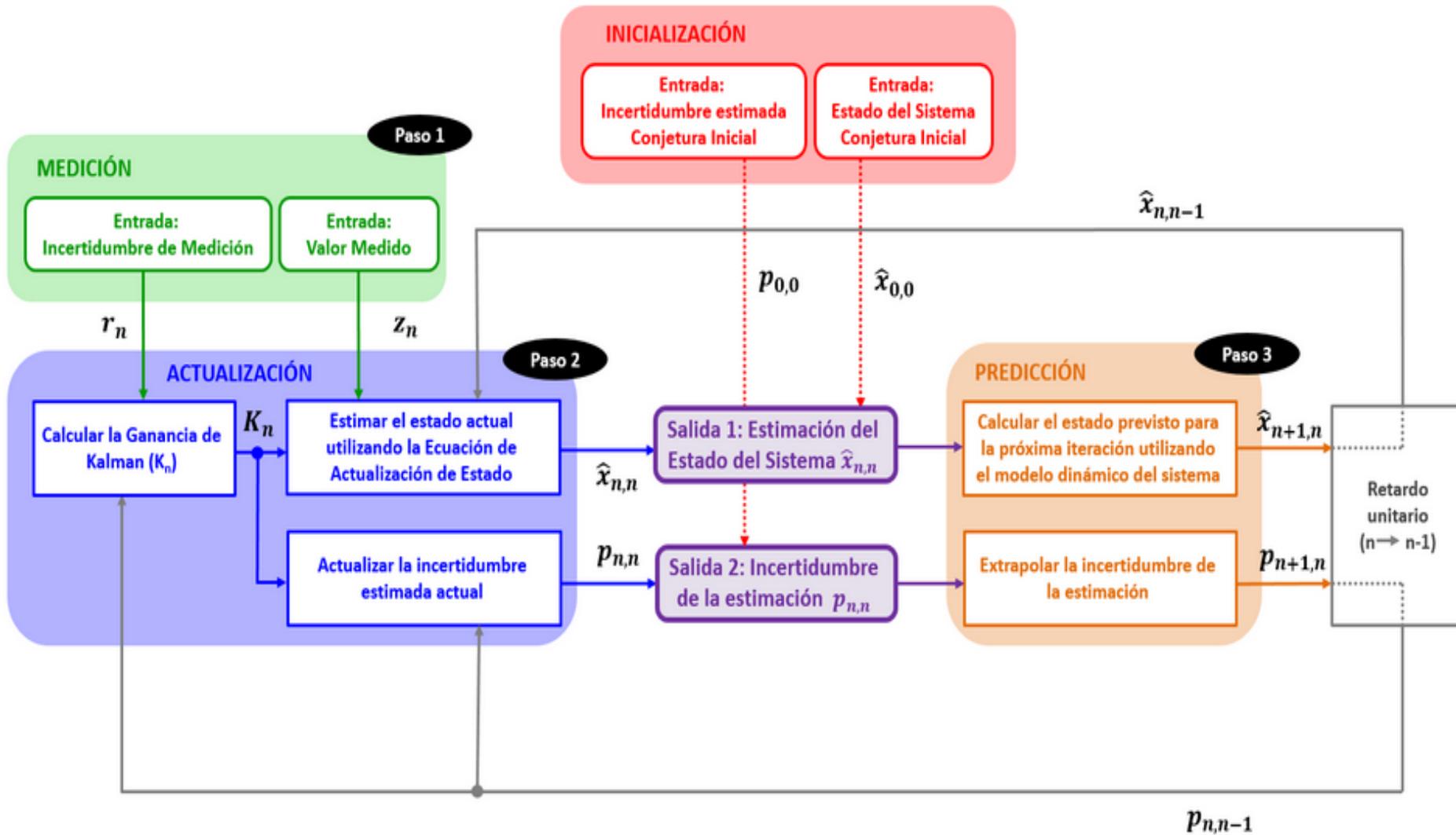
Evaluación de calidad de precisión





Disponibilidad Selectiva





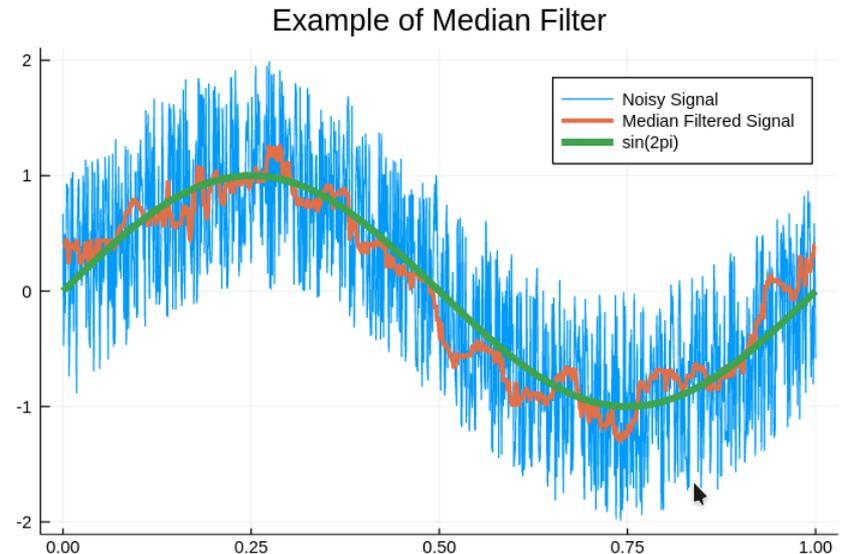
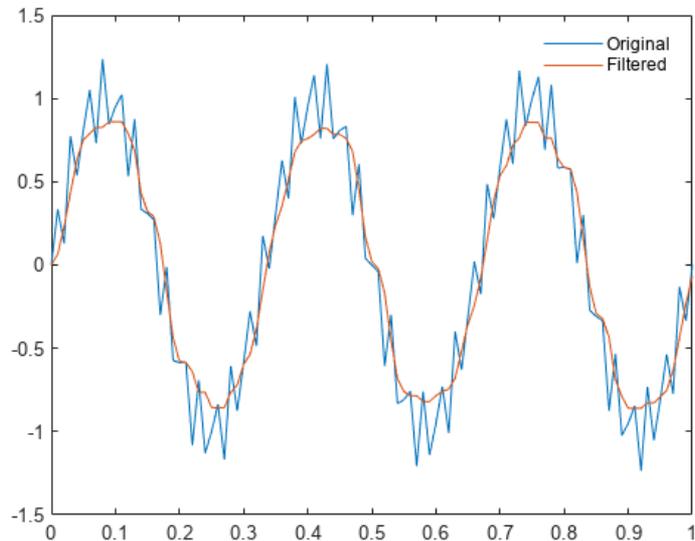
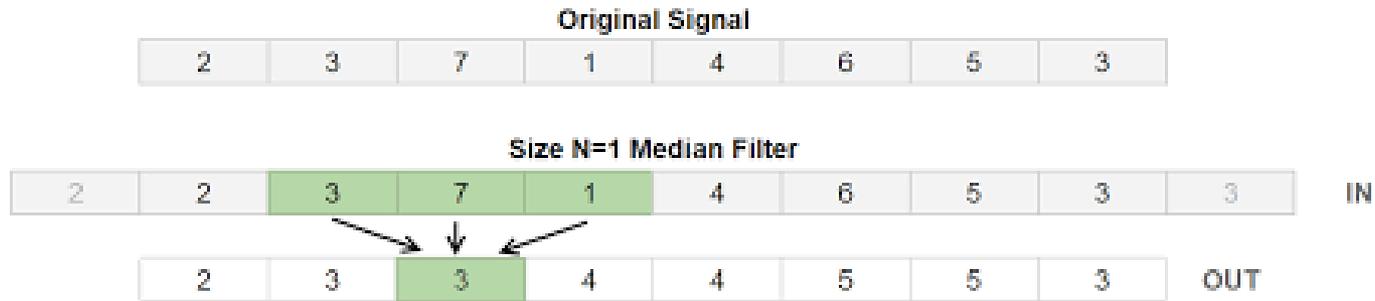
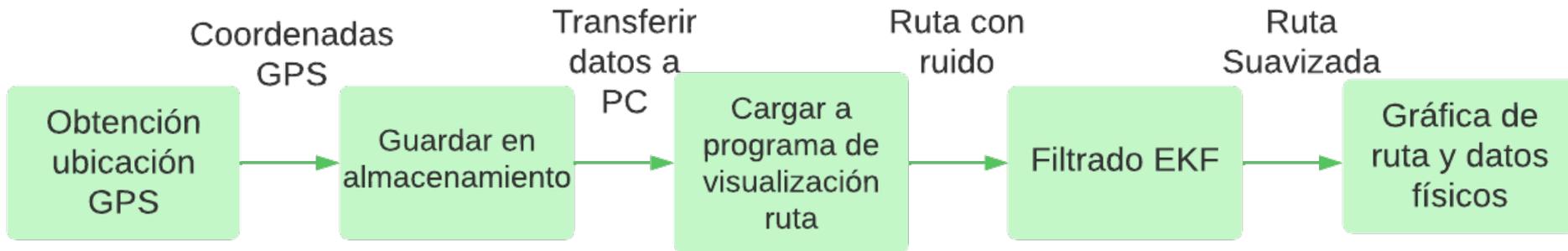


Diagrama General del Proyecto



Levantamiento Requerimientos

Hardware

- **Módulo GPS:** Ublox NEO-6M-001.
- **Almacenamiento:** Módulo y tarjeta microSD.
- **Visualización Estado:** Pantalla OLED SSD 1306.
- **Microcontrolador:** ESP32.
- **Complementarios:** Potenciómetro y botón.
- **Recurso de Apoyo:** PC - Intel Core i3 6th Gen.

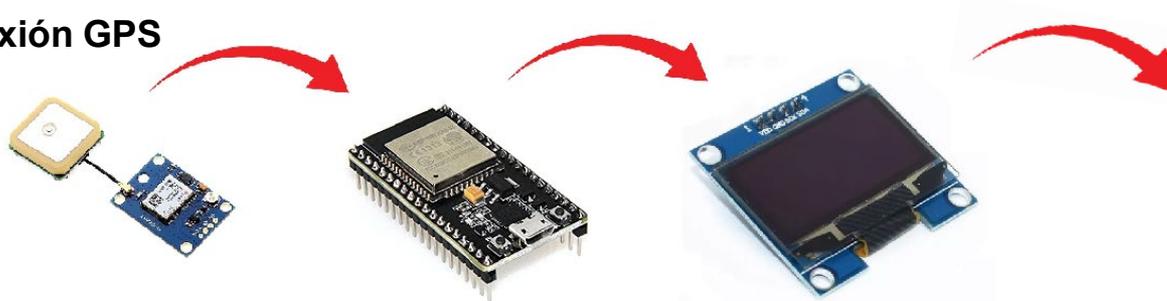
Software

- **Programación μ C:** Arduino IDE.
- **Desarrollo Plataforma:** MATLAB 22b.



Verificación de conexión GPS

Diagrama de funcionamiento



Estado de conexión GPS

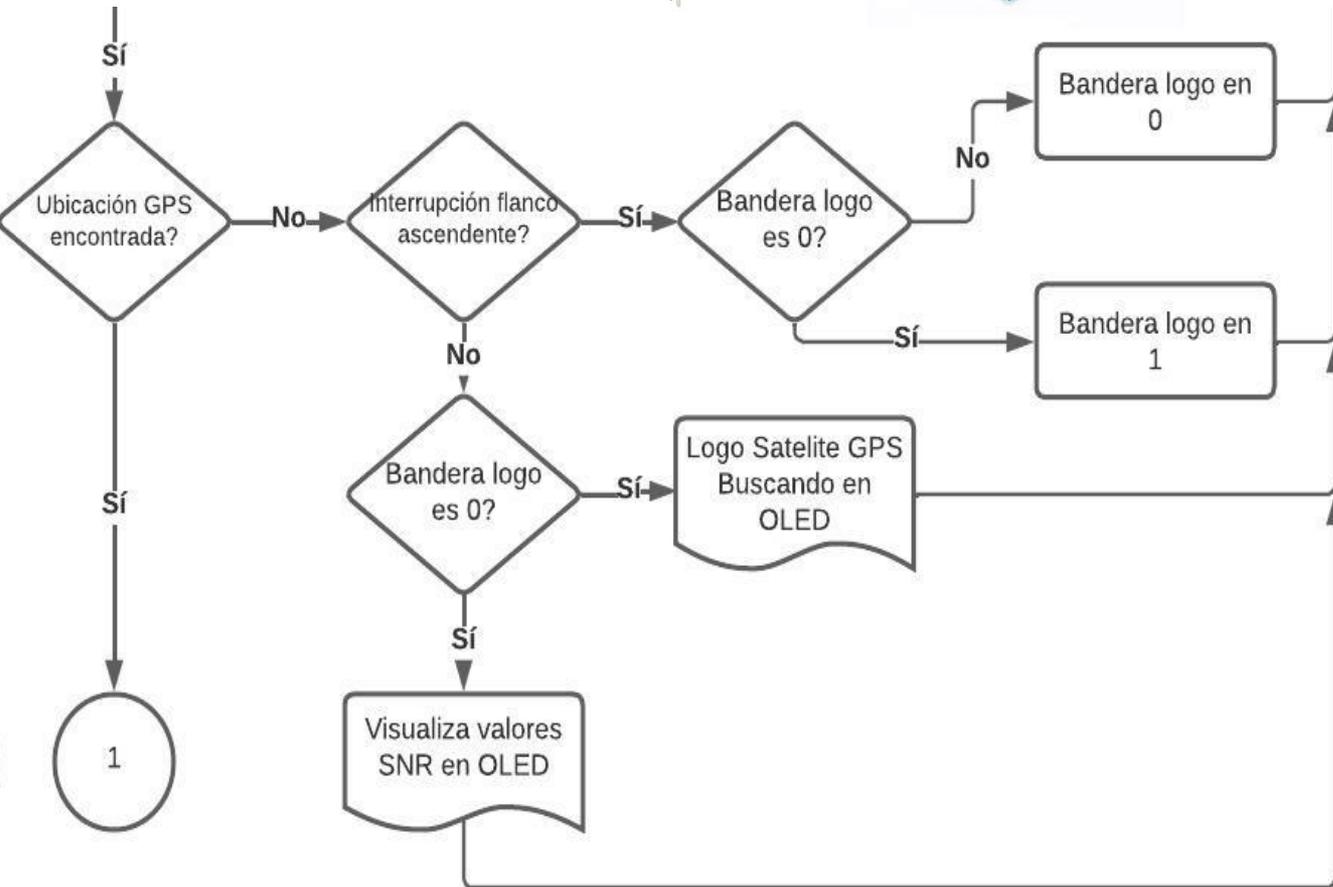
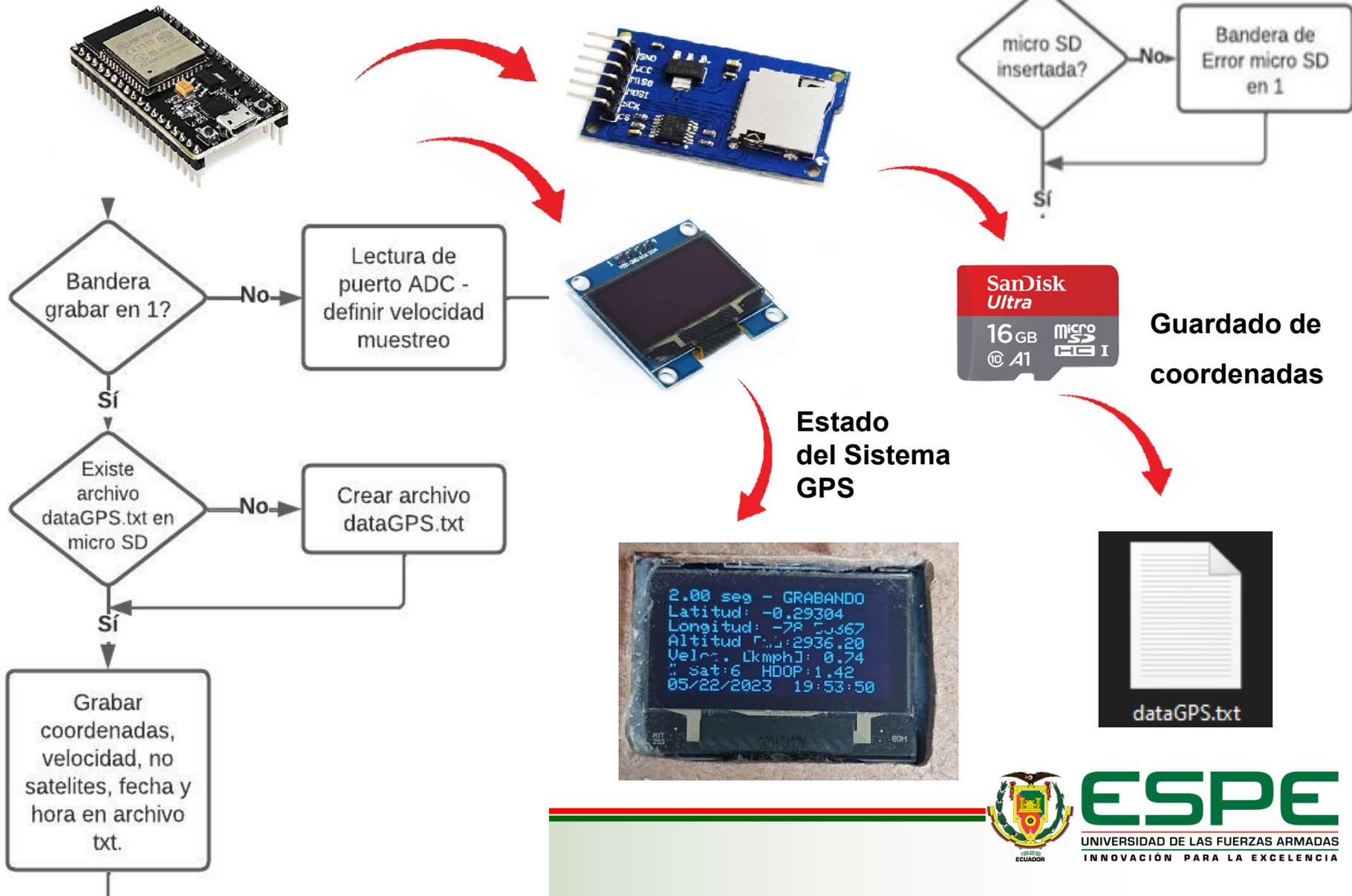


Diagrama de funcionamiento



Especificaciones Técnicas



Especificaciones Dispositivo Electrónico		
Ítem	Prueba	Valor
Batería	Input: 5VDC – 1.0 A	Carga: 4h45
	-	Descarga: 8h15
Peso	Balanza Electrónica	247 gr.
Tiempo de conexión GPS	Clima despejado	1min 35seg
	Clima Nublado	2min 50seg
	Clima Lluvioso	3min 13seg
Tamaño escritura .txt	1 segundo de muestreo	513.57 bps



Diseño Interfaz Gráfica

Selección de Archivo

Selección de Ruta

Ruta a analizar

Parámetros Físicos

Variación de Punto (Instantáneo)

Visualizador de Rutas

Cambio Punto - Trama

Variación Inicio Trama

Variación Fin Trama

Enfoque de Resultado

Bitacora Aeronave

BUSCAR ARCHIVO

ELECCION DE RUTAS

Rutas 0 Ruta 0

Cargar Limpiar

MODO Satelital

Ruta Cargada 1 CALCULAR

Punto Trama

RESULTADOS FISICOS

Latitud 0 Velocidad 0 km/h

Longitud 0 Aceleracion 0 m/s²

Altitud 0 m Fuerza G 0

Distancia 0 km Fecha

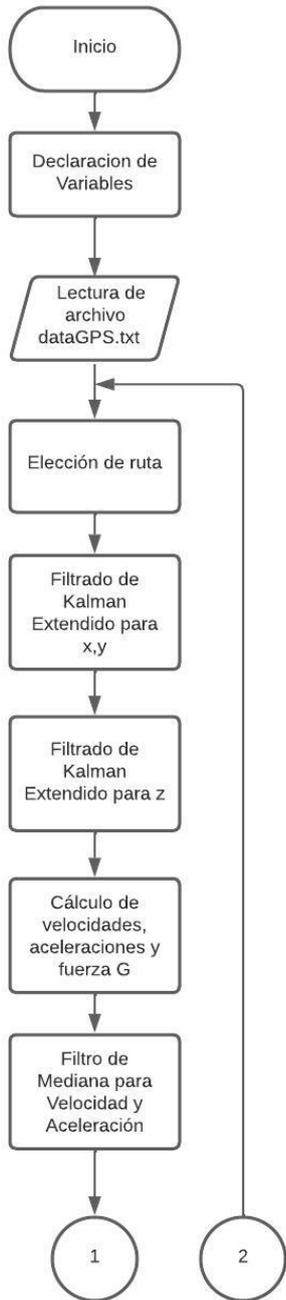
P. Inicial 0 %

P. Final 1 %

Enfoque

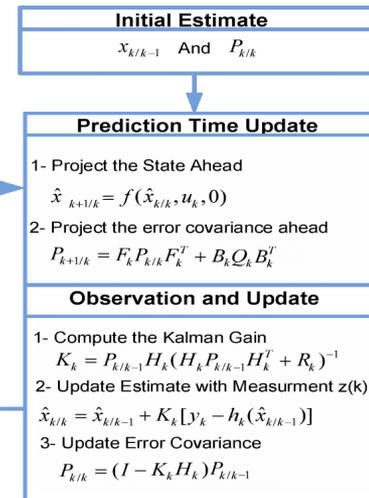


Diagrama de funcionamiento



```

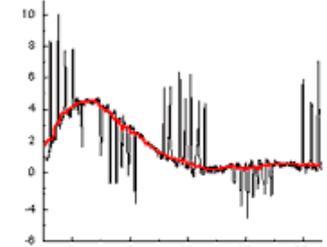
dataGPS.txt: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
Latitud,Longitud,Altura,Velocidad,Fecha Hora,Muestreo NoSat
-0.29183,-78.55344,3073.90,3.50,01/21/2023 18:18:39,3 1000
-0.29183,-78.55344,3073.90,1.59,01/21/2023 18:18:40,3 1000
-0.29184,-78.55344,3073.90,4.06,01/21/2023 18:18:41,3 1000
-0.29186,-78.55343,3073.90,6.89,01/21/2023 18:18:42,3 1000
-0.29189,-78.55342,3073.90,9.04,01/21/2023 18:18:43,3 1000
-0.29189,-78.55341,3074.00,5.63,01/21/2023 18:18:44,3 1000
-0.29191,-78.55340,3074.00,6.98,01/21/2023 18:18:45,3 1000
-0.29193,-78.55339,3074.00,8.09,01/21/2023 18:18:46,3 1000
-0.29194,-78.55340,3074.00,6.41,01/21/2023 18:18:47,3 1000
-0.29198,-78.55341,3073.90,10.65,01/21/2023 18:18:48,3 1000
  
```



El EKF fue separado para 2D (xy) y (z) en 1D.

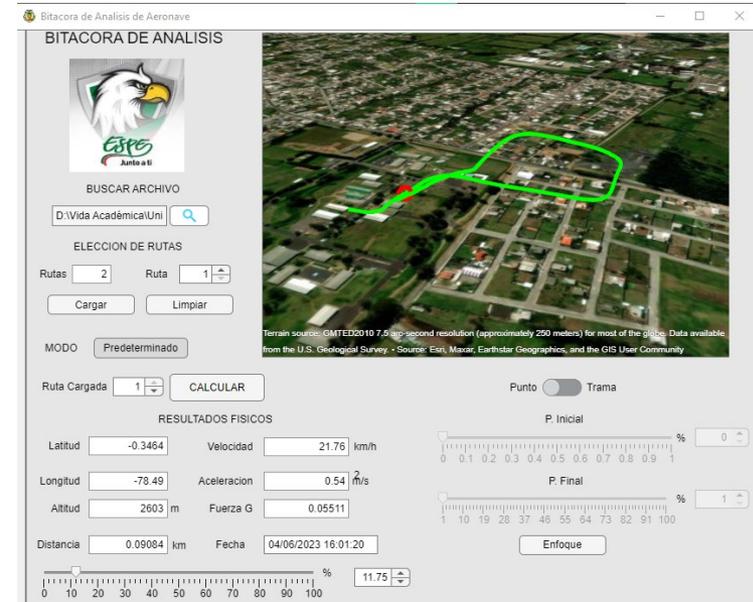
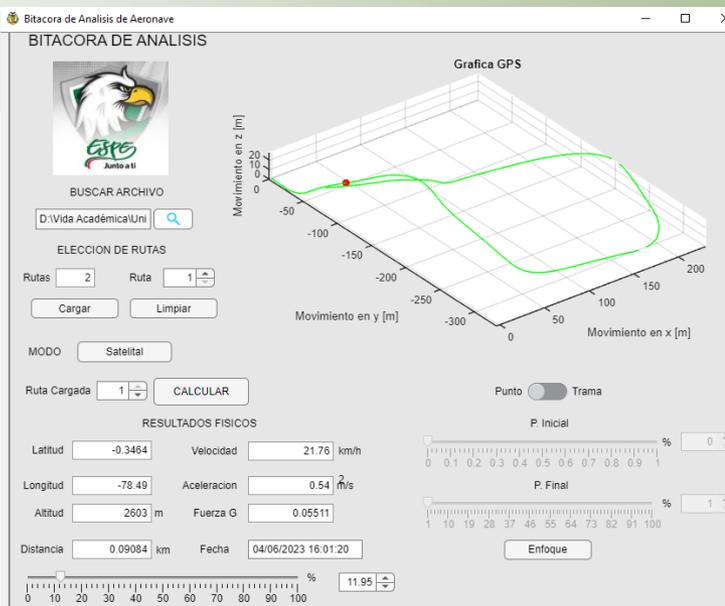
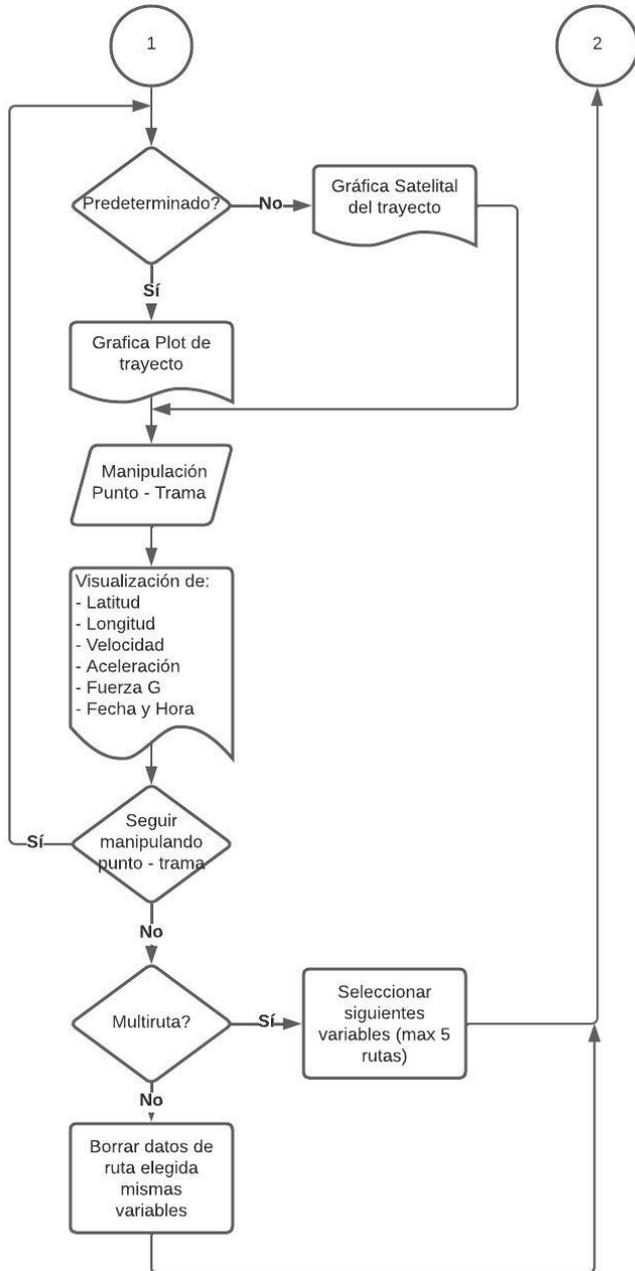
$$v_m = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_1 - x_0}{t_1 - t_0}$$

Cálculo velocidad, aceleración y fuerza G.



Filtrado de Mediana



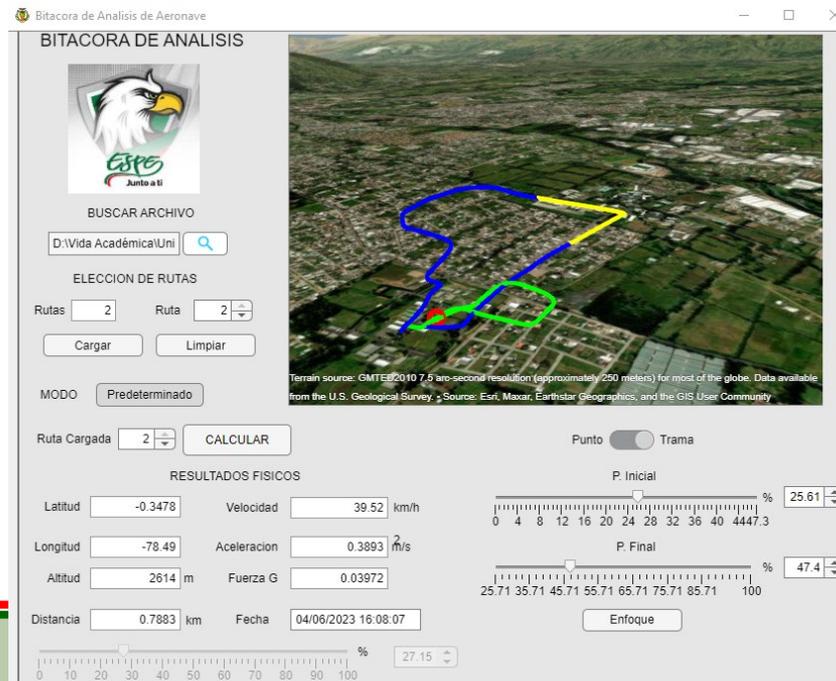
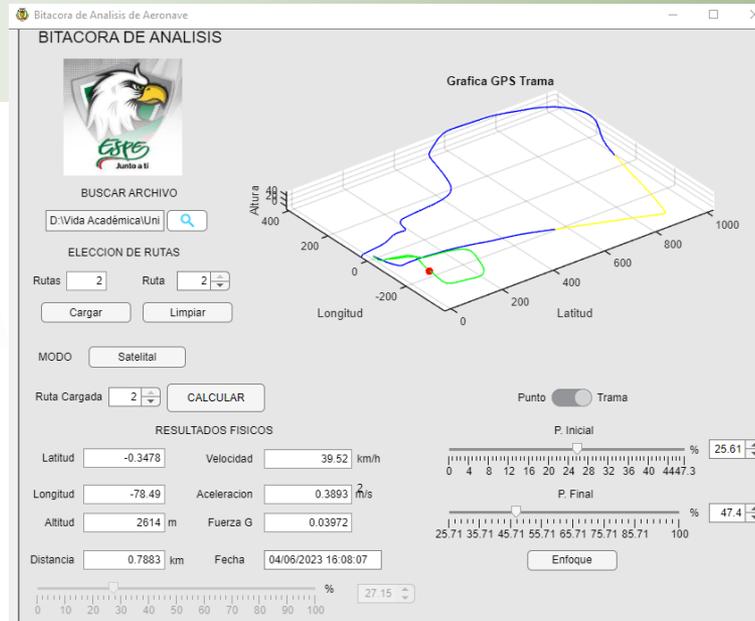


Puede ser intercambiado entre predeterminado y satelital

Puede variar modo punto (instantáneo) o trama (promedio)



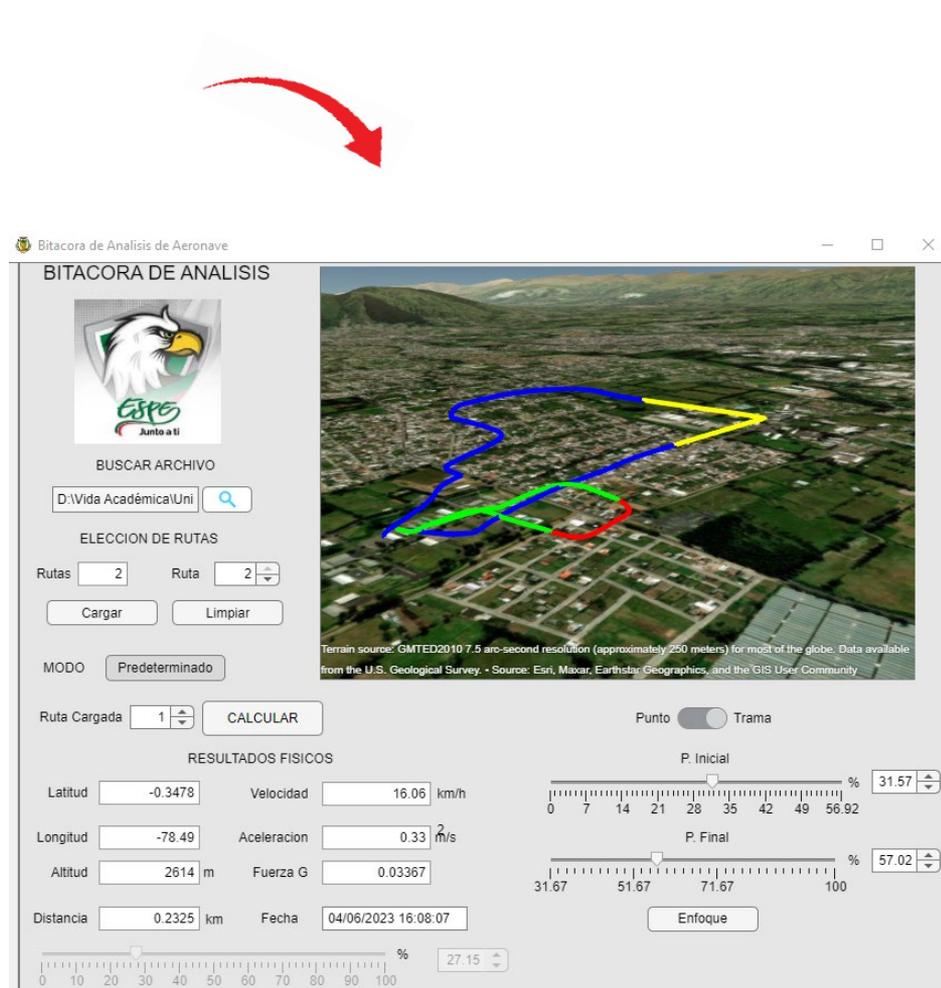
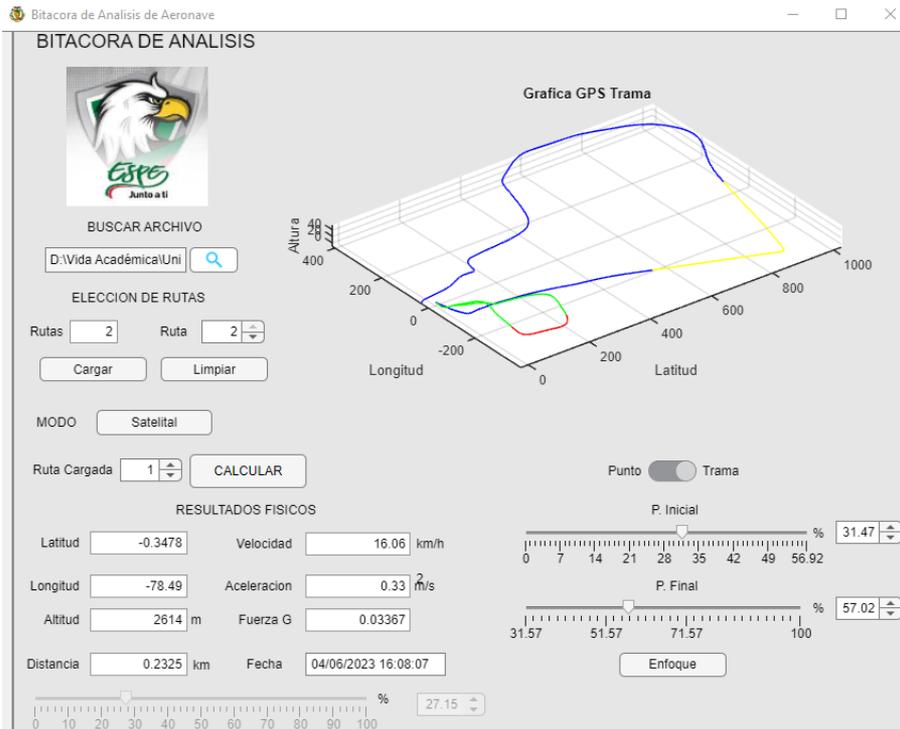
Funcionamiento Multi-Ruta



Se almacena los últimos cambios gráficos realizados en la ruta anterior manipulada.



Funcionamiento Multi-Ruta



Conforme los resultados obtenidos y la finalidad del proyecto de investigación se ha optado por utilizar las siguientes métricas.

MAE: Diferencia entre error existente entre valor real y estimado. Al ser valores estimados por el EKF y Filtro de Mediana, se compara los valores reales y obtenidos por el programa para determinar el error de precisión del sistema GPS.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|$$

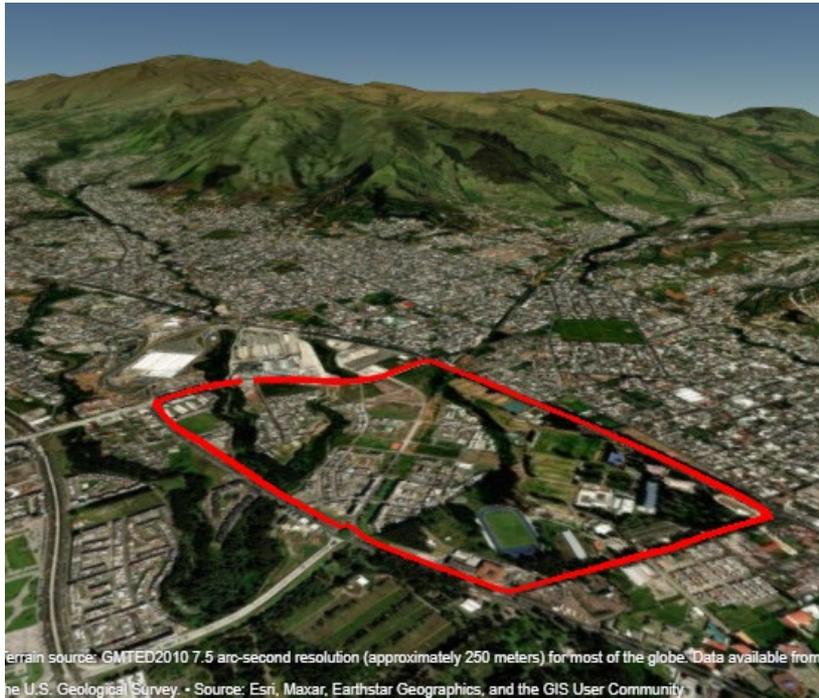
RMSE: Utilizado en evaluar rendimiento de un modelo de estimaciones. Es utilizado en el proyecto para juzgar los datos en bruto del dispositivo GPS, Filtrado de Kalman Extendido y Filtrado de Mediana para posiciones, velocidades y aceleraciones.

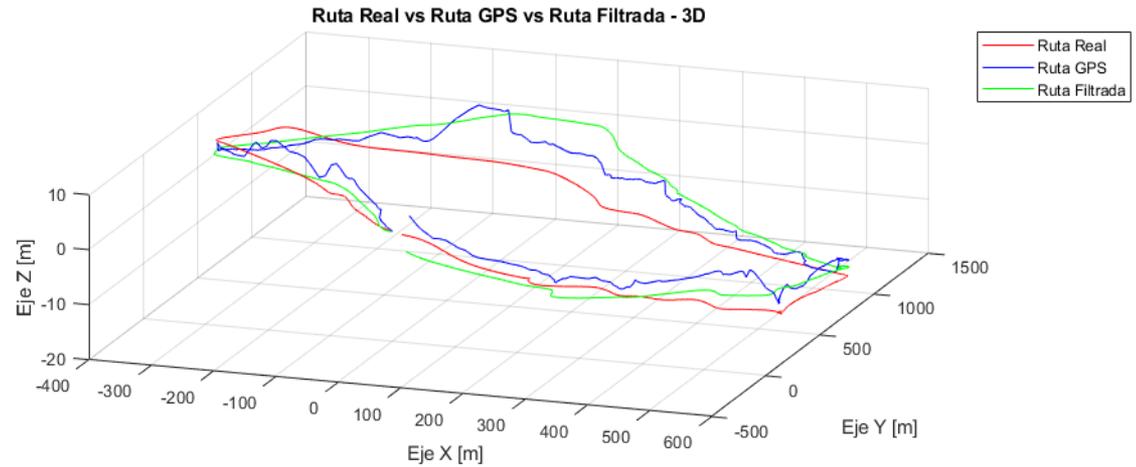
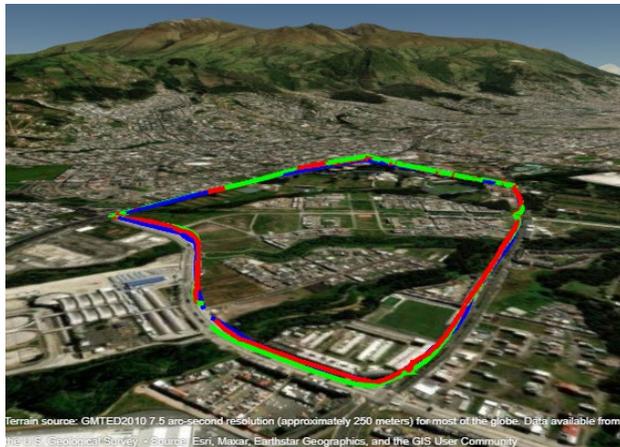
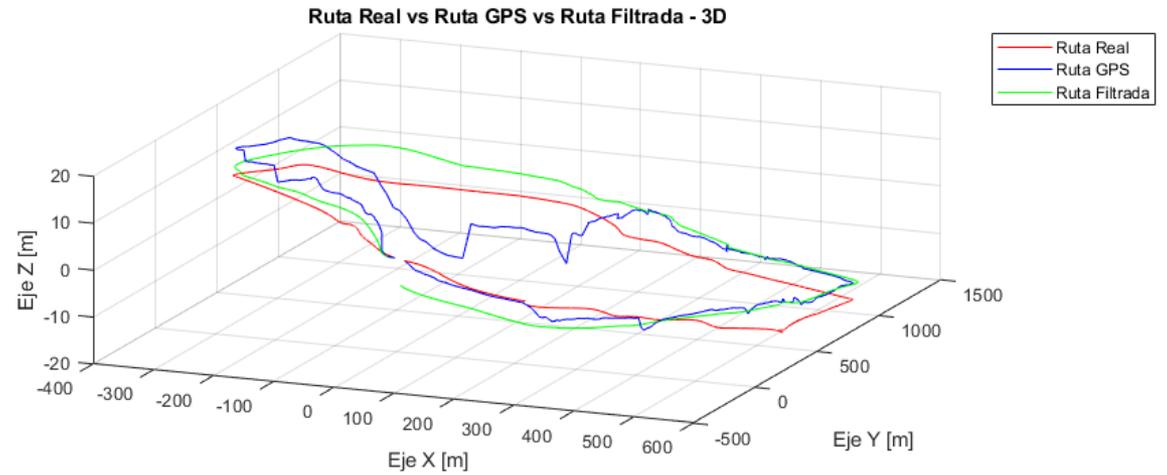
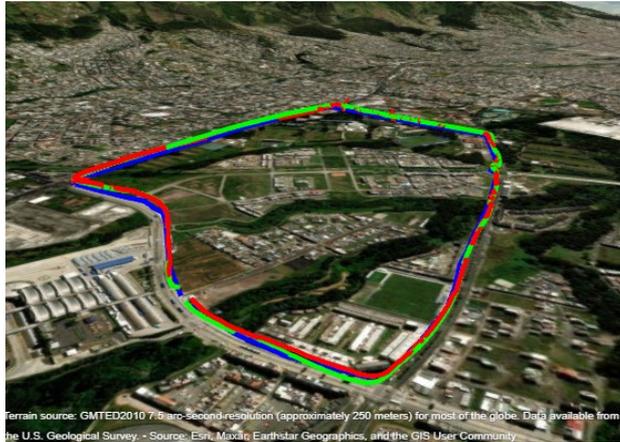
$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

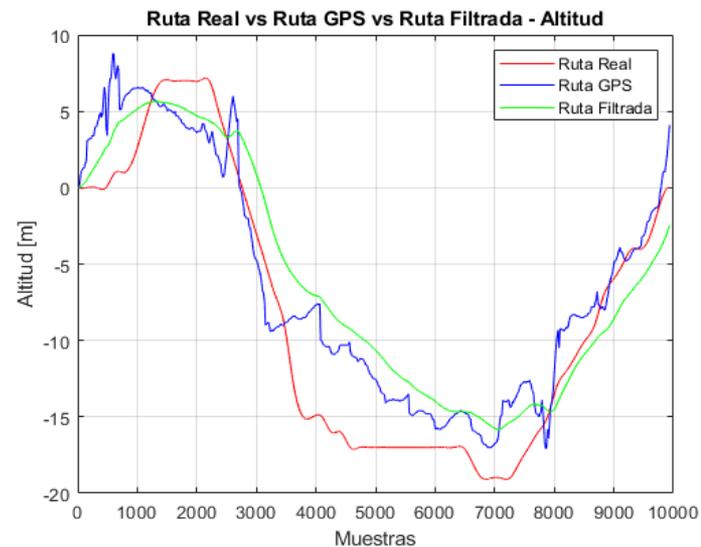
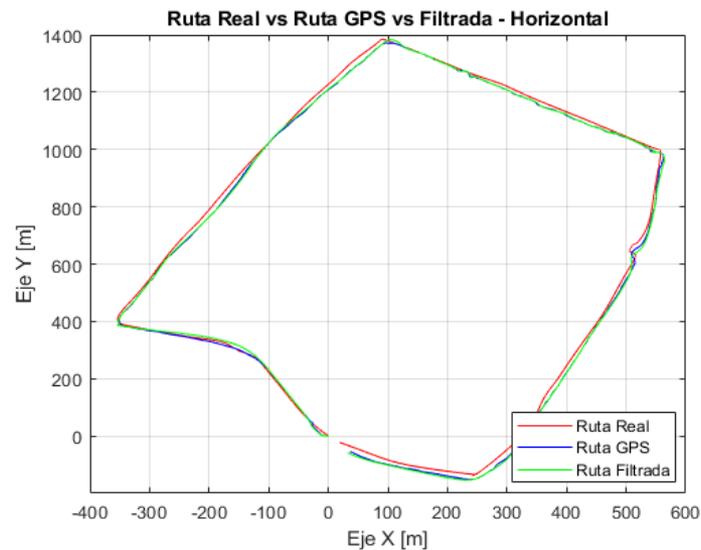
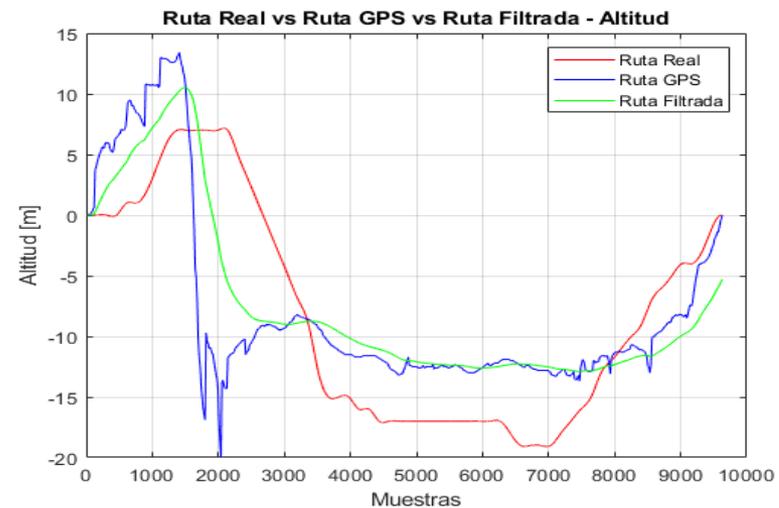
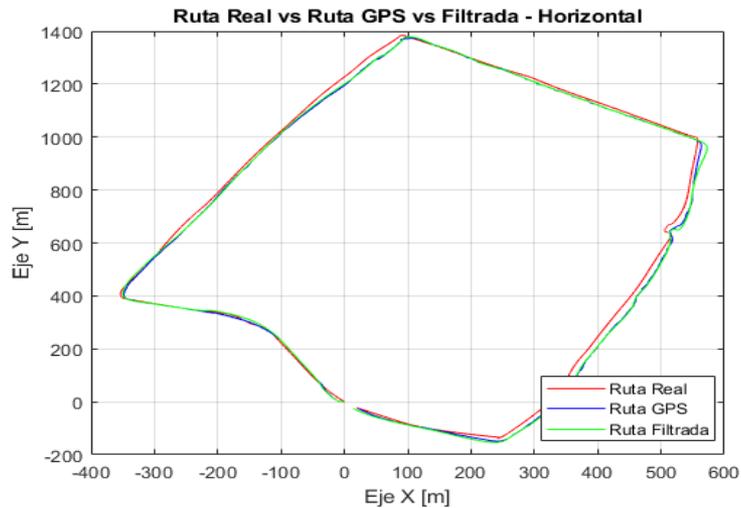


Se realizaron las respectivas pruebas en un automóvil en un trayecto cerrado incluido variaciones de altitud para verificación de precisión.

Trayecto real







MAE

No. Prueba	MAE Distancia [m] / EJE XY		MAE Distancia [m] / EJE Z	
	Módulo GPS	EKF	Módulo GPS	EKF
1ra	6.4	6.8	4.5	4.4
2da	6.2	6.3	2.9	2.7
3ra	6.9	7.5	7.3	6.8
Promedio	6.5	6.9	4.9	4.4

RMSE

Errores RMSE en cada eje							
No. Prueba	Filtrado de Kalman Extendido			Datos GPS sin Filtrado			
	Eje X	Eje Y	Eje Z	Eje X	Eje Y	Eje Z	
Primera	8.9	9.6	6.3	9.2	10.5	7.2	
Segunda	10.0	13.5	3.3	10.5	14.0	3.4	
Tercera	11.2	15.1	7.9	11.7	15.3	8.5	
Promedio	10.0	12.7	5.8	10.4	13.3	6.4	
Promedio General	EFK: 9.5			Sin filtrado: 10.1			



RMSE

Se ha destinado el uso de la métrica del RMSE para la velocidad y aceleración permitiendo tener una visión del ajuste que existe entre el cálculo directo del filtrado de Kalman Extendido y el post-filtrado de Mediana.

No. Prueba	RMSE Velocidad		RMSE Aceleración
	Cálculo Directo	F. Mediana	F. Mediana
1ra	8.9	5.5	1.3
2da	7.6	4.3	1.2
3ra	4.8	4.5	0.6
Promedio	7.1	4.7	1.1

El filtrado de mediana se encuentra en uso para el cálculo de los valores de velocidad y aceleración. La fuerza G se deriva de la aceleración suavizada.



Se realizaron las respectivas pruebas en un dron en dos trayectorias cerradas incluido variaciones de altitud para verificación de precisión.

Trayecto real

Bitacora de Analisis de Aeronave

BITACORA DE ANALISIS



BUSCAR ARCHIVO

D:\Vida Académica\Un

ELECCION DE RUT...

Rutas Ruta

MO...



Terrain source: GMTEL0010 7.5 arc-second resolution (approximately 200 meters) for most of the globe. Data available from the U.S. Geological Survey. - Source: Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

Ruta Cargada

Punto Trama

P. Inicial %

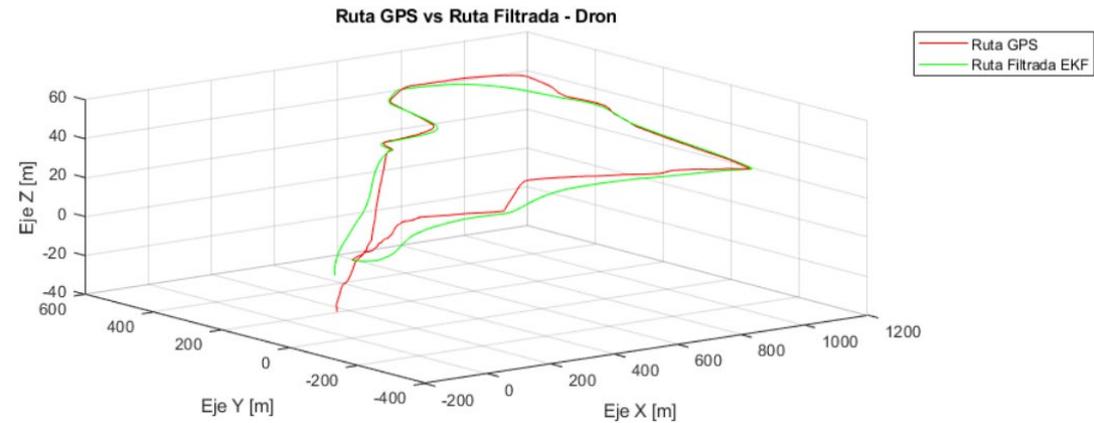
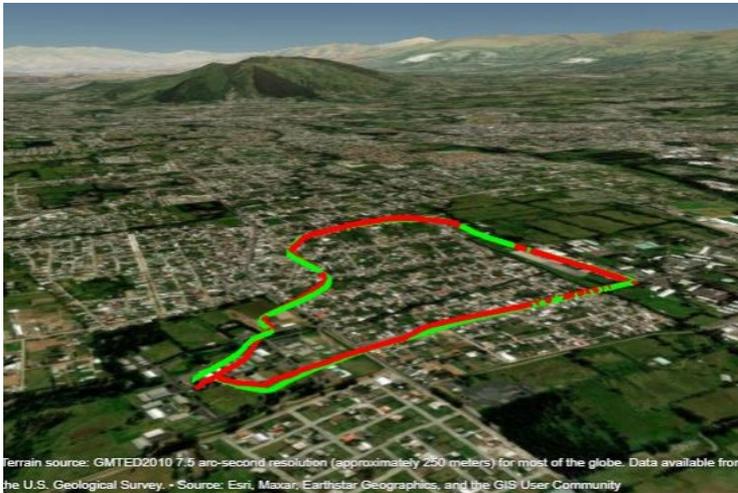
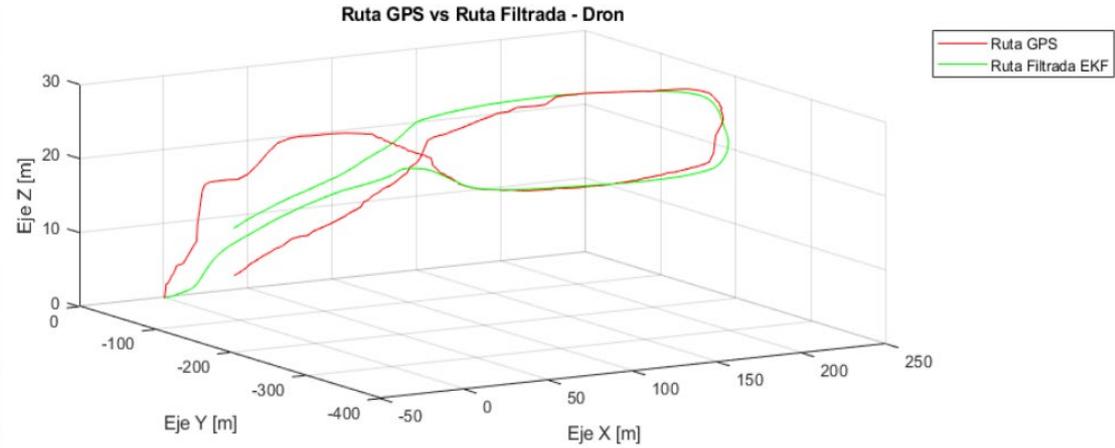
P. Final %

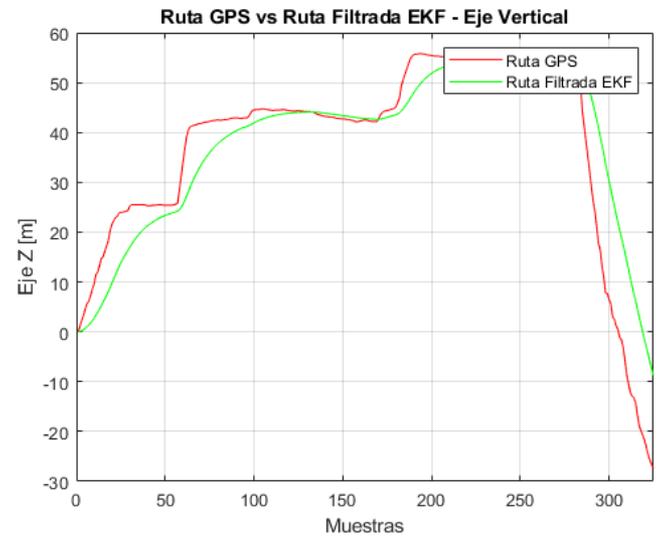
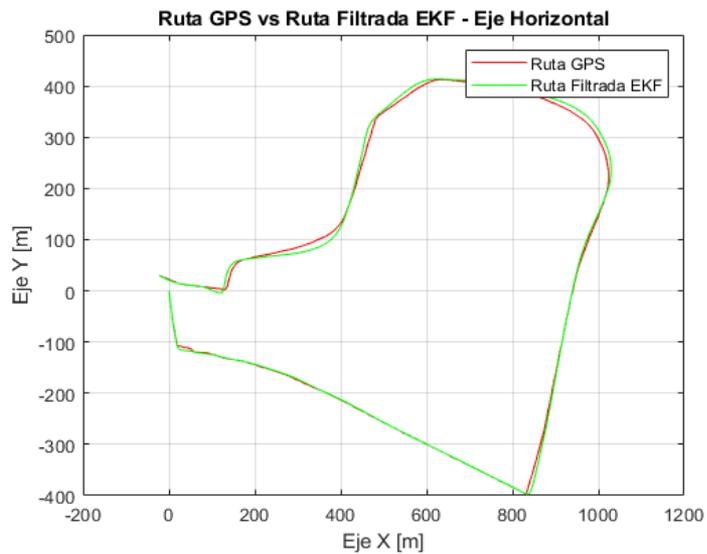
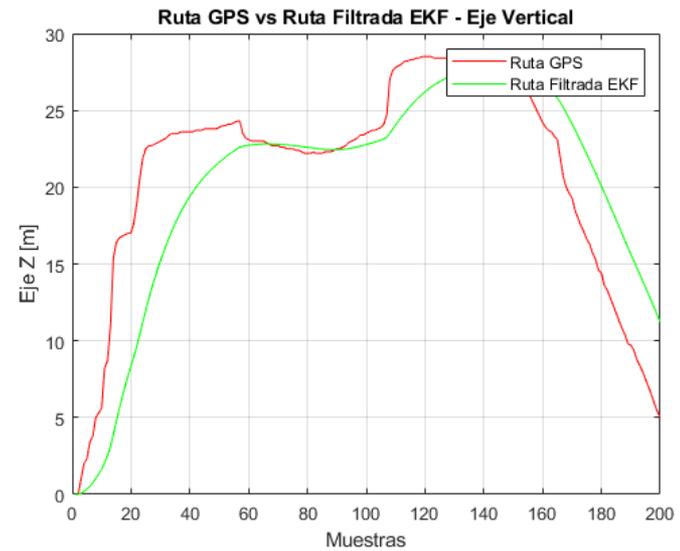
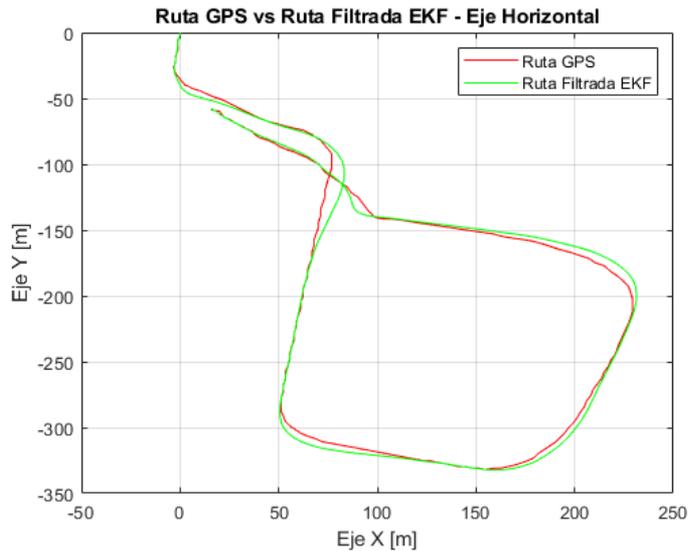
RESULTADOS FISICOS

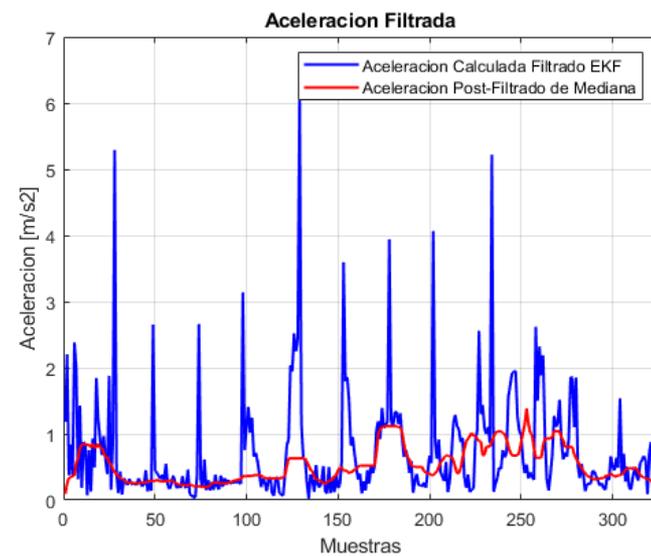
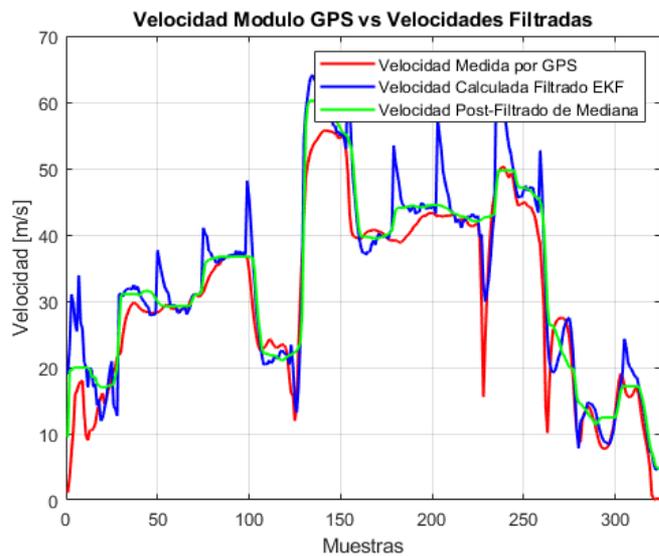
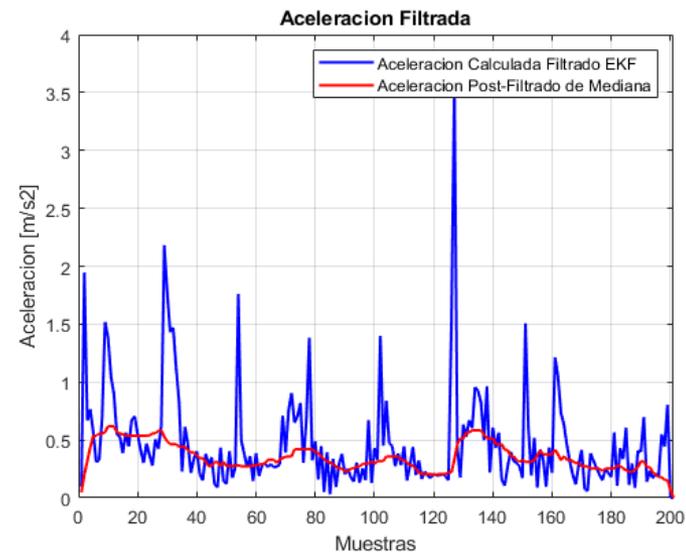
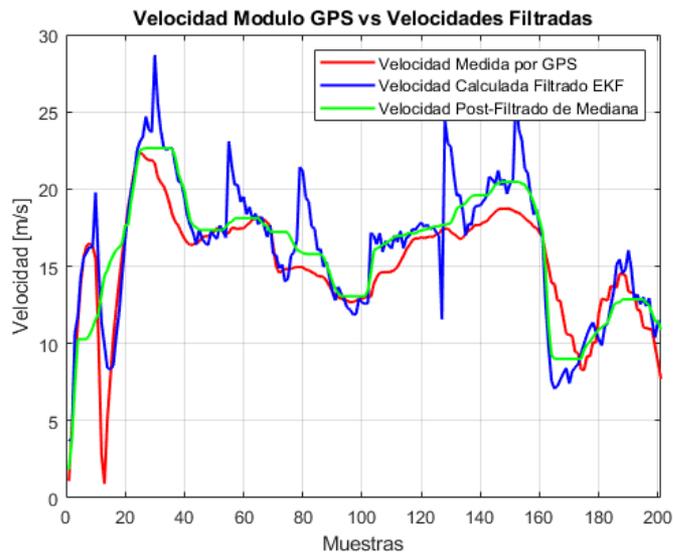
Latitud	<input type="text" value="-0.3486"/>	Velocidad	<input type="text" value="16.96"/> km/h
Longitud	<input type="text" value="-78.49"/>	Aceleracion	<input type="text" value="0.2824"/> m/s
Altitud	<input type="text" value="2616"/> m	Fuerza G	<input type="text" value="0.02881"/>
Distancia	<input type="text" value="0.5231"/> km	Fecha	<input type="text" value="04/06/2023 16:02:57"/>

%









RMSE EN CADA EJE

No. Prueba	Filtrado de Kalman Extendido		
	Eje X	Eje Y	Eje Z
Ruta 1	2.9	1.9	4.3
Ruta 2	3.9	5.0	8.4
Promedio	3.4	3.5	6.4
Promedio General	EFK: 4.4		

RMSE VELOCIDAD Y ACELERACION

No. Prueba	RMSE Velocidad		RMSE Aceleración
	Cálculo Directo	F. Mediana	F. Mediana
Ruta 1	2.8	2.2	0.5
Ruta 2	2.6	2.4	0.4
Promedio	2.7	2.3	0.5



Conclusiones

- Se implementó un sistema de almacenamiento y visualización de rutas definidas por aeronaves a bajo costo, contribuyendo con la instrucción de estudiantes aviadores civiles y militares para el uso de aeronaves tripuladas y no tripuladas.
- Mediante la implementación y desarrollo del proyecto de titulación, se ha demostrado que el sistema es capaz de trazar el trayecto con un alto nivel de confiabilidad y precisión, alrededor de ± 6.90 m en eje horizontal y ± 4.41 m en vertical.
- La aplicación del filtrado de Kalman Extendido ha generado una notable mejora en la ruta trazada por el dispositivo electrónico.
- Según estudios, los aparatos con elementos GPS comerciales incorporados oscilan entre 10 y 20 metros, en cambio el sistema implementado aumentó su exactitud alrededor 7 metros aproximadamente.
- El error medio absoluto (MAE) dado por los datos del filtrado de Kalman Extendido es ligeramente mayor que los datos en bruto debido a que el EKF, al generar una trayectoria más precisa y coherente, tiende a aplicar cierto grado de desviación en la ruta tratada.



Conclusiones

- El filtro de Kalman Extendido, se ha suavizado los datos GPS y reducido los efectos negativos como fluctuaciones no deseadas disminuyendo las discrepancias entre coordenadas de referencia y obtenidas, reduciendo el valor de RMSE en 1.16 en promedio.
- A pesar del filtrado de Kalman Extendido, existe ligera inestabilidad al momento de calcular las velocidades y aceleraciones debido a la limitación por filtrar completamente los datos. Es por ello por lo que se aplica el filtrado de mediana, que, elimina valores anormales y reduce la influencia de valores atípicos.
- Los sistemas requeridos en la industria de aeronaves incluyen características muy avanzadas con certificaciones de seguridad rigurosas; provocando un altísimo costo de instalación. El proyecto desarrollado ofrece similares funcionalidades a un bajo nivel de costo, siendo aproximadamente \$63.65.
- Con el diseño y desarrollo de la interfaz gráfica se ha demostrado una herramienta visual que permite una mejor comprensión e interpretación de los datos recopilados a lo largo de la trayectoria, con el fin de monitorear mediante las variables de velocidad, aceleración y fuerza G.



Recomendaciones

- Utilizar el dispositivo con un mayor o igual a 8 satélites para tener valores de HDOP y VDOP bajos y aumentar la precisión.
- Dirigir la antena en vista al cielo para aumentar la intensidad de señal receptada y SNR. Además considerar factores climáticos y alrededores.
- Tener en cuenta el peso del dispositivo al utilizar en aeronaves no tripuladas.
- Determinar el tiempo de muestreo según las necesidades del usuario.
- Para futuras investigaciones se recomienda explorar otras técnicas de filtrado digital, que puedan aumentar aún más los niveles de precisión y rendimiento del sistema.
- Como trabajo futuro se recomienda acoplar un sistema de visualización en tiempo real de las variables para una retroalimentación instantánea.
- Como investigación se recomienda usar módulos con costo considerable que soporten un mayor número de sistemas GNSS para aumentar precisión del sistema.

