



UNIVERSIDAD DE PANAMA  
VICERRECTORIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO  
FACULTAD DE INFORMATICA ELECTRONICA Y COMUNICACION

PROGRAMA DE MAESTRIA EN CIENCIAS DE INGENIERIA DE  
SISTEMAS DE COMUNICACIONES CON ENFASIS EN REDES DE DATOS

MEJORAMIENTO EN LA ESTIMACIÓN DE POSICIONAMIENTO POR GPS  
APLICANDO EL FILTRO DE KALMAN

FELIX MARCELINO MORENO RODRIGUEZ

TESIS PRESENTADA COMO UNO DE LOS REQUISITOS PARA OPTAR  
AL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS DE INGENIERIA DE SISTEMAS DE  
COMUNICACIONES CON ENFASIS EN REDES DE DATOS

PANAMA REPUBLICA DE PANAMA

2014

ST

21 JUL 2014

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a mi Madre por su apoyo incondicional

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnologia e Innovacion por el financiamiento de mis estudios de Maestria y pasantia en la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

Agradezco a los integrantes del Grupo de Inteligencia Artificial Aplicada (GIAA) de la Universidad Carlos III de Madrid quienes apoyaron a la realización de esta investigación durante mi pasantía

Agradezco al Centro de Investigación de Tecnologías de Información y Comunicación (CITIC) de la Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación de la Universidad de Panamá por brindarme su cooperación durante el desarrollo de la Maestría y esta investigación

## INDICE

RESUMEN	1
SUMMARY	2
CAPITULO I ESTADO DEL ARTE	3
1 1 Marco Teórico	3
1 1 1 Introducción al Sistema Global de Navegación por Satélite – GNSS	3
1 1 2 Sistema NAVSTAR GPS	4
1 1 3 Arquitectura del Sistema GPS	4
1 1 3 1 Segmento Espacial	5
1 1 3 2 Segmento de Control	7
1 1 3 3 Segmento de Usuario	8
1 1 4 Trilateración Satelital	9
1 1 5 Aplicaciones del Sistema de Posicionamiento Global	11
1 1 6 Fuentes de error en el sistema GPS	12
1 1 6 1 Errores en los relojes	12
1 1 6 2 Error Orbital	12
1 1 6 3 Error por la Distribución Geométrica de los satélites y el receptor	13
1 1 6 4 Error por la Perturbación de la ionósfera	13
1 1 6 5 Error por la Perturbación de la Tropósfera	14
1 1 6 6 Error por Multitrayecto	14
1 1 6 7 Error por Disponibilidad Selectiva (SA)	15



1 1 6 8 Dilución de la Precision (DOP)	16
1 2 Sistema de Coordenadas Geográficas	17
1 2 1 Latitud y Longitud	18
1 2 2 Sistema de Coordenadas UTM	19
1 2 3 Coordenada UTM	21
1 2 4 Datum	22
1 3 Filtro de Kalman	22
1 3 1 Algoritmo del Filtro de Kalman	23
 CAPÍTULO II DEFINICION DEL PROBLEMA METODOLOGIA Y HERRAMIENTAS	 26
2 1 Definición del Problema	26
2 2 Objetivo General y Objetivos Específicos	26
2 2 1 Objetivo General	26
2 2 2 Objetivos Específicos	27
2 3 Metodología de la Investigación	27
2 4 Herramientas utilizadas	26
2 4 1 Vehículo a control remoto	29
2 4 2 Teléfono móvil	30
2 4 3 Software GPS Logger	30
2 4 4 Software GPS Status & Toolbox	31
2 4 5 Matlab	32

<b>CAPITULO III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN</b>	<b>34</b>
3.1 Instalación de aplicaciones	34
3.2 Configuración de la Aplicación GPS Logger	34
3.3 Mediciones	35
3.4 Post Proceso	37
3.4.1 Definición del Filtro de Kalman	37
3.4.2 Inicialización del Filtro de Kalman	40
3.5 Coordenadas Geográficas medidas en la trayectoria.	42
3.6 Algoritmo del Filtro de Kalman en Matlab	46
 <b>CAPITULO IV RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	 <b>51</b>
4.1 Trayectorias	51
4.2 Mediciones en X y Y en el Dominio del tiempo	52
4.3 Error en la medida de las componentes Este X(m) y Norte Y (m)	54
4.3.1 Error en la componente Este X(m) de la Posición	54
4.3.2 Error en la componente Norte Y(m) de la posición	56
4.4 Histogramas de Error	57
 <b>CONCLUSIONES</b>	 <b>61</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>61</b>

## **INDICE DE CUADROS**

<b>Cuadro I</b>	<b>ERRORES DEL SISTEMA GPS</b>	<b>16</b>
<b>Cuadro II</b>	<b>SESIONES DE MEDICIÓN</b>	<b>17</b>
<b>Cuadro III</b>	<b>VALORES DE DILUCION DE LA PRECISIÓN</b>	<b>35</b>
<b>Cuadro IV</b>	<b>COORDENADAS UTM OBTENIDAS EN LA TRAYECTORIA</b>	<b>43</b>
<b>Cuadro V</b>	<b>ERROR ABSOLUTO DE LAS MEDICIONES AL ESTE</b>	<b>55</b>
<b>Cuadro VI</b>	<b>ERROR ABSOLUTO DE LAS MEDICIONES AL NORTE</b>	<b>57</b>
<b>Cuadro VII</b>	<b>PARAMETROS DE LOS HISTOGRAMAS AL ESTE</b>	<b>60</b>
<b>Cuadro VIII</b>	<b>PARAMETROS DE LOS HISTOGRAMAS AL NORTE</b>	<b>60</b>

## INDICE DE FIGURAS

Fig 1	Orbitas de la Constelación de Satélites GPS	5
Fig 2	Señales que procesa un receptor GPS para calcular las Pseudodistancias	7
Fig 3	Segmento de Control del Sistema GPS (www gps gov)	8
Fig 4	Intersección de tres esferas imaginarias	10
Fig 5	Intersección de cuatro esferas imaginarias	10
Fig 6	Propagación de las señales a través de la atmósfera	13
Fig 7	Interferencia debido al multitrayecto	14
Fig 8	Precisión del GPS antes y después de la eliminación de la SA	15
Fig 9	Sistema de Coordenadas Geográficas	18
Fig 10	Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator	19
Fig 11	Origen de Coordenadas UTM en el Hemisferio Norte en el Huso 17	20
Fig 12	Origen de Coordenadas UTM en el Hemisferio Sur en el Huso 17	21
Fig 13	Funcionamiento del Filtro de Kalman	25
Fig 14	Vehículo y Trayectoria de la Investigación	28
Fig 15	Sitio de las mediciones Estadio Oscar Suman Carrillo	29
Fig 16	Vehículo a control remoto	29
Fig 17	Samsung Galaxy S Duos (GT S7562L)	30
Fig 18	Software GPS Logger	31
Fig 19	Software GPS Status & Toolbox	32
Fig 20	Software MATLAB versión 7.12	33

Fig 21	Captura de pantalla de GPS Status	36
Fig 22	Trayectorias original medida con GPS y estimada con el Filtro de Kalman	51
Fig 23	Muestras de las componentes de posición Este $X(m)$ de las trayectorias	52
Fig 24	Muestras de las componentes de posición Norte $Y(m)$ de las trayectorias	53
Fig 25	Error en la componente de posición Este $X(m)$	54
Fig 26	Vista ampliada del error en la componente de posición Este $X(m)$	55
Fig 27	Error en la componente de posición Norte $Y(m)$	56
Fig 28	Vista ampliada del error en la componente de posición Norte $Y(m)$	57
Fig 29	Histograma Errores de los valores medidos por el GPS Este $X(m)$	58
Fig 30	Histograma Errores de los valores estimados por el Filtro Este $X(m)$	58
Fig 31	Histograma Errores de los valores medidos por el GPS Norte $Y(m)$	59
Fig 32	Histograma Errores de valores estimados por el Filtro Norte $X(m)$	59

## **ABREVIATURAS**

<b>GDOP</b>	Geometric Dilution of Precision
<b>GLONASS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>IGNTG</b>	Instituto Geográfico Nacional Tommy Guardia
<b>MEO</b>	Medium Earth Orbit
<b>PPS</b>	Precise Positioning Service
<b>RTK</b>	Real Time Kinematics
<b>SIRGAS</b>	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas
<b>SPS</b>	Standard Positioning Service
<b>UTM</b>	Universal Transverse Mercator
<b>UPS</b>	Universal Polar Stereographic
<b>PRN</b>	Pseudo Random Noise (Ruido Pseudo Aleatorios)
<b>WGS84</b>	World Geodetic System 1984
<b>HDOP</b>	Dilución de la Precisión Horizontal
<b>MICRO-SD</b>	Tarjeta Micro de Memoria Flash Secure Digital
<b>KML</b>	Keyhole Markup Language
<b>GPX</b>	GPS eXchange Format (Formato de Intercambio GPS)
<b>TXT</b>	Texto Plano

## **RESUMEN**

Este trabajo consiste en la evaluación de la precisión del receptor GPS de un teléfono celular en la determinación de una trayectoria en tiempo real y en post proceso aplicando el Filtro de Kalman a través de un código en MATLAB

Para obtener los datos del estudio se definió una trayectoria en línea recta, entre dos puntos en la que el receptor GPS realiza un movimiento rectilíneo uniforme con el objetivo de poder repetir las observaciones y contrastar los resultados

Esto nos permitió evaluar la precisión de las lecturas comparándolas una vez aplicado el filtro de Kalman con la trayectoria definida inicialmente

Los resultados obtenidos fueron los esperados la aplicación del Filtro de Kalman proporcionó una mejora a los valores de las lecturas en crudo del GPS

## SUMARY

This work consists in evaluating the accuracy of the GPS receiver of a cell phone in determining a path in real time and post process using the Kalman Filter through a code in MATLAB

For the survey data, a path defined in a straight line between two points in which the GPS receiver performs a uniform rectilinear motion in order to be able to repeat the observations and contrast results

This allowed us to assess the accuracy of the readings comparing, once the Kalman filter with the path defined initially applied

The results were as expected the application of the Kalman filter provided better values than raw readings GPS



## **CAPITULO I ESTADO DEL ARTE**

### **1.1 Marco Teórico**

#### **1.1.1 Introducción al Sistema Global de Navegación por Satélite – GNSS**

Es una constelación de satélites que transmite señales de radio que se utilizan para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre. En la actualidad hay dos sistemas que están totalmente operativos: el tradicional NAVSTAR GPS de Estados Unidos y GLONASS de Rusia. Adicional a estos están en desarrollo otros sistemas globales de navegación por satélite como el GALILEO de la Unión Europea, el BEIDOU 2 o COMPASS de China, y sistemas disponibles localmente como el QZSS Quasi Zenith Satellite System de Japón y el IRNSS Indian Regional Navigation Satellite System de la India.

En lo sucesivo cuando hablemos de GPS sólo nos referiremos al Sistema Norteamericano.

### **1.1.2 Sistema NAVSTAR GPS**

En diciembre de 1973 el Departamento de Defensa de Estados Unidos aprobó el desarrollo del Sistema GPS que resulta de la abreviatura NAVSTAR GPS que son las siglas en inglés de 'Navigation System with Timing and Ranging Global Positioning System' es decir sistema de posicionamiento global y sistema de navegación con sincronización de tiempo y medición de distancia.

Desde sus inicios el sistema se diseñó para usarse en aplicaciones militares pero en 1980 se decide hacer el sistema accesible para uso en aplicaciones civiles. Proporciona posicionamiento en tres dimensiones en tiempo real, sincronización de tiempo y velocidad con una cobertura global y funcionamiento durante las 24 horas de los 365 días del año.

La precisión de las mediciones debería tener un error entre 5 a 20 metros.

### **1.1.3 Arquitectura del Sistema GPS**

La arquitectura del Sistema GPS consiste en tres sistemas denominados segmentos que están claramente diferenciados: El segmento espacial, segmento de control y segmento de usuario. Los dos primeros segmentos son de responsabilidad del Departamento de Defensa de los Estados Unidos.

### 1.1.3.1 Segmento Espacial

El Segmento espacial GPS está formado por una constelación de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios en cualquier punto del planeta. Los satélites GPS giran en orbitas MEO (Orbitas Terrestre Media) a una altitud aproximada de 20,200 kilómetros y giran alrededor de la tierra dos veces al día.

Están dispuestos en 6 planos orbitales igualmente espaciados, en donde cada plano tiene 4 ranuras ocupadas por los satélites principales. Esta disposición suma 24 satélites, lo que garantiza prácticamente que los usuarios puedan ver al menos 4 satélites desde cualquier punto del planeta. En julio de 2011 se completó la ampliación de la constelación GPS; 3 de las 24 ranuras se ampliaron y se agregaron tres satélites dando como resultado una constelación de 27 satélites, mejorando la cobertura. Actualmente hay en total 31 satélites en órbita, tomando en cuenta los satélites operativos y los de reserva.

(Olmedillas, 2013) Cada satélite transmite dos señales de radio portadoras en la banda L. La frecuencia portadora L1, a 1575.42MHz y la frecuencia portadora L2, a 1227.60 MHz.

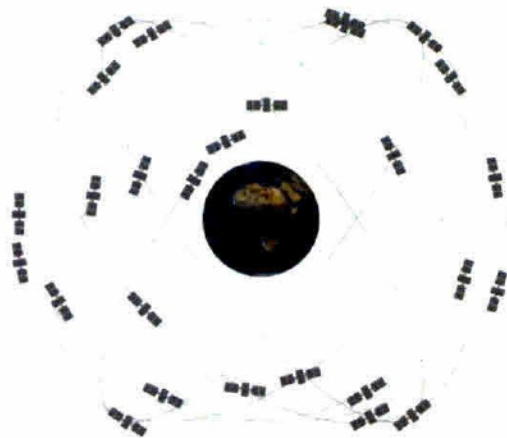


Fig. 1. Órbitas de la Constelación de Satélites GPS

El sistema GPS ofrece dos servicios uno dirigido a los militares (PPS) y otro dirigido a la población civil (SPS)

El Servicio de Posicionamiento Estándar SPS (Standard Positioning Service) para uso civil (Department of Defense of the United States of America, 2008) compuesto por la señal de radio abierta, en la frecuencia L1 moduladas con la técnica de Espectro Disperso (Spread Spectrum) por Un código C/A (del inglés Coarse /Acquisition) a una frecuencia de 1 023MHz, un mensaje de dato de navegación y un código de precisión (P) con una frecuencia de 10 23Mhz. Cualquier receptor GPS puede recibir estas señales para uso personal comercial o científico. Por ejemplo Navegadores GPS convencionales teléfonos inteligentes etc (Grimes Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard 2008)

El Servicio de Posicionamiento Preciso PPS (Precise Positioning Service) emite la señal de uso militar que esta reservada al Ejército y al Gobierno de los Estados Unidos quienes tienen acceso autorizado a las señales transmitidas en las frecuencias L1 y L2. Este emite señales codificadas con la clave P en la frecuencia L2 de 1227.6 MHz que se reserva para uso autorizado. El código P es criptográficamente alterado para convertirse en el código Y. El código Y estará disponible solamente para los usuarios que disponen de las claves de cifrado válidas (Grimes Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard 2007)

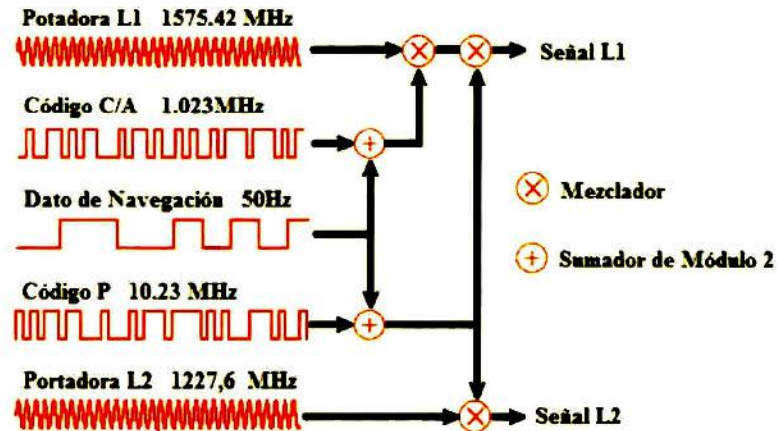


Fig. 2. Señales que procesa un receptor GPS para calcular las Pseudodistancias.

(Fuente. Peter H. Dana, Departamento de Geografía de la Universidad de Texas)

### 1.1.3.2 Segmento de Control

Constituido por una red global de estaciones de control en tierra que permiten, al Departamento de Defensa de los Estados Unidos, monitorear continuamente los satélites en órbita para controlar su funcionamiento y suministrar los datos de navegación que serán transmitidos por estos.

El funcionamiento del Segmento de Control incluye una estación de Control maestro principal, MSC (Master Control Station) que está en Colorado Springs, una estación de control maestro suplente en Vandenberg AFS California, 12 antenas de seguimiento y control, y 16 sitios de monitoreo.

Estas estaciones miden la posición de los satélites y se les envía de vuelta estos datos para que se efectúen las correcciones pertinentes.

Los satélites GPS no sólo transmiten un código pseudoaleatorio para medir tiempos e identificar cual lo transmite, sino que también transmite el estado de su sistema y su posición orbital exacta.

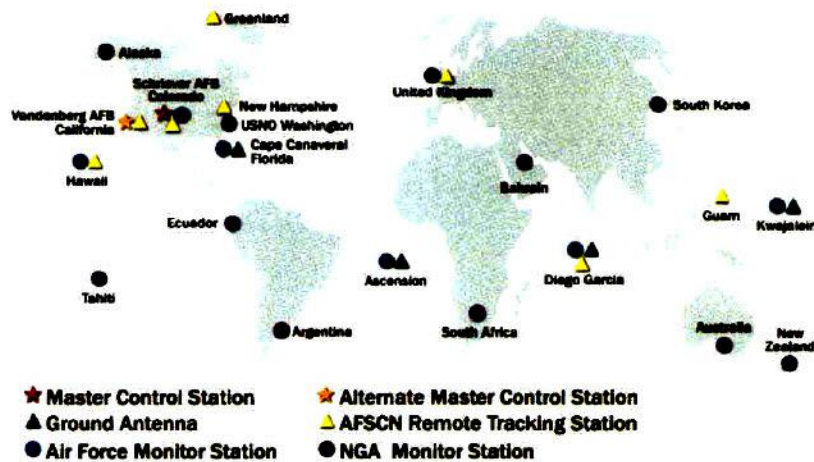


Fig. 3. Segmento de Control del Sistema GPS ([www. gps.gov](http://www.gps.gov))

### 1.1.3.3 Segmento de Usuario

Está constituido por los todos los equipos receptores en tierra, mar o aire que reciben las señales de los satélites y la utilizan para posicionarse o navegar, y dan lugar a las diferentes aplicaciones. En la actualidad debido al desarrollo tecnológico, se fabrican una gran variedad de equipos y productos que contienen receptores GPS y varían en cuanto a la precisión, tamaño, peso y capacidad de almacenamiento de datos.

Están presentes en los teléfonos celulares receptores manuales dispositivos de rastreo personal relojes pulseras cajeros automáticos autos motos barcos tractores aviones por lo que es común su uso en diferentes campos

#### **1.1.4 Trilateración Satelital**

Cuando un receptor GPS en tierra recibe la señal de un primer satélite Este determina la distancia entre ambos puntos Esta información sólo indica que el receptor puede estar en cualquier punto sobre una esfera imaginaria de radio  $R_1$  con centro en el satélite

Al determinar la distancia a un segundo satélite se crea una segunda esfera imaginaria de radio  $R_2$  La intersección de estas dos esferas genera un círculo En cualquier punto de este círculo pudiera estar el receptor GPS

Al medir la distancia a un tercer satélite se genera una tercera esfera imaginaria de radio  $R_3$  que interseca en dos puntos al círculo resultante de la intersección de las dos primeras esferas como se muestra en la (Fig. 4) Uno de estos dos puntos debe ser descartado

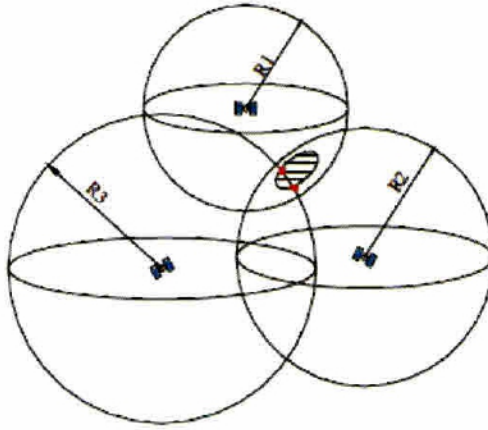


Fig. 4. Intersección de tres esferas imaginarias.

Para calcular la posición del receptor en coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y tiempo, es necesario la medición a un cuarto satélite que generará una cuarta esfera imaginaria de radio  $R_4$  y que confirma finalmente el punto resultante de la intersección de las 4 esferas.

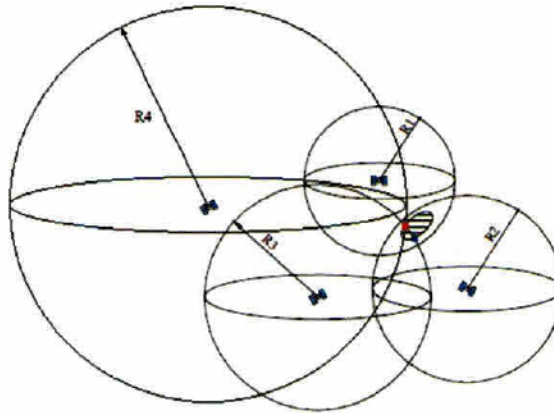


Fig. 5. Intersección de cuatro esferas imaginarias.



### **1.1.5 Aplicaciones del Sistema de Posicionamiento Global**

El acceso libre y confiable al Sistema de Posicionamiento Global ha permitido el desarrollo de aplicaciones que afectan a todos los aspectos de la vida contemporánea, ayudando a mejorar la productividad en varias ramas de la Economía. Por ejemplo, podemos mencionar algunas: Agricultura de precisión, aviación, carreteras, cronometría, medio ambiente, minería, navegación marítima, recreación, seguridad pública, socorro en caso de desastres, topografía, cartografía, construcción y vías férreas.

Las principales redes de comunicación, algunos servicios inalámbricos, sistemas bancarios, mercados financieros y redes de energía dependen en gran parte del GPS para la sincronización precisa del tiempo.

El GPS ayuda a salvar vidas a través de la prevención de los accidentes de tránsito, ayudan en la búsqueda y rescate, agilizan la prestación de servicios de emergencia y socorro.

El GPS es vital para el sistema de transporte aéreo ya que mejora la seguridad de vuelo. También se utiliza para propósitos científicos tales como la predicción del tiempo, monitoreo de terremotos y la protección del medio ambiente.

A diario se crean nuevas aplicaciones de GPS que sólo están limitadas por la imaginación humana.

### **1 1 6 Fuentes de error en el sistema de GPS**

Existen diferentes fuentes de error que pueden impactar el cálculo de la posición en los receptores GPS con un cierto grado de incertidumbre

A continuación describimos las fuentes de error que pueden afectar las mediciones

#### **1 1 6 1 Errores en los relojes**

Los relojes atómicos en los satélites no corregidos por las estaciones de control pueden presentar ligeras desviaciones que producen una diferencia en tiempo entre el satélite y el sistema GPS lo mismo pasa con los relojes de los receptores

#### **1 1 6 2 Error orbital**

Afectan la determinación en un instante determinado de la posición de un satélite en su órbita, aunque los datos de órbita son controlados y corregidos regularmente y se envían a los receptores en el paquete de datos de efemérides

### 1.1.6.3 Error por la distribución geométrica de los satélites y el receptor

Los receptores consideran la geometría satélites-receptor, debido a que algunas distribuciones espaciales de los satélites pueden afectar la precisión de la medida. Los receptores más avanzados utilizan un factor adimensional llamado (GDOP) Dilución Geométrica de la Posición que les permite escoger los satélites que tengan una buena geometría respecto al receptor.

### 1.1.6.4 Error por la perturbación de la ionósfera

La radiación ultravioleta que proviene del sol, ioniza las moléculas de gas, presentes en esta zona, formando nubes de partículas cargadas eléctricamente que retardan la velocidad de las señales de radio que la atraviesan. Estos errores generalmente se corrigen mediante cálculos en el receptor.



Fig. 6. Propagación de las señales a través de la atmósfera.

#### 1.1.6.5 Error por la perturbación de la tropósfera

La troposfera es la parte más baja de la atmósfera y abarca hasta 50Km de altura. La señal del GPS pasa a través de vapor de agua en la troposfera produciéndose refracciones que reducen la velocidad de la señal.

#### 1.1.6.6 Error por multitrayecto

Además de la señal directa que recibe el receptor, también recibe reflexiones de la misma señal, que llegan indirectamente a la antena del receptor por dos o más trayectorias diferentes. Este efecto multitrayecto se presenta generalmente cerca de grandes edificios y otras elevaciones. Los receptores emplean técnicas de procesamiento digital de Señales y antenas especiales que permiten minimizar este error.

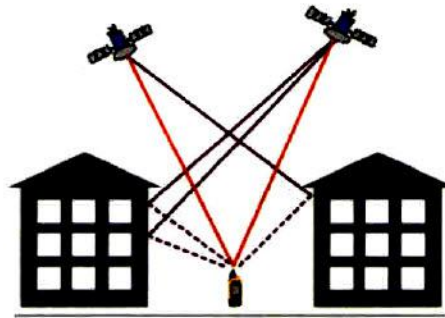


Fig. 7. Interferencia debido al multitrayecto.

### 1.1.6.7 Error por Disponibilidad Selectiva (SA)

La Disponibilidad Selectiva (SA) del inglés (Selective Availability) fue una degradación intencionada de las señales GPS implementadas por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, por razones de seguridad nacional, que provocaba un error aproximado de 50m en la medida.

El 2 de mayo de 2000, se suspendió su uso, promoviendo la utilización del GPS para aplicaciones civiles y comerciales en todo el mundo.

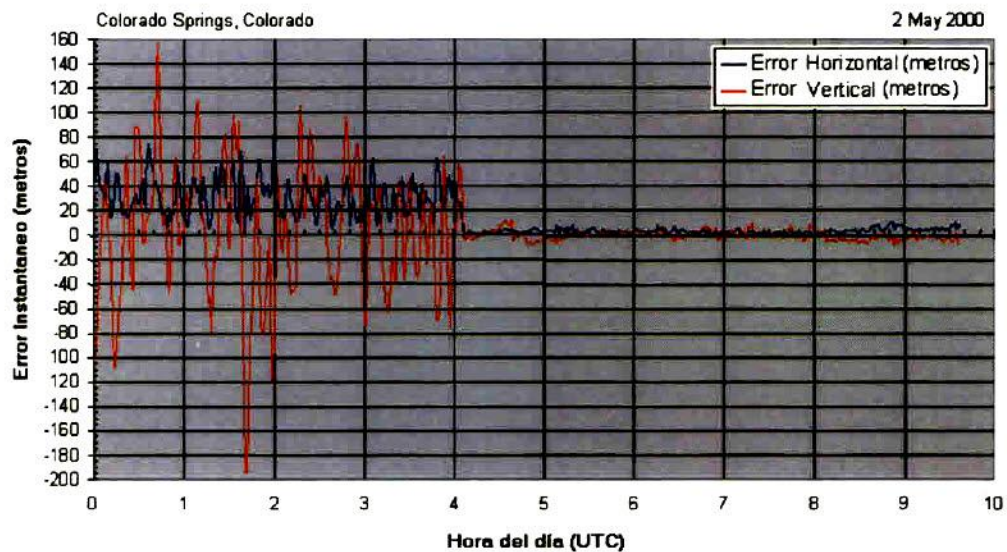


Fig. 8 Precisión del GPS antes y después de la eliminación de la SA.

En la actualidad los errores del sistema GPS pueden resumirse a un error global de  $\pm 15$  metros, y se muestran en el siguiente cuadro.

**Cuadro I. ERRORES DEL SISTEMA GPS.**

<b>Errores del Sistema GPS</b>	<b>Error aproximado</b>
Error por la perturbación de la Ionósfera	$\pm 5$ metros
Error orbital	$\pm 2.5$ metros
Errores en los relojes de los satélites	$\pm 2$ metros
Error por multitrayecto	$\pm 1$ metro
Error por la perturbación de la Troposfera	$\pm 0.5$ metro

**1.1.6.8 Dilución de la Precisión (DOP)**

La Dilución de la Precisión (DOP) del inglés (Dilution Of Precision) es un indicador adimensional que describe la influencia, que tiene la configuración de la posición espacial de los satélites con respecto al receptor GPS, sobre la precisión de la medición.

Cuando el valor DOP es alto, indica que satélites están muy cercanos entre sí por lo que disminuye la precisión. En cambio si los satélites son distantes, la precisión aumenta.

Están definidas otros factores de diluciones de precisiones que ofrecen información de la exactitud relativa de la posición como la Dilución de la Precisión Horizontal (HDOP), Dilución de la Precisión Vertical (VDOP), Dilución de la Precisión del Posicionamiento (PDOP) y el de tiempo (TDOP) ofreciendo así un valor dentro de cada uno de estos aspectos.



**Cuadro II. VALORES DE DILUCIÓN DE LA PRECISIÓN.**

<b>Valor DOP</b>	<b>Descripción</b>
1	Máxima Precisión posible en todo momento.
1-2	Mediciones precisas para aplicaciones más sensibles.
2-5	Mediciones de posición fiables
5-10	Se recomienda una visión más abierta del cielo.
10-20	Mediciones con grado de confianza bajo.
Mayor de 20	Mediciones inexactas.

### **1.2 Sistema de Coordenadas Geográficas**

Un Sistema de Coordenadas Geográficas se basa en una superficie esférica tridimensional en donde se trazan líneas imaginarias sobre la tierra, para definir ubicaciones sobre la misma. Se compone de una unidad de medida angular, un meridiano principal (meridiano de Greenwich), y un Datum (basado en un esferoide). Una coordenada geográfica hace referencia a los valores de longitud y latitud.

### 1.2.1 Latitud y Longitud

Latitud y longitud son ángulos medidos desde el centro de la Tierra hasta un punto de la superficie terrestre. Los ángulos se miden en grados, o en grados, minutos y segundos. La Latitud es el arco medido desde el Ecuador, hacia el Norte o hacia el Sur, al punto donde se encuentra el observador ( $0-90^\circ$ ). La longitud va de polo a polo y divide la línea del Ecuador de ( $0-180^\circ$ ) hacia el Este u Oeste.

En el sistema basado en esferoide, las líneas horizontales son de igual latitud o paralelos y las líneas verticales son de igual longitud, o meridianos.

La línea a la mitad de camino entre los polos es la línea de latitud cero es el Ecuador, y la línea de longitud cero es el Meridiano de Greenwich. El lugar donde se cruzan estas dos líneas es el origen (0,0) del Sistemas de Coordenadas.

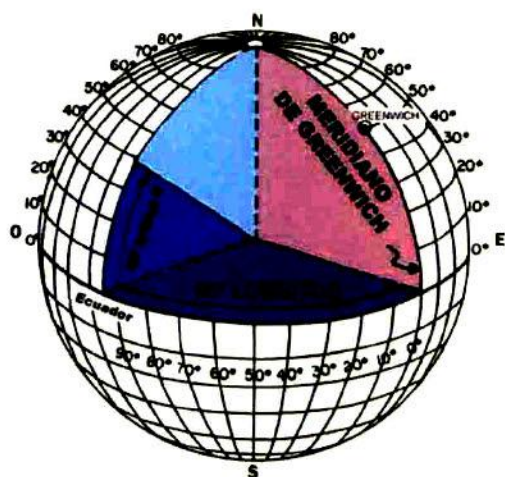


Fig. 9. Sistema de Coordenadas Geográficas.



### 1.2.2 Sistema de Coordenadas UTM

El Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) es una aplicación especializada de la Proyección Transversal de Mercator. En este sistema la tierra está dividida en 60 zonas norte y sur, llamadas husos, numeradas del 1 a 60, partiendo del meridiano de Greenwich, abarcando cada huso  $6^\circ$  de longitud. Cada zona tiene su propio meridiano central. Los límites de la proyección son  $84^\circ\text{N}$  y  $80^\circ\text{S}$ , con la división entre las zonas norte y zonas sur en el ecuador.

Cada huso está dividido en 20 bandas. Las bandas (C, D, E, F, G, H, J, K, L, M) están en el Hemisferio Sur y las bandas (N, P, Q, R, S, T, U, V, W, X) están en el hemisferio Norte. Las regiones polares utilizan el Sistema Estereográfico Polar Universal (Universal Polar Stereographic- UPS).

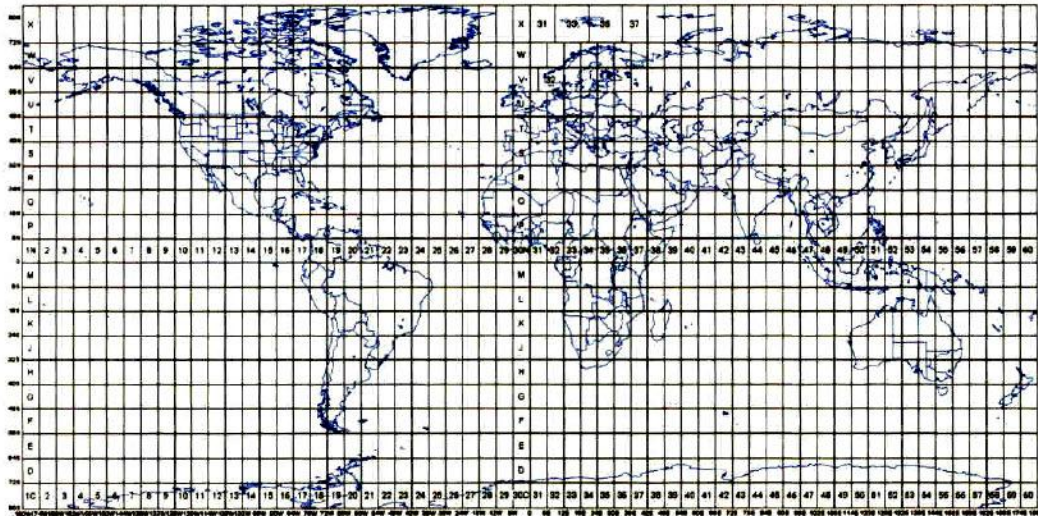


Fig. 10. Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator.

El origen del sistema es diferente para cada huso. El origen de cada zona es la intersección del meridiano central y el Ecuador. Para eliminar coordenadas negativas, el sistema de coordenadas altera los valores de coordenadas en el origen.

En el hemisferio Norte el origen del sistema de coordenadas, se le asigna un valor en X de 500,000 metros y en Y 0 metros.

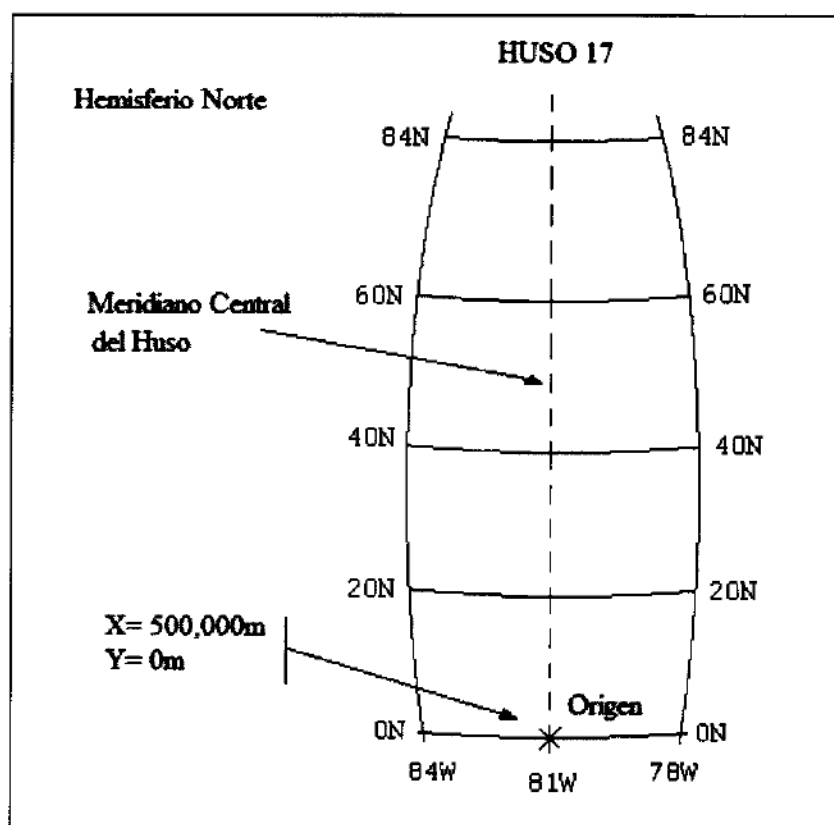


Fig. 11. Origen de Coordenadas UTM en el Hemisferio Norte en el Huso 17.

El valor dado al meridiano central es un falso Este, y el valor asignado al Ecuador es un falso Norte. Se aplica un falso Este de 500.000 metros. La zona Norte tiene un falso Norte de cero, mientras que la zona Sur tiene un falso Norte de 10.000.000 metros.

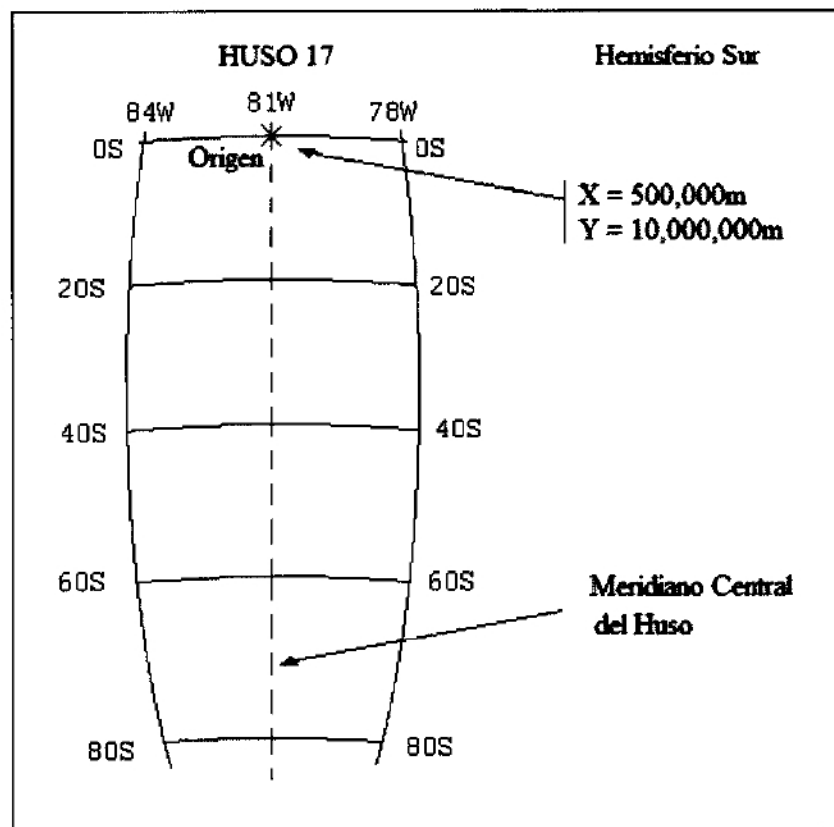


Fig. 12. Origen de Coordenadas UTM en el Hemisferio Sur en el Huso 17.

### 1.2.3 Coordenada UTM

El sistema representa una coordenada con los valores X y Y.

X=660713.66 m Y=992988.38m Huso= 17 Zona=P Datum =WGS84

Las unidades se pueden expresar en metros o kilómetros. La zona permite identificar si es hemisferio Norte o Sur. El huso identifica la longitud y el Datum define el origen del Sistema de Coordenadas, quedando de la siguiente forma:

17P 660713.66 E 992988.38 N

Para el desarrollo de este trabajo consideramos el Datum WGS84.

#### **1.2.4 Datum**

Un datum se utiliza para definir la posición de un esferoide con relación al centro de la tierra. De esta manera provee una referencia para medir los puntos en la superficie terrestre además de fijar el origen y la ubicación de las líneas de latitud y longitud.

Cuando se cambia el datum o el sistema de coordenadas geográficas, los valores de trabajo utilizaremos el datum WGS84.

1

#### **1.3 Filtro de Kalman**

En el año de 1960, Rudolf E. Kalman propuso una aproximación para obtener estimaciones estadísticas de señales estacionarias y no estacionarias de una forma óptima. La aproximación de Kalman describe una solución recursiva al problema de filtrado lineal de datos discretos. Es un método matemático que funciona a través de un mecanismo de predicción y corrección. Pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa, añadiendo un valor de corrección proporcional al error de predicción, de manera que este último es minimizado estadísticamente. (Kalman, 1960)

En la actualidad, con el desarrollo de la computación digital, el filtro de Kalman es una herramienta utilizada en numerosas investigaciones y aplicaciones para el procesamiento de señales en comunicaciones, aviación, astronomía, sistemas de control,

modelos económicos, inteligencia artificial y aplicaciones en tiempo real, gracias a que se puede estimar una señal en forma óptima a través de una observación ruidosa.

### 1.3.1 Algoritmo del Filtro de Kalman

El algoritmo de Kalman para estimar señales aleatorias no estacionarias permite, a través de diferentes algoritmos, obtener una estimación exacta en los modos de operación de estado transitorio y estable.

Los algoritmos pueden ser óptimos, no óptimos, estacionarios y no estacionarios, dependiendo de los coeficientes de las ecuaciones. Es importante señalar que al implementar el filtro de Kalman, se obtienen los mejores resultados solo para los procesos Gaussianos. Si la densidad de probabilidad de una señal o ruido no obedece la ley normal entonces deben aplicarse algoritmos y métodos no lineales.

El proceso para implementar el filtro de Kalman es el siguiente:

Se obtiene una estimación previa del estado en el instante de tiempo  $t$  ( $x_t^-$ ), como una combinación lineal de los elementos del estado en  $t - 1$  ( $x_{t-1}$ )

$$(Ec.1) \quad x_t^- = A \cdot x_{t-1}$$

de manera opcional se le podría agregar cierta entrada de control ( $u_{t-1}$ ).

$$(Ec.2) \quad x_t^- = A \cdot x_{t-1} + B \cdot u_{t-1}$$

La matriz  $A$  llamada matriz de transición, es la que modela el cambio de estado.

Se obtiene una estimación previa de la covarianza ( $P_t^-$ ) del error que creemos haber cometido ( $e_t^- = x_t - x_t^-$  el estado real  $x_t$  es desconocido) Teóricamente la covarianza del error se expresa

$$(Ec\ 3) \quad P_t = E[e_t^- \ e_t^{-T}]$$

Como no podemos realizar este cálculo debido a que no conocemos el error cometido entonces procedemos inicialmente a estimarlo o utilizar algún método matemático sobre nuestros datos para obtenerlo

En los pasos siguientes este valor de covarianza se actualizará a partir del paso anterior usando la matriz de transición  $A$  e incluyendo la matriz de covarianza del ruido del proceso así

$$(Ec\ 4) \quad P_t^- = A \ P_{t-1}^+ \ A^T + Q$$

En el instante en que recibimos una medida ( $y_t$ ) proveniente de nuestro equipo de medición podemos estimar de manera más precisa el estado  $x_t^+$

$$(Ec\ 5) \quad x_t^+ = x_t^- + K \ (y_t - H \ x_t^-)$$

Para obtener el estado  $x_t^+$  calculamos previamente la matriz de ganancia  $K$ . La ganancia  $K$  minimiza el error en la estimación del estado posterior  $x_t^+$ . La fórmula simplificada para obtener la Ganancia es

$$(Ec\ 6) \quad K_t = P_t^- H^T \ (H P_t^- H^T + R)^{-1}$$

Estos nuevos datos nos ayudan a mejorar la estimación de la covarianza del error  $P_t$

$$(Ec\ 7) \quad P_t^+ = (I - K_t \ H) \ P_t^-$$

Con el objetivo de simplificar los cálculos obviemos la entrada de control ( $u_{t-1}$ ) de la (Ecuación 2). El proceso que se sigue en el filtro de Kalman se muestra a continuación

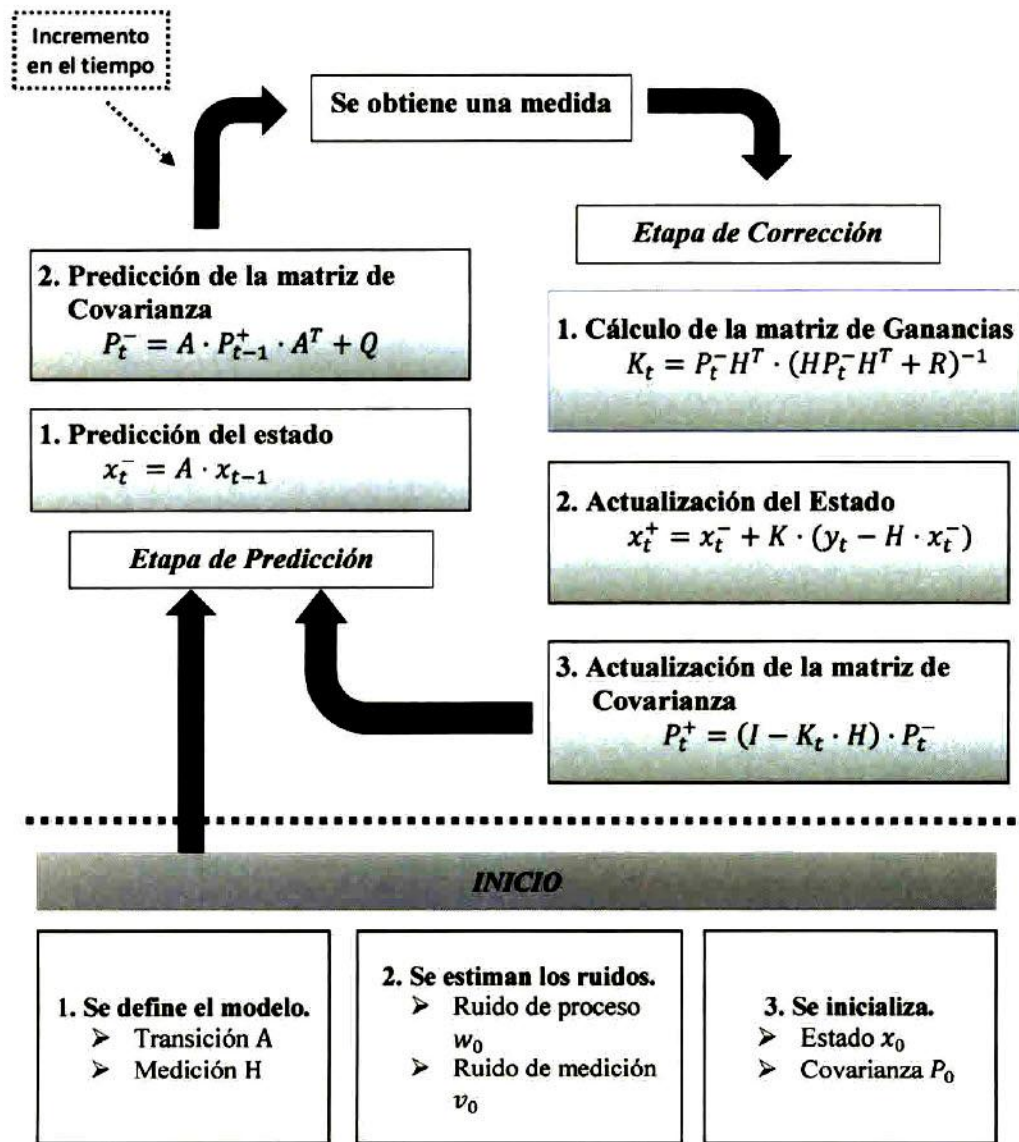


Fig. 13. Funcionamiento del Filtro de Kalman

El filtro de Kalman devuelve una solución óptima si se cumple con que los modelos de transición y medida sean lineales, y que los ruidos sean gaussianos de media cero.

## **CAPITULO II DEFINICIÓN DEL PROBLEMA METODOLOGIA Y HERRAMIENTAS**

### **2.1 Definición del Problema**

En la actualidad los teléfonos inteligentes (Smartphone) permiten obtener nuestra posición geográfica mediante el GPS que traen incorporado pero con un margen de error aproximado de 5 a 15 metros. Para obtener las coordenadas geográficas de una trayectoria determinada con una buena precisión es necesario adquirir un GPS profesional y utilizar servicios de corrección que resultan ser costosos. Este estudio permitiría reducir el margen de error y poner al alcance esta herramienta para el desarrollo de aplicaciones para teléfonos móviles en diferentes áreas como agricultura, geodesia, topografía, seguridad, localización y demás a bajo costo.

### **2.2 Objetivo General y Objetivos Específicos**

Una vez presentada la definición del problema, pasamos a continuación con la definición de los objetivos de nuestra investigación.

#### **2.2.1 Objetivo General**

- Mejorar la precisión de un receptor GPS de teléfono celular en la estimación de las coordenadas geográficas de una trayectoria, mediante la aplicación del Filtro de Kalman.



### **2.2.2 Objetivo Específicos**

- Mejorar la precisión de la lectura de GPS
- Concluir sobre las capacidades del filtro de Kalman y su adecuación para la solución de problemas de posicionamiento por GPS

### **2.3 Metodología de la Investigación**

Para el desarrollo de esta investigación seleccionamos el método de medición de la posición de un vehículo a lo largo de la trayectoria entre dos puntos. Este vehículo describe un movimiento rectilíneo uniforme sobre un plano en un tiempo determinado. Esta elección presenta cierto grado de dificultad en cuanto a que no se tiene una redundancia en las mediciones de los diferentes puntos de la trayectoria, que si se tratara de la medición de un solo punto.

Utilizamos un vehículo a control remoto sobre el cual fijamos el teléfono móvil con su receptor GPS incorporado. Este vehículo permitió realizar las mediciones en línea recta y a velocidad constante.



Fig. 14. Vehículo y Trayectoria de la Investigación

Las mediciones se llevaron a cabo en diferentes momentos del día y por consiguiente diferentes configuraciones geométricas de los satélites disponibles.

Este estudio se realizó en el Estadio Oscar Suman Carrillo de la Universidad de Panamá, en Vía Transístmica, ya que brinda la ventaja de tener una pista plana y poder realizar las mediciones a cielo abierto.



Fig. 15. Sitio de las mediciones, Estadio Oscar Suman Carrillo

## 2.4 Herramientas utilizadas

A continuación presentamos las herramientas hardware y software utilizados para el desarrollo de esta investigación.

### 2.4.1 Vehículo a control remoto

Se utilizó un vehículo a control remoto para poder controlar el movimiento uniforme en línea recta. Sobre este vehículo se fijo el teléfono con el receptor GPS.



Fig. 16. Vehículo a control remoto.

#### 2.4.2 Teléfono móvil

Para este estudio, utilizamos un celular Samsung Galaxy S Duos (GT-S7562L), con el Sistema Operativo Android 4.04. (Ice Cream Sandwich) , que tiene incorporado un Chip GPS.



Fig. 17. Samsung Galaxy S Duos (GT-S7562L).

#### 2.4.3 Software GPS Logger

Es un capturador de datos GPS ligero, con poco consumo de batería. El propósito de esta aplicación es registrar las coordenadas GPS a intervalos específicos de tiempo en un archivo en la tarjeta SD. Esta aplicación corre en segundo plano. (Mendhak, 2013)

Está diseñada para teléfonos Android que tengan GPS incorporado. Es de uso libre y está disponible para su descarga en el sitio web de Google Play.



Fig.18. Software GPS Logger.

#### **2.4.4 Software GPS Status & Toolbox**

Es una aplicación para Android que permite controlar el estado del receptor GPS junto con todos los sensores del teléfono celular. El objetivo principal de la aplicación es obtener rápidamente la lectura del GPS, número de satélites disponibles y mostrar gráficamente la configuración geométrica de los satélites disponibles durante su ejecución, así como su valor DOP, HDOP y VDOP de la lectura. (Mobiwia, 2013).



## GPS Status & Toolbox

Fig. 19. Software GPS Status & Toolbox.

### 2.4.5 Matlab

MATLAB<sup>®</sup> es el nombre abreviado de “MATrix LABoratory” que es un lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico con vectores, matrices, números escalares, tanto reales como complejos. Posee la capacidad de realizar una amplia variedad de gráficos en dos y tres dimensiones. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos o aplicaciones. MATLAB posee un conjunto de librerías especializadas llamadas “toolbox” que cubren las principales áreas del mundo de la ingeniería y la simulación tales como procesamiento de señales y comunicaciones, procesamiento de imagen y vídeo, sistemas de control, pruebas y medidas, finanzas computacionales y biología computacional.. (Mathworks, 2011)

Esta característica ha sido de gran utilidad para el desarrollo de nuestra investigación.

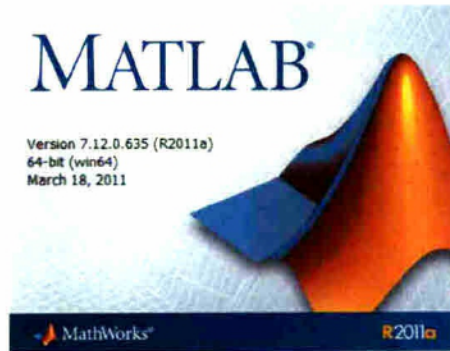


Fig. 20. Software MATLAB versión 7.12

## **CAPITULO III IMPLEMENTACION**

### **3.1 Instalación de aplicaciones**

Instalamos la aplicación *GPS Logger* en el telefono celular para obtener las coordenadas geográficas durante la trayectoria cada segundo y la aplicación *GPS Status* para obtener la distribución de Satélites disponibles durante las mediciones

Se configuró el *GPS Logger* a una frecuencia de muestreo de 1 Hz, con lo que se lograron obtener 101 puntos de la trayectoria

### **3.2 Configuración de la aplicación GPS Logger**

Para obtener las medidas de posición según lo establecido se procedió a configurar los parámetros disponibles dentro de la aplicación

- **TIEMPO ENTRE CADA REGISTRO** Se fijó a 1 segundo
- **TIPO DE REGISTRO** Se seleccionaron los formatos GPX, KML y TXT para que fueran almacenadas las coordenadas en la memoria Micro SD



- **CREACIÓN DE ARCHIVOS:** Se seleccionó crear un nuevo archivo cada vez que inicia la captura de datos.
- **PREFERIR TORRES DE CELULAR:** Se deshabilitó la opción de utilizar las torres de telefonía celular para el posicionamiento. Esto es conocido como AGPS.
- **DISTANCIA MÍNIMA:** Esta función es para fijar el desplazamiento mínimo antes de registrar el siguiente punto. Se fijó en cero para registrar todos los puntos.
- **PRECISIÓN MÍNIMA:** Precisión mínima para registrar un punto. Se fijó en 0 para registrar todos los puntos.

### 3.3 Mediciones

Se realizaron 4 sesiones de medición, espaciadas en el tiempo. Para dar inicio a las mediciones se definió un punto de partida A y se estableció una trayectoria en línea recta y a velocidad constante sobre la superficie plana hasta llegar al punto B.

**Cuadro III. SESIONES DE MEDICIÓN**

Sesión	Fecha	Hora (UTC)
1	21/11/2013	11:55
2	21/11/2013	12:10
3	21/11/2013	12:25
4	21/11/2013	12:40

Las coordenadas se obtuvieron durante condiciones atmosféricas favorables, con una disponibilidad de entre 7 y 8 satélites y con una Dilución de la Precisión menor de 2.2.

La disponibilidad y configuración geométrica de los satélites disponibles, se obtuvieron con la aplicación “GPS Status & Toolbox” y al momento de iniciar las mediciones se tomó una captura de pantalla del celular que se muestra en la (Fig. 21), donde podemos observar que aún con 7 satélites disponibles, y valores muy buenos de la Dilución de la Precisión, DOP, HDOP, VOP de 2.2 / 1.2 / 1.8 respectivamente, el error estimado por el GPS es de 5 metros.

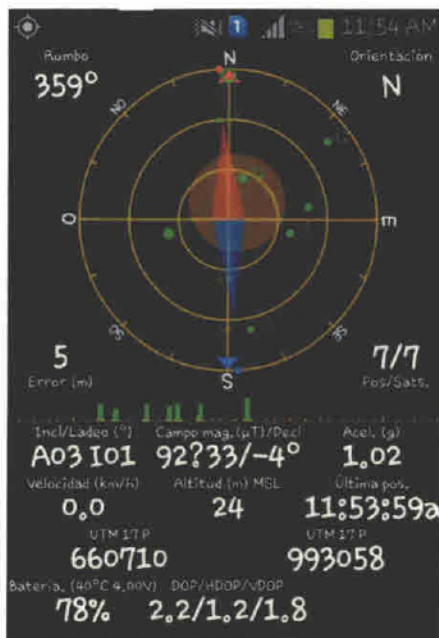


Fig. 21. Captura de pantalla de GPS Status.

### **3.4 Post Proceso**

Una vez obtenidas las coordenadas geográficas expresadas en grados descargamos estos datos al computador y procedimos a convertir estas coordenadas geográficas a coordenadas UTM mediante el uso de MATLAB (Schimel 2012)

Las coordenadas obtenidas corresponden a una proyección Universal Transversal de Mercator (UTM) y el sistema de referencia WGS 84 (Bernath 1987)

Se escribió un código de programación para implementar el Filtro de Kalman en MATLAB y procedimos a introducir estos valores de coordenadas UTM en el código

Al ejecutar el código obtuvimos un vector con las coordenadas estimadas por el filtro de Kalman y procedimos a graficarlas y comparar con las medidas mediante GPS con relación a la trayectoria definida originalmente

#### **3.4.1 Definición del Filtro de Kalman**

A continuación definimos los parámetros relacionados a nuestro Filtro de Kalman. Para cumplir con las condiciones del uso del filtro de Kalman presentamos las siguientes aproximaciones del sistema para trabajar un modelo de transición lineal

Este modelo incluye el vector de estado, la matriz de transición, la función lineal de transición, el vector de medida

En el *vector de estado* se representa la posición y velocidad de nuestro objeto mediante el vector

$$(Ec\ 8) \quad x = \begin{pmatrix} px \\ py \\ vx \\ vy \end{pmatrix}$$

En donde

$px$  es la posición en el eje X

$py$  es la posición en el eje Y

$vx$  es la componente a lo largo del eje X de la velocidad instantánea de desplazamiento

$vy$  es la componente a lo largo del eje Y de la velocidad instantánea de desplazamiento

Luego entonces la *matriz de transición* A esta definida por

$$(Ec\ 9) \quad A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

y la *funcion lineal de transicion* es

$$(Ec\ 10) \quad x_{t+1} = A \ x_t$$

$$(Ec\ 11) \quad \begin{pmatrix} px_{t+1} \\ py_{t+1} \\ vx_{t+1} \\ vy_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} px_t \\ py_t \\ vx_t \\ vy_t \end{pmatrix}$$

La matriz  $H$  sigue un modelo lineal y refleja la obtención de la medida a partir del vector de estado y el vector de medida

$$(Ec\ 12) \quad H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Como hemos establecido que nuestro modelo de estudio es a través de un GPS solamente tenemos las mediciones de la posición de nuestro objeto por consiguiente nuestro *vector de medida* está definido como

$$(Ec\ 13) \quad y_t = \begin{pmatrix} px_{tm} \\ py_{tm} \end{pmatrix}$$

El subíndice  $m$  representa nuestro valor medido a diferencia de los valores en la matriz del vector de estado

Luego la Función lineal de medida es

$$(Ec\ 14) \quad y_t = H \cdot x_t$$

$$(Ec\ 15) \quad \begin{pmatrix} px_{tm} \\ py_{tm} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} px_t \\ py_t \\ vx_t \\ vy_t \end{pmatrix}$$

### 3.4.2 Inicialización del Filtro de Kalman

Para la inicialización del filtro de Kalman se debe inicializar con precaución para evitar un tiempo de estabilización más largo

Para obtener los valores iniciales de posición y velocidad necesitamos detectar al menos dos mediciones de posición (dos valores diferentes para  $z[k]$ )

El vector de medidas no brinda información de velocidad por lo que calculamos

$$(Ec\ 16) \quad X[0] = \begin{bmatrix} px[0] \\ py[0] \\ v_x[0] \\ v_y[0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} px_m[1] \\ py_m[1] \\ \frac{px_m[1]-px_m[0]}{T} \\ \frac{py_m[1]-py_m[0]}{T} \end{bmatrix}$$

en donde  $T$  es el tiempo entre las medida de  $px_m[1]$  y la medida  $px_m[0]$

La covarianza 0 entre la posición y su velocidad y la varianza  $\sigma^2$  del ruido en el sensor GPS nos indica que la matriz de covarianza del error inicial  $P_0$  es

$$(Ec\ 17) \quad P_0 = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Los otros dos parámetros clave en nuestra definición de filtro de Kalman son las matrices  $Q$  y  $R$

En la práctica la covarianza de ruido de proceso  $Q$  y la covarianza de ruido de

medida  $R$  cambian con cada paso o medida pero para este estudio asumimos que se mantienen constantes

$Q$  es la matriz de Covarianza del ruido de proceso en tiempo discreto igual a

$$(Ec\ 18) \quad Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{vx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{vy} \end{pmatrix}$$

en donde asumimos que el ruido en sus componentes de velocidad  $X$  y  $Y$  tienen una distribución normal de media cero y covarianzas iguales  $\sigma_{vx} = \sigma_{vy} = 1$  (Welch & Bishop 2006)

La matriz  $Q$  especifica que tanto confiamos en nuestro modelo. Mientras mayor sea este valor, nuestro modelo es menos confiable, por lo que el uso de valores muy altos nos daría como resultado valores similares a no utilizar el filtro. Este valor de  $Q$  también es muy importante para obtener resultados precisos en nuestra matriz de covarianza del error  $P$ .

En cuanto a la matriz  $R$ , esta es la matriz de covarianza del ruido de medición y está compuesta por las varianzas del modelo de nuestro receptor GPS. Se define como

$$(Ec\ 19) \quad R = \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 \\ 0 & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

Para ajustar la respuesta del filtro de Kalman en cuanto a que tan rápido reacciona a cambios bruscos podemos modificar las especificaciones de los ruidos. De esta manera cuanto mayor es el ruido esperado más suaves serán las predicciones del filtro pero menos rápido reaccionará ante los cambios bruscos.

### **3.5 Coordenadas Geográficas medidas en la trayectoria**

Las lecturas de coordenadas geográficas obtenidas por el receptor GPS a lo largo de la trayectoria se muestran en el siguiente cuadro en formato UTM. Estos valores representan el vector de medida (Ec 13) de nuestro Filtro de Kalman. En el Código de Matlab está definido en los vectores  $X_m$  y  $Y_m$ .



**Cuadro IV COORDENADAS UTM OBTENIDAS EN LA TRAYECTORIA**

<b>Punto</b>	<b>Huso / Zona</b>	<b>X (m)</b>	<b>Y (m)</b>
1	17 P	660711 34	993063 62
2	17 P	660711 24	993061 05
3	17 P	660711 13	993061 40
4	17 P	660711 02	993058 73
5	17 P	660710 91	993056 42
6	17 P	660710 81	993058 06
7	17 P	660710 70	993058 03
8	17 P	660710 59	993053 95
9	17 P	660710 48	993052 40
10	17 P	660709 50	993053 34
11	17 P	660708 52	993049 39
12	17 P	660709 95	993049 42
13	17 P	660711 28	993051 75
14	17 P	660712 16	993047 86
15	17 P	660713 04	993047 97
16	17 P	660713 04	993047 13
17	17 P	660712 94	993042 30
18	17 P	660712 83	993044 37
19	17 P	660713 06	993045 46
20	17 P	660712 73	993043 18
21	17 P	660712 51	993042 76
22	17 P	660712 30	993043 76
23	17 P	660712 19	993044 79
24	17 P	660712 08	993043 46
25	17 P	660712 09	993039 74
26	17 P	660711 98	993041 01
27	17 P	660712 20	993035 29
28	17 P	660712 32	993037 23
29	17 P	660712 43	993036 77
30	17 P	660712 54	993031 77
31	17 P	660712 66	993032 62
32	17 P	660712 77	993030 03
33	17 P	660712 89	993035 48
34	17 P	660713 00	993034 80
35	17 P	660713 00	993034 76
36	17 P	660713 45	993029 96

37	17 P	660713 89	993029 89
38	17 P	660714 33	993031 14
39	17 P	660714 78	993028 24
40	17 P	660715 22	993031 21
41	17 P	660715 66	993026 53
42	17 P	660716 11	993027 98
43	17 P	660716 55	993025 06
44	17 P	660716 99	993024 75
45	17 P	660717 44	993025 19
46	17 P	660717 44	993024 51
47	17 P	660717 11	993020 03
48	17 P	660716 68	993022 07
49	17 P	660716 35	993019 03
50	17 P	660715 91	993017 58
51	17 P	660715 59	993013 45
52	17 P	660715 15	993017 96
53	17 P	660714 83	993015 77
54	17 P	660714 50	993016 15
55	17 P	660714 07	993014 80
56	17 P	660713 74	993011 97
57	17 P	660713 30	993009 98
58	17 P	660713 30	993011 68
59	17 P	660713 09	993010 28
60	17 P	660712 87	993011 78
61	17 P	660712 77	993008 72
62	17 P	660712 55	993008 25
63	17 P	660712 45	993004 70
64	17 P	660712 23	993003 36
65	17 P	660712 01	993005 04
66	17 P	660711 91	993003 76
67	17 P	660711 69	992998 42
68	17 P	660711 80	993003 34
69	17 P	660711 59	992998 83
70	17 P	660711 48	992999 97
71	17 P	660711 37	992996 06
72	17 P	660711 27	992998 18
73	17 P	660711 16	992995 67
74	17 P	660711 05	992996 36
75	17 P	660710 95	992995 75
76	17 P	660710 84	992992 29

77	17 P	660710 73	992994 54
78	17 P	660710 63	992992 79
79	17 P	660710 74	992995 58
80	17 P	660710 96	992989 46
81	17 P	660711 08	992989 66
82	17 P	660711 30	992988 32
83	17 P	660711 41	992987 48
84	17 P	660711 64	992990 09
85	17 P	660711 75	992988 75
86	17 P	660711 97	992985 59
87	17 P	660712 20	992982 00
88	17 P	660712 20	992984 66
89	17 P	660712 31	992981 49
90	17 P	660712 43	992982 03
91	17 P	660712 54	992981 06
92	17 P	660712 65	992982 83
93	17 P	660712 77	992981 49
94	17 P	660712 99	992976 25
95	17 P	660713 11	992973 60
96	17 P	660713 22	992976 40
97	17 P	660713 33	992973 29
98	17 P	660713 45	992975 86
99	17 P	660713 45	992975 44
100	17 P	660713 56	992971 86
101	17 P	660713 68	992974 56

```
R = [ stdMedidaPos^2 ,0;  
      0,stdMedidaPos^2]; %Matriz de covarianza del ruido de medición. (Ec.19)  
%%%%%% FILTRO DE KALMAN%%%%%%%%
```

```

for i = 1:101    %Interacción en función del número de muestras

% ETAPA DE PREDICCIÓN

X = Am*X;          %  $X_t = A * X_{t-1}$  Función lineal de transición (Ec.1)

P = Am*P*Am'+Q;     % Predicción de la Covarianza de error (Ec.4)

Yt = [Xm(i);Ym(i)]; % Vector con las coordenadas de la medición GPS (Ec.13)

% ETAPA DE CORRECCIÓN

K = P*H' / (H*P*H'+R); % Ganancia de Kalman (Ec.6)

X = X + K*(Yt - H*X); % Estimación actualizada con la medición Yt (Ec.5)

P = (eye(4)-K*H)*P'; % Actualización de la Covarianza del Error (Ec.7)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

equiskalman(i) = X(1); % Vector de posición en X estimado por el filtro de Kalman

yekalman(i) = X(2);   % Vector de posición en X estimado por el filtro de Kalman

GK(i) = K(1,1);       % Ganancia de Kalman

end

Xem = Xm - XT; % Error en la medida en X por el GPS, respecto a la trayectoria

Yem = Ym - YT; % Error en la medida en Y por el GPS, respecto a la trayectoria

Xek = XT - equiskalman; % Error en la estimación de X por el Filtro de Kaman

Yek = YT - yekalman;   % Error en la estimación de X por el Filtro de Kaman

```

%%%%%%%%% GRÁFICAS %%%%%%%%%

```
figure(1)
plot(XT,YT,'b.-')
hold on
plot(Xm,Ym,'g.-'),title('Trayectorias')% posicion del Gps
plot(equiskalman,yekalman,'r.-');
Legend('Trayectoria Original','Medición con GPS','Filtro de
Kalman','Location','Northwest')
xlabel('Este, X(m)')
ylabel('Norte, Y (m)')
hold off
grid on;
%%%%%%%%%
```

```
figure(2)
plot(XT,'b.-'), title('Mediciones de X en el Dominio del Tiempo')
hold on
plot(Xm,'g.-');
plot(equiskalman,'r.-');
Legend('Posición en X Original','Medición en X con GPS','X del Filtro de
Kalman','Location','SouthEast')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Este, X(m)')
axis normal
hold off
grid on
%%%%%%%%%
```

```
figure(3)
plot(YT,'b.-'),title('Mediciones de Y en el Dominio del Tiempo')
hold on
plot(Ym,'g.-');
plot(yekalman,'r.-');
Legend('Posición en Y Original','Medición en Y con GPS','Y del Filtro de
Kalman','Location','NorthEast')
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Norte, Y(m)')
axis normal
hold off
grid on
%%%%%%%%%
```

```

figure(4)
plot (Xem,'g.-'),title('Error de Posición Este'); %Diferencia entre X original y X del GPS
hold on
plot (Xek,'r.-'); %Diferencia entre X original y estimada por Kalman
Legend ('Error de posición medida, GPS','Error de posición estimada, FK' , 'Location'
,'NorthEast')
hold off
xlabel ('Tiempo (s)')
ylabel ('Error en la posición Este, X(m)')
axis normal
grid on
%%%%%%%%%%

```

```

figure(5)
plot (Yem,'g.-'),title('Error de Posición Norte');% Diferencia entre Y original y Y del GPS
hold on
plot (Yek,'r.-'); %Diferencia entre Y original y estimada por Kalman
Legend ('Error de posición medida, GPS','Error de posición estimada, FK' , 'Location'
,'NorthEast')
hold off
xlabel ('Tiempo (s)')
ylabel ('Error en la posición Norte, Y(m)')
axis normal
grid on
%%%%%%%%%%

```

```

figure (6)
hist (Xem), title('Histograma del error medido en Este, X')
hold on
xlabel ('Error (m)')
ylabel ('Frecuencia Absoluta')
hold off
grid on;
%%%%%%%%%%

```

```

figure (7)
hist (Xek), title ('Histograma del error estimado Este, X')
hold on
xlabel ('Error (m)')
ylabel ('Frecuencia Absoluta')
hold off
grid on;
%%%%%%%%%%

```



```

figure (8)
hist (Yem), title ('Histograma del error medido Norte, Y')
hold on
xlabel ('Error (m)')
ylabel ('Frecuencia Absoluta')
hold off
grid on;
%%%%%%%%

```

```

figure (9)
hist (Yek), title('Histograma del error estimado Norte, Y')
hold on
xlabel ('Error (m)')
ylabel ('Frecuencia Absoluta')
hold off
grid on;
%%%%%%%%

```

```

figure (10)
stem (GK,'b');
hold on
title ('Ganancia de Kalman');
xlabel ('Tiempo (s)')
ylabel ('Ganancia de Kalman, k');
hold off

```

```

%%%%%%%%%% FIN  %%%%%%%%%%%

```



## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Trayectorias

Una vez capturadas las coordenadas geográficas sobre la trayectoria original, se transformaron a coordenadas UTM y se ingresaron al código de MATLAB para su procesamiento con el filtro de Kalman. El trayecto original inicia en el Punto A, dirigiéndose en línea recta hasta el Punto B, con una dirección en el movimiento de Norte a Sur.

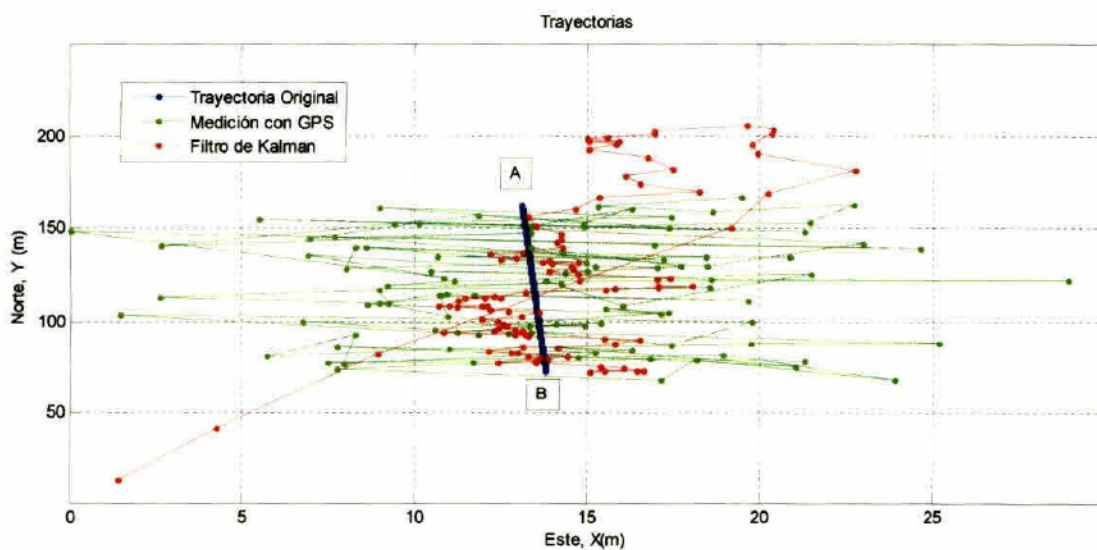


Fig. 22. Trayectorias: original, medida con GPS y estimada con el Filtro de Kalman

En la (Fig.22) podemos observar la implementación del Filtro de Kalman al comparar la trayectoria obtenida del receptor GPS del celular con la trayectoria estimada resultante.

En la trayectoria, obtenida por el receptor GPS del celular, se observa la dispersión de las medidas, debido a cierto ruido aleatorio.

#### 4.2 Mediciones en X y Y en el dominio del tiempo

Dado que el vector de medida  $y^T$  está compuesto por la posición en  $X_m$  y  $Y_m$ , procedemos a graficar por separado las 101 muestras de cada componente de posición para las tres trayectorias.

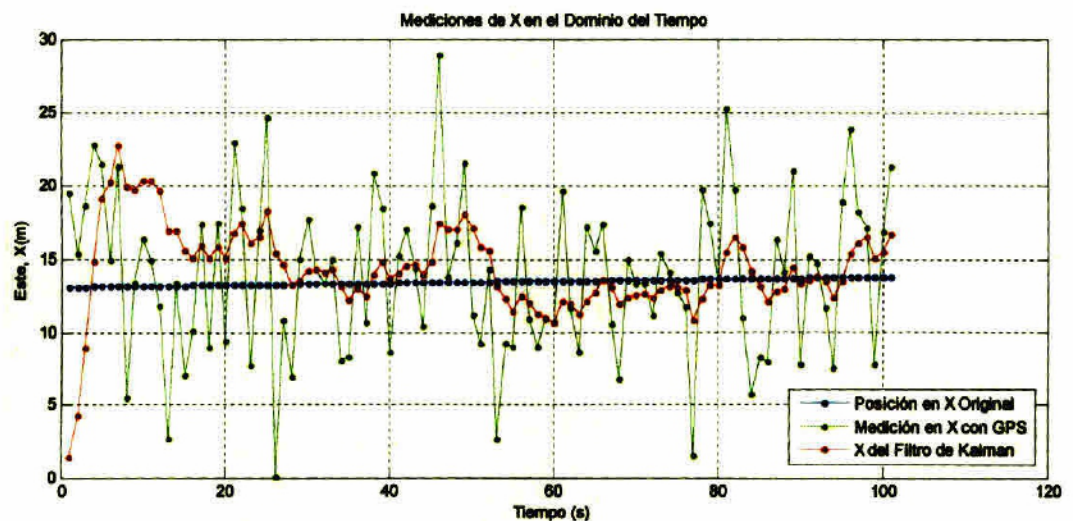


Fig. 23. Muestras de las componentes de posición Este  $X(m)$  de las trayectorias

En la Figura se observan las mediciones de las componentes de la posición al Este  $X(m)$  así como sus estimaciones.

A continuación se visualizan las componentes de la posición al Norte  $Y(m)$  para las trayectorias.

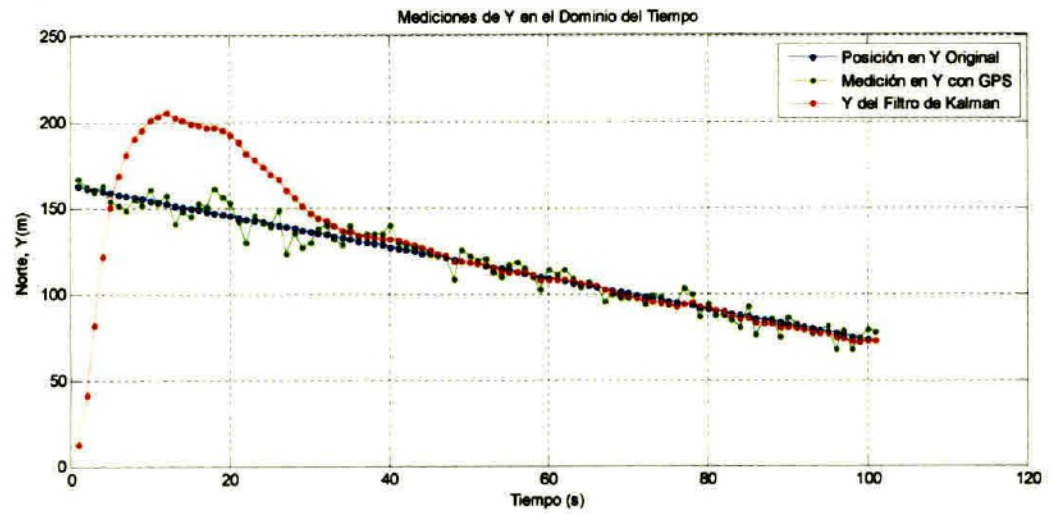


Fig. 24. Muestras de las componentes de posición Norte  $Y(m)$  de las trayectorias

### 4.3 Error en la medida de las componentes Este X(m) y Norte Y (m)

Una vez obtenidas las componentes Este X(m) y Norte Y(m) de las trayectorias procedemos a calcular y graficar el error en la medición del receptor GPS y el error en la estimación del filtro, para cada muestra. Estos valores graficados se muestran a continuación.

#### 4.3.1 Error en la componente Este X(m) de la Posición.

Los valores medidos al Este, tienen un error absoluto máximo de 15.5 metros de la componente X de la trayectoria original, mientras que los valores estimados por el filtro, una vez estabilizado, tienen un error absoluto de 4.6 metros. Representando una mejora de hasta un 70.32 % en la medida Este X(m).

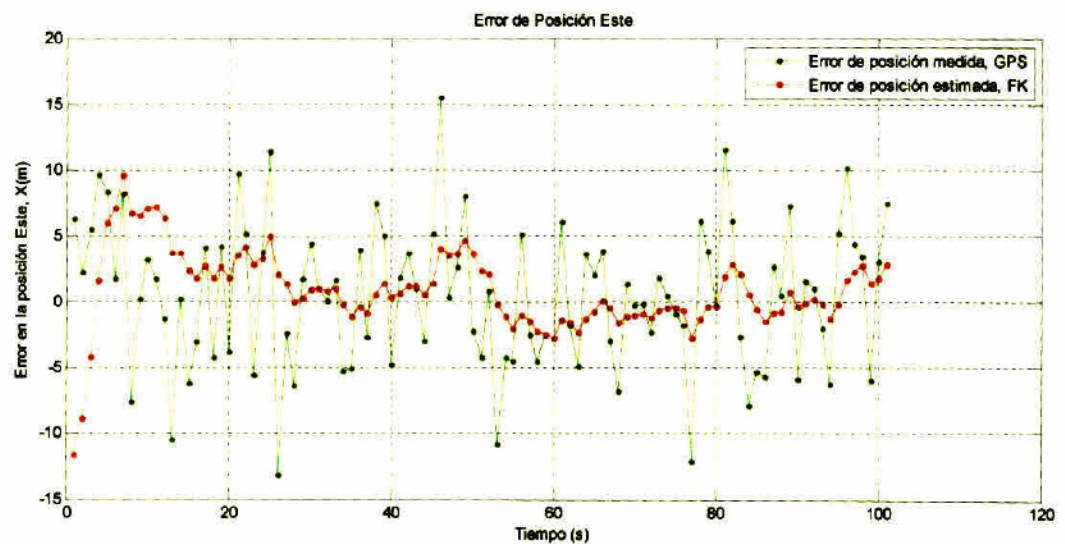


Fig. 25. Error en la componente de posición Este. X(m).



Podemos visualizar una vista más ampliada de la gráfica anterior.

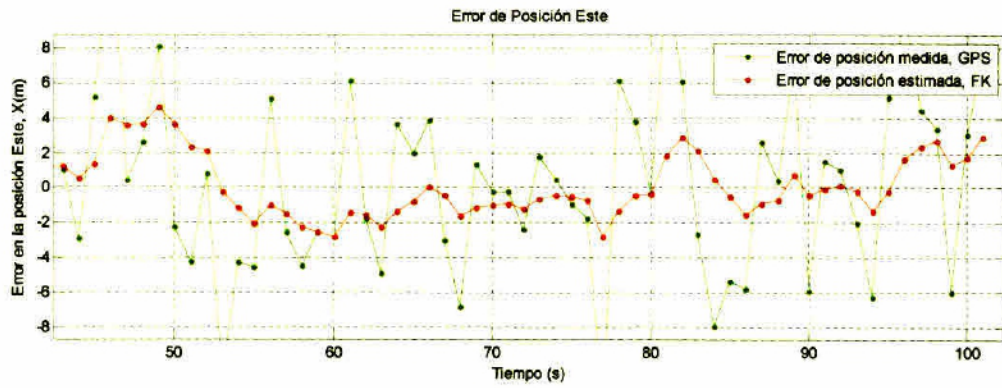


Fig. 26. Vista ampliada del error en la componente de posición Este.  $X(m)$ .

**Cuadro V. ERROR ABSOLUTO DE LAS MEDICIONES AL ESTE.**

<b>ESTE</b>	<b>Máximo Error Absoluto (m)</b>
<b>Valores medidos con GPS</b>	15.5
<b>Valores estimados con Kalman</b>	4.6

#### 4.3.2 Error en la componente Norte Y(m) de la posición.

Los valores medidos al Norte Y(m), reflejan una error absoluto máximo de 15.2 metros en la componente Y con respecto a la trayectoria original. Los valores estimados por el filtro, una vez estabilizado a partir de los 45 segundos, tienen un error absoluto máximo de 2.2 metros. Estos datos representan una mejora en el posicionamiento en Y de hasta un 85.52%.

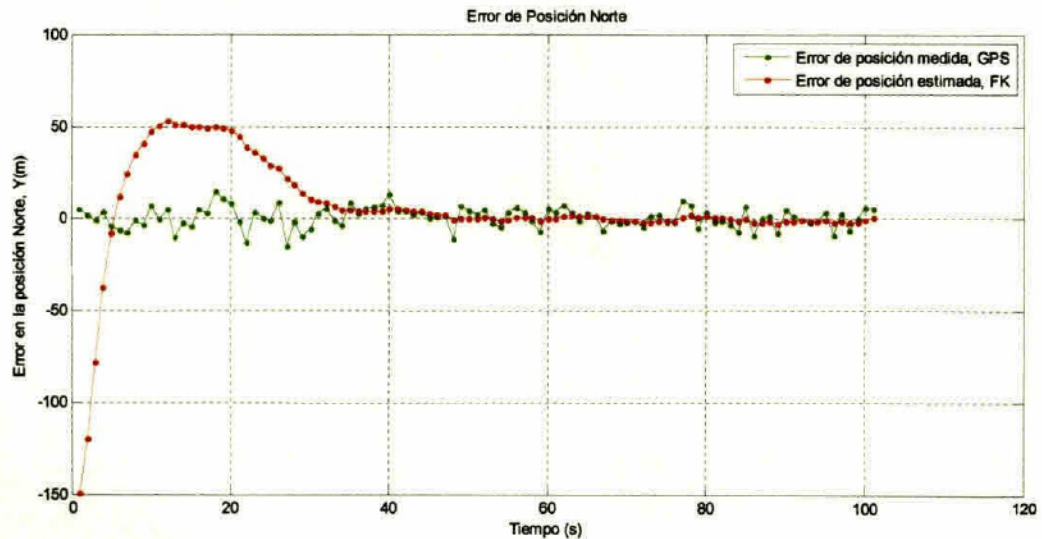


Fig. 27. Error en la componente de posición Norte. Y.(m)

A continuación una vista más ampliada de la gráfica anterior.

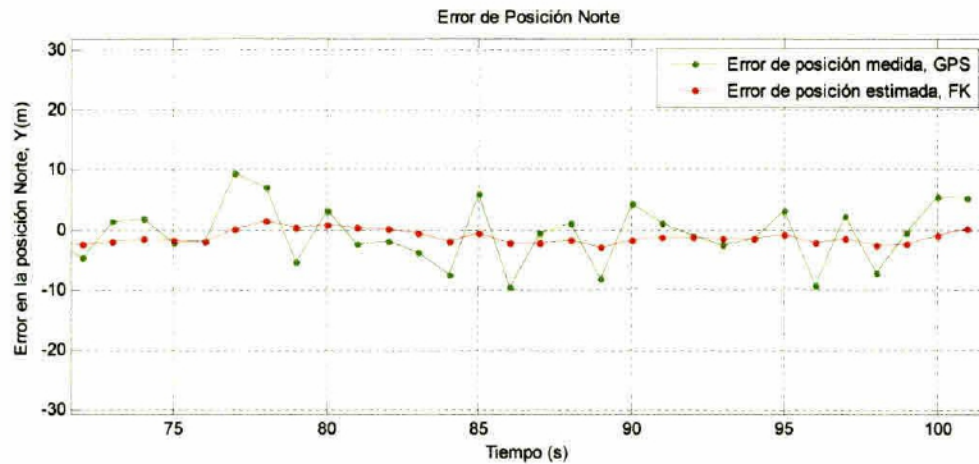


Fig. 28. Vista ampliada del error en la componente de posición Norte. Y(m).

**Cuadro VI. ERROR ABSOLUTO DE LAS MEDICIONES AL NORTE**

NORTE	Máximo Error Absoluto (m)
Valores Medidos con GPS	15.2
Valores Estimados con Kalman	2.2

#### 4.4 Histogramas de Error

Procedemos a analizar los histogramas de los valores de error en las medidas del Receptor GPS en X y Y, así como los histogramas de errores de los valores estimados.

Para este análisis hemos utilizado las 101 muestras que a simple vista se aprecia que tiene una distribución gaussiana.

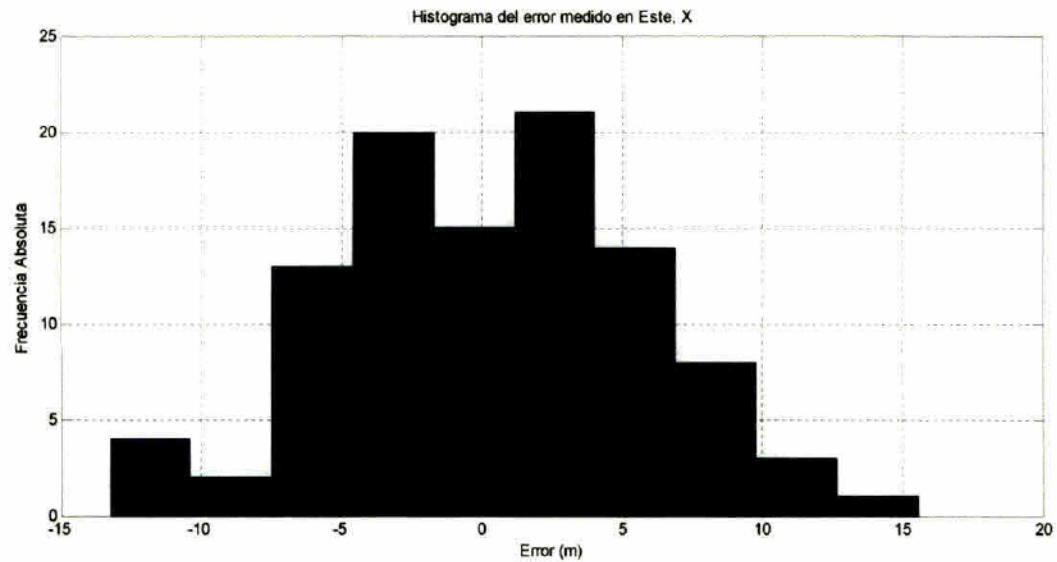


Fig 29. Histograma. Errores de los valores medidos por el GPS, Este X(m)

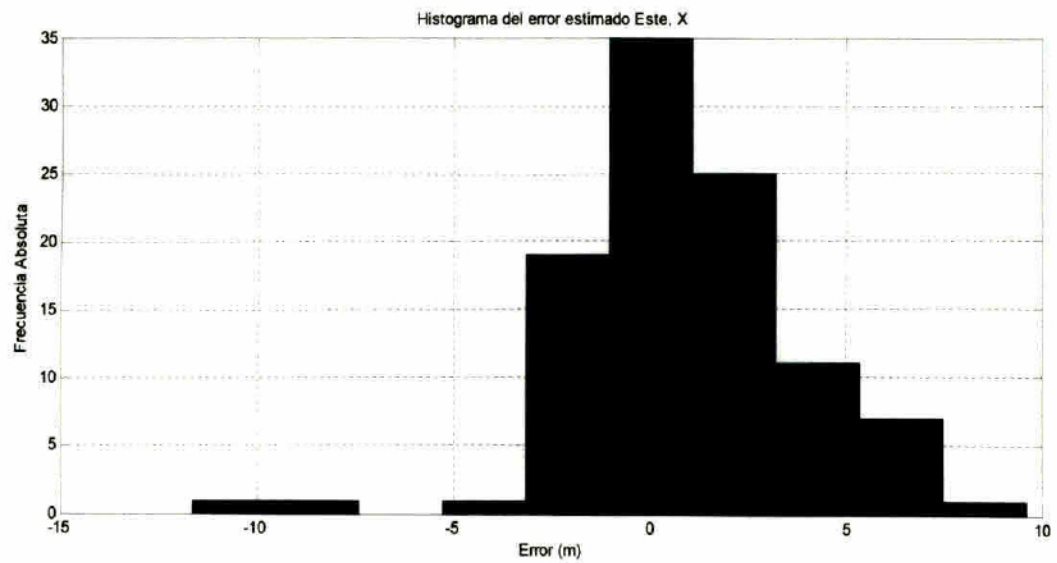


Fig 30. Histograma. Errores de los valores estimados por el Filtro, Este X(m).



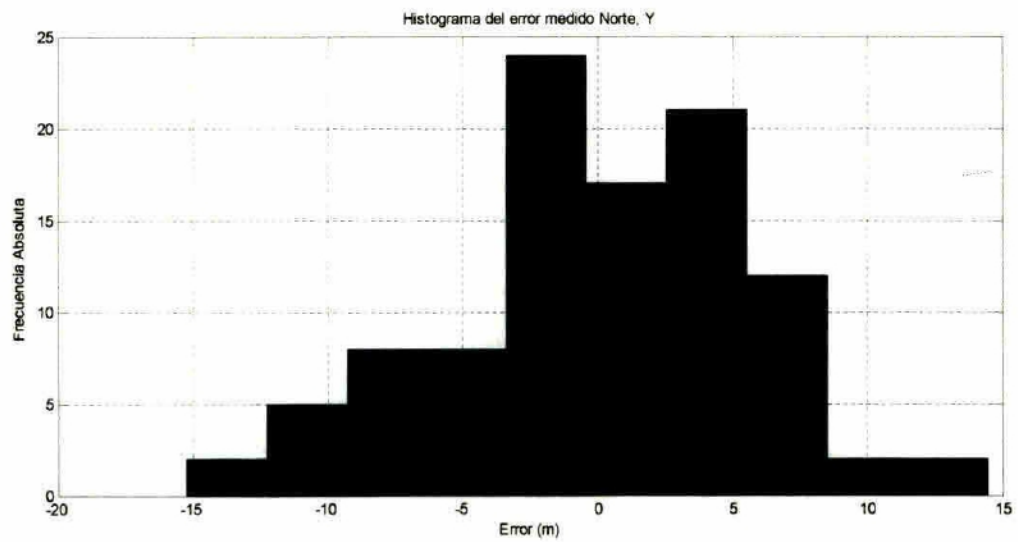


Fig 31. Histograma. Errores de los valores medidos por el GPS, Norte Y(m)

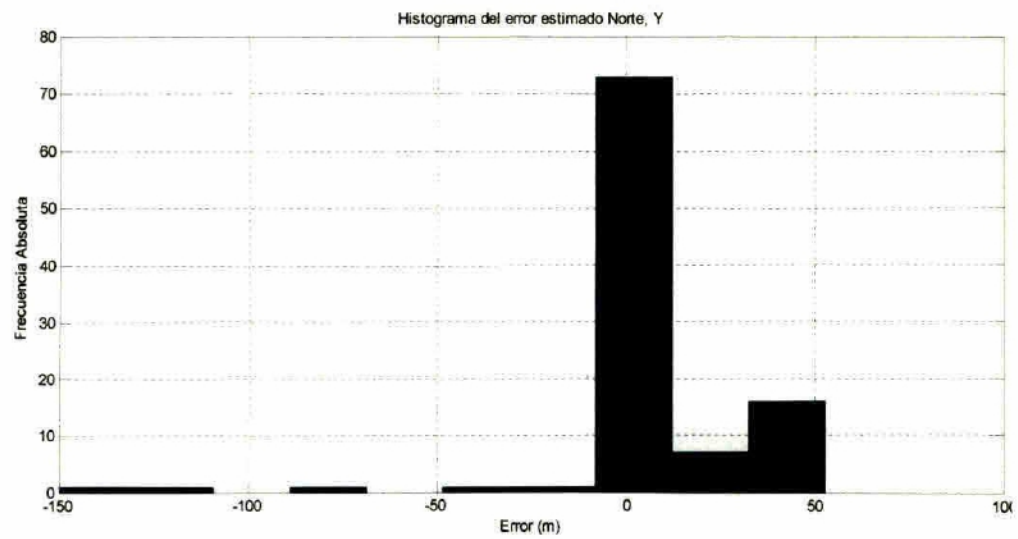


Fig 32. Histograma. Errores de valores estimados por el Filtro, Norte X(m).

Analizando los histogramas de los errores al Este y Norte, observamos que el ancho de la curva de distribución de los errores estimados por Kalman están menos dispersos que el ancho de la curva de distribución de los errores medidos GPS, lo que confirma una mejora en la precisión al aplicar el filtro. Los parámetros calculados en Matlab son la media, la varianza y la desviación estándar, se presentan a continuación.

**Cuadro VII. PARAMETROS DE LOS HISTOGRAMAS AL ESTE.**

	<b>Medidas GPS</b>	<b>Valores Estimados</b>
<b>Media</b>	0.375 m	0.155 M
<b>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>)</b>	5.296 m	1.784 M
<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	28.048 m <sup>2</sup>	3.183 m <sup>2</sup>

**Cuadro VIII. PARAMETROS DE LOS HISTOGRAMAS AL NORTE.**

	<b>Medidas GPS</b>	<b>Valores Estimados</b>
<b>Media</b>	0.383 m	0.079 M
<b>Desviación Estándar (<math>\sigma</math>)</b>	4.888 m	1.931 M
<b>Varianza (<math>\sigma^2</math>)</b>	23.895 m <sup>2</sup>	3.729 m <sup>2</sup>

Observamos que en ambos histogramas, los valores medios, tanto para las medidas GPS como para los valores estimados están muy cercanos, en cambio las varianzas son muy distintas. Lo que significa que las mediciones tienen la misma exactitud pero los valores estimados por el filtro de Kalman son más precisos.

## CONCLUSIONES

En este estudio hemos alcanzado los objetivos propuestos y hemos demostrado que la aplicación del Filtro de Kalman a las lecturas de un receptor GPS mejora la precisión de forma apreciable

Específicamente en esta investigación la precisión del receptor GPS del celular esta entre 5.29m en X y 4.88metros en Y

Podemos concluir que los datos resultantes de la estimación del Filtro de Kalman se aproximan a una precisión de 1.78 metros en X y 1.93 metros en Y

La implementación de esta solución dependera de la precisión que se necesite para determinada aplicación

En lo referente al algoritmo de Kalman los respuesta del filtro se estabiliza relativamente rápido con un bajo numero de muestras pero una muy baja cantidad muestras ocasiona que los resultados no sean muy buenos

La proyección a futuro en esta linea de investigación debe llevar a continuar con diferentes trabajos como adaptar el algoritmo del filtro Kalman a lenguaje Java para ejecutarlo directamente en un teléfono móvil. Desarrollar un sistema de fusión de datos de los sensores disponibles en un celular para corregir los errores de posicionamiento

## BIBLIOGRAFIA

- Bernath D (1987) *Standard UTM to GEO/GEO to UTM Coordinate Conversion Algorithms* Pasadena California U S Army Intelligence Center and School Software Management System
- Fakharian A (2011) *Adaptive Kalman Filtering Based Navigation An IMU/GPS Integration Approach* The Netherlands
- Grimes J G (2007) *Global Positioning System Precise Positioning Service Performance Standard* United States Department of Defense of the United States of America
- Grimes J G (2008) *Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard* United States Department of Defense United States of America
- Kalman R E (1960) *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems* Estados Unidos Journal of Basic Engineering
- Mathworks (2011 Marzo) *Matlab version 7 12* Retrieved from <http://www.mathworks.es/products/matlab/>
- Mendhak (2013 Noviembre) *Google Play* Retrieved from <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mendhak.gpslogger>
- Mobiwia (2013) *GPS Status* Retrieved from <http://mobiwia.com/gpsstatus/intro>
- Mohinder S G and Angus P A (2001) *Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB* 2nd Edition Wiley InterScience
- Olmedillas J C (2013) *Introduccion a los Sistemas de Navegacion por Satelite* España UOC
- Santos M Leandro (2007 February) *Stochastic Models for GPS position – An Empirical Approach* GPS World

Schimel A (2012 Febrero) <http://www.mathworks.es/> Retrieved from [http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14804\\_wgs2utm\\_version2](http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/14804_wgs2utm_version2)

Tolman Brian W (2008) *GPS precise absolute positioning via Kalman filtering* 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation

Welch G & Bishop G (2006) *An Introduction to Kalman Filters* University of North Carolina 16

## **ANEXOS**

## Características del Celular Samsung Galaxy S Duos GTS-7562L

<b>GENERAL</b>	<b><u>Red</u></b>	GSM 850 / 900 / 1800 / 1900 SIM 1 & SIM 2 HSDPA 900 / 2100
<b>TAMANO</b>	<b><u>Dimensiones</u></b>	121.5 x 63.1 x 10.5 mm
	<b><u>Peso</u></b>	120 g
<b>DISPLAY</b>	<b><u>Tipo</u></b>	TFT touchscreen capacitivo 16M colores
	<b><u>Tamaño</u></b>	4.0 x 800 pixels 4.0 pulgadas Sensor acelerómetro para auto rotación Controles sensibles al tacto Soporte multi touch Interfaz de usuario TouchWiz UX
<b>MEMORIA</b>	<b><u>Slot de tarjeta</u></b>	microSD hasta 32GB
		4GB memoria interna, 512MB de RAM Procesador Qualcomm MSM7227A Snapdragon 1GHz, GPU Adreno 200
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b><u>GPRS</u></b>	Si
	<b><u>OS</u></b>	Android OS v4.0.4 Ice Cream Sandwich
	<b><u>Mensajería</u></b>	SMS MMS Email Push Email IM
	<b><u>Cámara</u></b>	5 MP 2592x1944 pixels autofocus flash LED geo-tagging, detección de sonrisa, video FWVGA@30fps cámara frontal VGA  SIM dual (espera simultánea) GPS Brújula digital EDGE 3G HSDPA 7.2Mbps / HSUPA 5.76Mbps Wi-Fi 802.11 b/g/n Bluetooth v3.0 A2DP microUSB 2.0 Reproductor de video MP4/H.264/H.263/WMV

Reproductor de audio  
MP3/WMA/WAV/eAAC+  
Radio FM Stereo con RDS

**BATERIA**

Standard, Li Ion 1500 mAh