

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**Seguimiento de dispositivos móviles en un Sistema de Comunicaciones
Móviles Celulares.**

Santiago David Silva Proaño

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención
del título de Ingeniero Eléctrico en Telecomunicaciones

Quito, abril de 2009

**Universidad San Francisco de Quito
Colegio Politécnico**

HOJA DE APROBACION DE TESIS

**Seguimiento de dispositivos móviles en un Sistema de Comunicaciones Móviles
Celulares.**

Santiago David Silva Proaño

René Játiva, Ph.D.
Director de Tesis y
Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, MS.
Decano del Colegio Politécnico y
Miembro del Comité de Tesis

Vinicio Carrera, DSc.
Profesor del Colegio Politécnico y
Miembro del Comité de Tesis

Daniel Cárdenas, Ph.D.
Profesor del Colegio Politécnico y
Miembro del Comité de Tesis

Nelson Herrera, Ing.
Profesor del Colegio Politécnico y
Miembro del Comité de Tesis

Quito, abril de 2009

© Derechos de autor
Santiago David Silva Proaño
2009

AGRADECIMIENTOS

En todos quienes depositaron su confianza y anhelos en mí y me han apoyado durante todo el largo camino hacia este momento de mi vida les debo mi agradecimiento. En especial a mis padres César y Alba que han sabido formar en mí al hombre y al ser humano capaz de enfrentar los retos y vicisitudes que la vida nos pone enfrente. Finalmente agradezco a todos mis profesores que han contribuido a mi formación, en especial a René Játiva, mentor y guía de este proyecto; y a mis compañeros, quienes han sido parte integral del proceso y del camino para lograr este tan ansiado sueño de convertirme en un profesional.

Resumen

Este proyecto de tesis denominado *Seguimiento de dispositivos móviles en un Sistema de Comunicaciones Móviles Celulares* trata sobre el uso de algoritmos estadísticos para la predicción de señales provenientes de una red celular en aplicaciones de seguimiento del dispositivo móvil y de esa forma conseguir que la red celular esté en capacidad de proporcionar servicios adicionales que podrán ser explotados conforme a las necesidades de los usuarios de la red celular.

Para ello se ha usado el denominado *Filtro de Kalman* que nos permite estimar la señal minimizando el ruido, en base a estadísticas del mismo y al comportamiento de los datos. De esta forma el esquema básico es el de un filtro adaptativo en el tiempo que nos permitirá tener mayor flexibilidad y mejor aproximación de los resultados. Finalmente, se integró todo el esquema desarrollado en esta propuesta para ser visualizado en un programa de mapas en tiempo real, que para este caso fue *Google Earth*, que a su vez ocupó el puesto de servidor geográfico en el desarrollo de este proyecto.

Abstract

This thesis project denominated *Tracking of Mobile Devices in a Cellular Mobile System Communication* talks about the use of statistical algorithms for the prediction of signals received from a cellular network in mobile devices' tracking applications. In this way the cellular network would have the capacity to bring additional services that could be operated according to the needs of the network users.

This work has used *Kalman Filter*, which allows us to estimate signal minimizing the noise, in base of its statistical and data behavior. In this way, the basic scheme is an adaptive filter in the time to have major flexibility and better accuracy for the results. Finally, the entire scheme developed in this proposal was integrated to be visualized in a program of maps in real time, *Google Earth*, which occupied the position of geographic server in the development of this project.

LISTA DE CONTENIDOS

Resumen.....	v
Abstract.....	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS.....	xii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes Históricos.....	3
1.2 Trabajos Previos.....	4
1.3 Algoritmos Adaptativos y Seguimiento: Filtro de Kalman.....	6
1.4 Esquema de las simulaciones	6
1.5 Justificación e Importancia del Proyecto.....	7
1.6 Objetivos.....	7
1.7 Contenido	8
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
2.1 Redes UMTS	10
2.1.1 Arquitectura del Servicio de Localización en el Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS).....	10
2.1.2 Procedimientos para la petición del Servicio de Localización en UMTS.....	12
2.2 Servicios Basados en Posicionamiento	13
2.2.1 Nacimiento de los servicios basados en localización.....	14
2.3 Localización mediante la técnica del ToA.....	16
2.3.1 Linealización de la técnica del ToA con la aproximación de Torrieri.....	18
2.3.2 GDOP (<i>Geometric Dilution of precision</i>) para la técnica del ToA.....	18
2.4 Localización mediante la técnica del TDoA	19
2.4.1 Linealización de la técnica del TDoA con la aproximación de Torrieri.....	20
2.4.2 GDOP (<i>Geometric Dilution of precision</i>) para la técnica del TDoA	21
2.5 Generalidades del Filtro de Kalman	21
2.5.1 Introducción al Filtro de Kalman.....	21
2.5.2 Explicación del proceso de estimación del Filtro de Kalman.....	22
2.5.3 Análisis de las matrices de covarianza para el Filtro de Kalman	25
2.5.4 Determinación experimental de la varianza del proceso	26
2.5.5 Valor experimental de las varianzas de la velocidad.....	27
2.6 Uso de la información geográfica en <i>Google Earth</i>	29

2.6.1	Lenguaje KML y su relación con XML y HTML.....	30
2.6.2	Creación de un archivo KML	30
2.6.3	Ejemplo de programación en lenguaje KML	30
2.7	Sistema de Coordenadas	32
2.7.1	Coordenadas Geográficas.....	32
2.7.2	Coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).....	33
3	FUNCIONAMIENTO Y DESARROLLO.....	35
3.1	Funcionamiento General del esquema de simulación.....	35
3.1.1	Aproximación y explicaciones iniciales	35
3.1.2	Obtención de la posición geográfica de la ruta y de las estaciones base	35
3.1.3	Proceso de obtención de los datos usando <i>MapTool</i> y <i>Google Earth</i>	36
3.1.4	Proceso de lectura de los archivos de datos	40
3.2	Diagrama General del proceso de simulación.....	42
3.2.1	Localización mediante la técnica del ToA aproximada con Torrieri	43
3.2.2	Localización mediante la técnica del ToA de forma gráfica.....	46
3.2.3	Filtrado de Kalman de los datos.....	47
3.2.4	Conexión con el servidor de <i>Google Earth</i>	48
4	DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS	50
4.1	Pre-diseño del experimento.....	50
4.1.1	Análisis de la trayectoria obtenida a partir de la herramienta <i>MapTool</i>	52
4.1.2	Determinación del Error de cuantificación	53
4.1.3	Suavizado de la curva mediante Matlab.....	54
4.2	Validación de los programas utilizados	55
4.3	Localización iterativa de un mismo punto mediante ToA y TDoA.....	57
4.4	Área de Pruebas	57
4.4.1	Explicación del escenario de pruebas	59
4.5	Inicialización de la aproximación de Torrieri y Filtro de Kalman.....	59
4.6	Variables de estudio.....	60
4.7	Experimentos de simulación en escenarios reales para ToA y TDoA con el Filtro de Kalman.....	61
4.8	Presentación de resultados de los experimentos.....	61
4.9	Resumen de los experimentos	64
5	RESULTADOS	65
5.1	Localización iterativa de un mismo punto mediante ToA y TDoA.....	65

5.2	Resultados y presentación de la gráfica cumulativa del error.....	67
5.2.1	Resultados de los experimentos, basado en la técnica de localización.....	67
5.2.2	Resultados de los experimentos posterior al filtro de Kalman.	68
5.2.3	Presentación de las gráficas del error en el proceso de ubicación.....	69
5.2.4	Análisis de los Resultados.....	74
5.2.5	Detalle del Experimento 4 y presentación de los resultados en mapas reales. .	74
6	Conclusiones.....	79
7	Recomendaciones y Trabajo Futuro	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Ilustración de la determinación mediante un sistema basado en GPS y de un sistema basado en red	Pág. 2
Figura 1.2	Fases del estándar E911	Pág. 5
Figura 2.1	Arquitectura del Servicio de Localización en UMTS	Pág. 11
Figura 2.2	Procedimientos Generales de Red para el Posicionamiento en UMTS	Pág. 12
Figura 2.3	Servicio de localización vehicular	Pág. 14
Figura 2.4	Visualización de la técnica del ToA	Pág. 16
Figura 2.5	Visualización de la técnica del ToA con la solución de Torrieri	Pág. 17
Figura 2.6	Disolución Geométrica de la Precisión (GDOP) para el caso de posicionamiento basado en ToA	Pág. 19
Figura 2.7	Esquema del proceso de funcionamiento del Filtro de Kalman	Pág. 22
Figura 2.8	Ecuaciones del Filtro de Kalman	Pág. 25
Figura 2.9	Ejemplo inicial de Filtro de Kalman	Pág. 26
Figura 2.10	Rango de visión para el movimiento del móvil	Pág. 27
Figura 2.11	Varianza en función de la velocidad, con rango de movilidad de 90, 45, 15°	Pág. 28
Figura 2.12	Ventana principal de <i>Google Earth</i>	Pág. 29
Figura 2.13	Programa en lenguaje KLM para visualización en <i>Google Earth</i>	Pág. 30
Figura 2.14	Mapa de la Tierra mostrando las líneas de latitud (horizontales) y longitud (verticales)	Pág. 32
Figura 2.15	Mapa del mundo en proyección transversa de Mercator, centrado sobre el meridiano 45° E y el ecuador	Pág. 34
Figura 3.1	Visualización en <i>Google Earth</i> del Mapa a utilizarse	Pág. 36
Figura 3.2	Ventana de Opciones de <i>Google Earth</i>	Pág. 36
Figura 3.3	Ventana Principal de <i>MapTool</i>	Pág. 37
Figura 3.4	Calibración del Mapa de acuerdo a las coordenadas UTM	Pág. 38
Figura 3.5	Calibración de Mapa en base de las esquinas	Pág. 38
Figura 3.6	Calibración con puntos del mapa en Coordenadas Geográficas	Pág. 39
Figura 3.7	Diagrama del procesamiento de los datos	Pág. 40
Figura 3.8	Diagrama Central del proceso de simulación	Pág. 42
Figura 3.9	Programa para localización mediante la técnica del ToA	Pág. 43
Figura 3.10	Localización Visual mediante la técnica del ToA	Pág. 46
Figura 3.11	Programa para suavizado y seguimiento mediante el Filtro del Kalman	Pág. 47
Figura 3.12	Visualización de la conexión con el servidor de Google Earth, mediante archivos <i>Network Link</i>	Pág. 50
Figura 4.1	Ruta real que se dibujado en <i>Maptool</i> para generar los datos de la trayectoria	Pág. 52
Figura 4.2	Ruta reconstruida a partir del trayecto generado en <i>MapTool</i>	Pág. 53
Figura 4.3	Función de densidad de probabilidad de los valores del error de cuantificación	Pág. 54
Figura 4.4	La ruta reconstruida a partir del trayecto generado en <i>MapTool</i>	Pág. 55
Figura 4.5	Gráfica de la validación de la técnica de localización (ToA con 3BS)	Pág. 56
Figura 4.6	Cuadro de propiedades del Simulados <i>MapTool</i>	Pág. 58
Figura 4.7	Cuadro de propiedades de <i>Maptool</i> ,	Pág. 58
Figura 4.8	Mapa del Sector de Cumbayá con la ruta real dibujadas en <i>MapTool</i>	Pág. 59
Figura 4.9	Inicialización del proceso de estimación en la técnica de Torrieri para ToA ó TDoA	Pág. 60
Figura 4.10	Ruta real de la forma que se la obtiene directamente desde el programa <i>MapTool</i>	Pág. 62
Figura 5.1	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 1	Pág. 69
Figura 5.2	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 2	Pág. 70
Figura 5.3	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 3	Pág. 70
Figura 5.4	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 4	Pág. 71
Figura 5.5	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 5	Pág. 72

Figura 5.6	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 6	Pág. 72
Figura 5.7	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 7	Pág. 73
Figura 5.8	Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 8	Pág. 73
Figura 5.9	Gráfica cumulativa del error en x del experimento 4	Pág. 75
Figura 5.10	Gráfica cumulativa del error en y del experimento 4	Pág. 75
Figura 5.11	Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con ToA 3BS	Pág. 76
Figura 5.12	Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con Kalman	Pág. 76
Figura 5.13	Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con ToA 3BS visualizado en Google Earth	Pág. 77
Figura 5.14	Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con Kalman visualizado en Google Earth	Pág. 77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1	Requerimiento para cada solución de localización, según las normas de la FCC	Pág. 4
Tabla 2.1	Procedimientos de localización	Pág. 12
Tabla 2.2	Tipos de servicios	Pág. 15
Tabla 3.1	Información de los datos ubicados en las variables <i>cell_local</i>	Pág. 41
Tabla 3.2	Información de los datos ubicados en las variables <i>data_track_nearBTS</i> y <i>track_nearBTS</i>	Pág. 41
Tabla 4.1	Equivalencias de velocidades entre diferentes periodos de muestreo	Pág. 51
Tabla 4.2	Variables del programa <i>MapTool</i> para las simulaciones	Pág. 61
Tabla 4.3	Varianzas del proceso en función del ángulo de movilidad	Pág. 63
Tabla 4.4	Resumen de los experimentos	Pág. 64
Tabla 5.1	Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante ToA con 4 Estaciones Base	Pág. 65
Tabla 5.2	Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante ToA con 3 Estaciones Base	Pág. 65
Tabla 5.3	Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante TDoA con 4 Estaciones Base	Pág. 66
Tabla 5.4	Resultados Estadísticos de las señales, basados en la técnica de	Pág. 67
Tabla 5.5	Resultados Estadísticos de las señales usando el Filtrado de Kalman	Pág. 68

1 INTRODUCCIÓN

El interés en determinar la posición de un terminal móvil surgió ante la necesidad de ciertas aplicaciones para ofrecer servicios de emergencia, gestión de flotas, ayuda a la navegación, etc. Siendo la implementación del Estándar Inalámbrico E-911, de La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, el que ha motivado su uso e implementación. Adicionalmente a estos servicios, la determinación de la posición de un terminal móvil es de utilidad para la red, porque posibilita una mejor gestión de recursos de radio y prestación de servicios de localización (LBS: *Location Based Services*). El posicionamiento puede realizarse de dos maneras, utilizando sistemas basados en red, que usan la infraestructura de la red celular existente, o sistemas basados en un terminal que incorpora un dispositivo GPS (*Global Positioning System*) de amplia utilización en la actualidad. De los dos sistemas expuestos el sistema basado en red es el de menor precisión, pero a su vez supone una mayor simplicidad y menor costo para los terminales celulares que desean incorporar un servicio basado en localización.

Actualmente empresas como Nextel, Sprint y Verizon han implementado una solución de localización basados en un receptor GPS en cumplimiento de la normativa E-911 de la FCC, mientras que Cingular y T-Mobile confían en un sistema de triangulación basado en red [1]. Desafortunadamente, estas soluciones E-911 tienen sus defectos. El sistema de GPS necesita un mínimo de tres satélites para determinar la localización del terminal móvil y su exactitud se puede ver disminuida por la vegetación pesada, montañas o edificios altos. El sistema de triangulación basado en red, también tiene sus defectos, porque depende de la potencia de la señal recibida y sincronización de las estaciones base (BS: *Base Station*) así como de la inteligencia de la red para determinar la posición en base a la técnica de localización utilizada, requiere también varias estaciones base para una buena exactitud, lo que se dificulta en áreas rurales y de poca densidad de población [1][2].

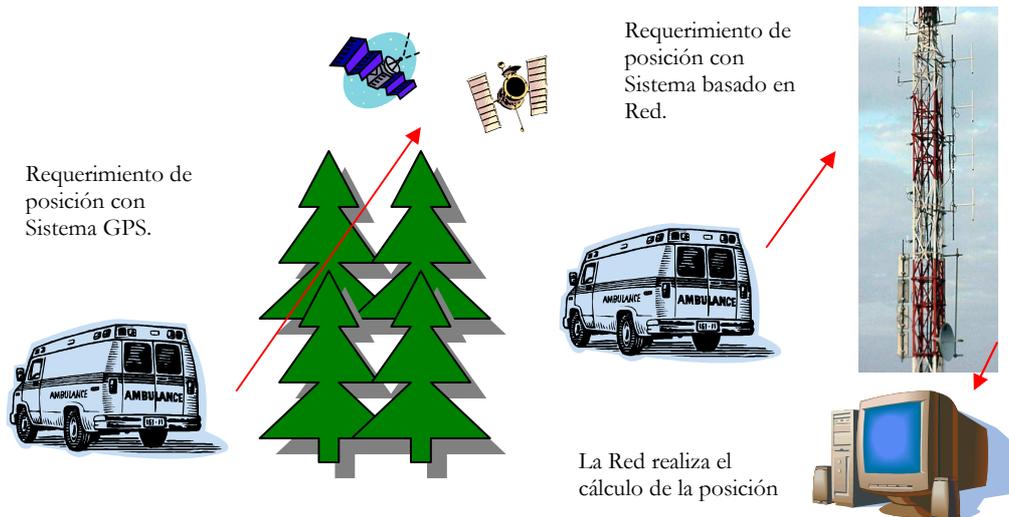


Figura 1.1

Determinación mediante un sistema basado en GPS y de un sistema basado en Red.

Para determinar la posición de los terminales móviles en los sistemas basados en red, existen diferentes técnicas basadas en el nivel de señal recibida, en el tiempo de llegada de las señales (*ToA: Time Of Arrival*), en la diferencia de tiempos de llegada (*TDoA: Time Difference Of Arrival*) o en el ángulo de llegada (*AoA: Angle of Arrival*). Estas técnicas mencionadas son algunas de las que se pueden implementar dentro de un esquema de red, siendo de interés para este trabajo el uso de las técnicas del *ToA* y *TDoA*.

Para las técnicas mencionadas del *ToA* y *TDoA* se usa la solución de Torrieri que asume que el error ϵ , en las mediciones de los tiempos, se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media cero y matriz de covarianza N_ϵ [2]. Gracias a esta asunción es posible realizar simulaciones que modelan este fenómeno y permiten tener los primeros criterios de evaluación para las técnicas basadas en red mencionadas arriba.

Con los datos de posicionamiento que se obtienen de las técnicas basadas en red y siguiendo con el objetivo de este trabajo se introduce los datos en el Filtro de Kalman para continuar con el proceso de seguimiento del dispositivo móvil, adquiriendo de esta forma una aproximación más exacta y que brinda certeza y confianza al sistema. Es por ello que para el caso de seguimiento, el uso del Filtro adaptativo de Kalman es de gran ayuda, porque es una herramienta que modela la relación entre señales en tiempo real de forma iterativa. Se diferencia de los filtros digitales en que éstos últimos tienen coeficientes invariantes en el tiempo, mientras que un adaptativo puede cambiar su comportamiento, es decir, cambia sus coeficientes de acuerdo con la dinámica del problema. De hecho no se

conoce los coeficientes del filtro cuando se lo diseña, estos coeficientes son calculados cuando el filtro se implementa y se reajustan automáticamente en cada iteración mientras dura su fase de aprendizaje. Por esto el Filtro de Kalman es una herramienta ampliamente utilizada para el *tracking* (seguimiento) de diversos tipos de señales, como consta en varias bibliografías y proyectos citados en este trabajo, así como en Internet y materiales de consulta relacionados al tema.

Esta breve introducción explica de manera general sobre los temas que se tratarán a lo largo de estas páginas, además es conveniente mencionar que todos estos conceptos se involucran en la evaluación y desarrollo de aplicaciones en el lenguaje de *Matlab*¹ que permite formular conclusiones, comentarios e ideas para futuros trabajos en este campo.

1.1 Antecedentes Históricos

El crecimiento y la continua demanda de servicios agregados a la telefonía móvil celular se ha convertido hoy en día en un mercado con enormes potencialidades, las mismas que deben ser aprovechadas por las compañías para cumplir con las siempre constantes demandas de sus usuarios. Uno de los servicios que mayor demanda presentan hoy en la actualidad son los de localización de dispositivos móviles. Este tipo de servicio presenta una amplia gama de oportunidades para desarrollar aplicaciones orientadas al usuario y que cumplen con sus diversas necesidades [3].

Una de las primeras iniciativas que dio paso a los servicios basados en localización fue el Estándar Inalámbrico E-911, por parte de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos, el mismo consta de dos partes o fases para obtener información adicional de una llamada al 911. La primera fase consiste en que los proveedores celulares puedan validar la llamada mediante un Punto de Respuesta Público Seguro (PSAP: *Public Safety Answering Point*) y determinan la localización de la antena que ha recibido la llamada. La segunda fase consiste en que los proveedores celulares puedan dar una información de localización con una precisión regida por la solución de localización utilizada [1], como se especifica en la Tabla 1.1.

¹ Matlab es una herramienta computacional usada ampliamente en ingeniería, propiedad de The Mathwork, Inc.

<i>Requerimientos de la FCC</i>	<i>Solución basada en dispositivo GPS</i>	<i>Solución basada en Red</i>
	<i>Localizar llamadas celulares al número de emergencia a:</i>	<i>Localizar llamadas celulares al número de emergencia a:</i>
<i>Requerimiento 1</i>	50 metros de distancia en el 67% de sus llamadas.	100 metros de distancia en el 67% de sus llamadas.
<i>Requerimiento 2</i>	150 metros de distancia en el 95% de sus llamadas.	300 metros de distancia en el 95% de sus llamadas.

Tabla 1.1
Requerimiento para cada solución de localización,
Según las normas de la FCC [1].

Según la FCC, la implementación del E911 requiere del desarrollo de nuevas tecnologías en las redes celulares, en las terminales y en los proveedores de servicios, por lo que las posibilidades en este campo están presentes y las soluciones son innumerables [1].

El punto de partida en el estudio de soluciones de ubicación basadas en red es la evolución de las tecnologías móviles celulares que tras alcanzar su tope con tecnologías como CDMA (*Code Division Multiple Acces*) y GSM (*Global Positioning System*) conocidas como tecnologías de segunda generación, evolucionó hacia una tercera generación construida sobre una plataforma digital y que brinda como principal servicio el acceso inalámbrico en varios ámbitos de las redes de telecomunicaciones mediante sistemas terrestres y satelitales que atienden a usuarios móviles y fijos en redes públicas o privadas [4], este sistema actualmente se lo conoce como UMTS (*Universal Mobile Telephone System*).

Los sistemas de tercera generación o mejor conocidos como sistemas 3G es la evolución natural de los sistemas de segunda generación o 2G al ofrecer servicios de voz, datos y video a altas velocidades, y la posibilidad de brindar servicios basados en localización en un contexto más amplio y de mejores prestaciones [4].

1.2 Trabajos Previos

En la Universidad San Francisco de Quito se desarrollaron dos trabajos previos en el campo de los servicios basados en localización, motivando estos a la realización de este trabajo. Siendo *Desarrollo de una aplicación de servicios basados en localización para redes celulares de tipo global system for mobile (GSM) y universal mobile telecommunications system (UMTS) usando el*

emulador *Mobile Positioning System 6.0.1* proveído por la empresa *Ericsson* [5] que con sus resultados y conclusiones en lo relativo a la evaluación de las técnicas de localización ha motivado el estudio de las técnicas de manera más exhaustiva y explicando de forma clara los procedimientos necesarios para la localización.

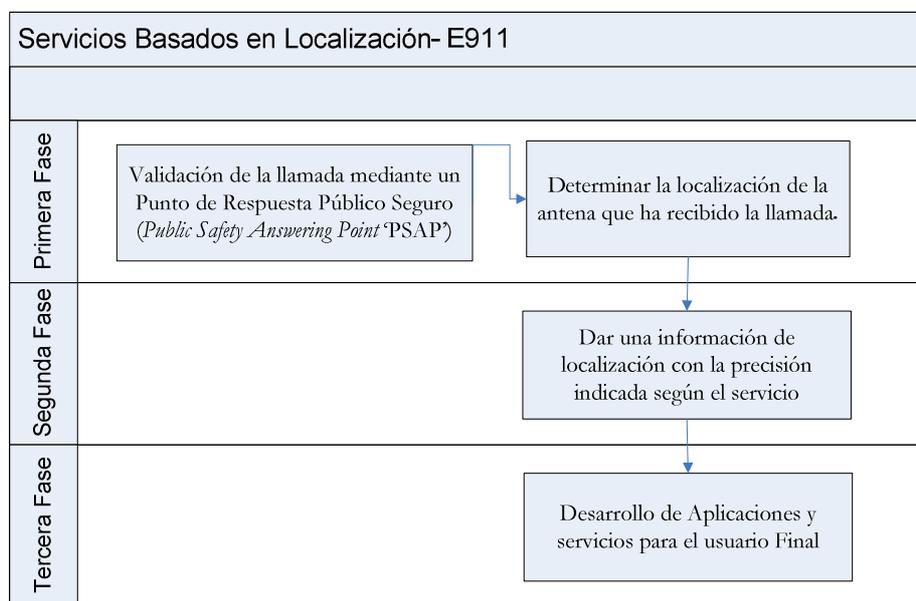


Figura 1.2

Fases del estándar E911,

junto con una tercera fase de desarrollo de aplicaciones que surgiría a raíz de las dos anteriores

Como se puede observar en la Figura 1.2, los servicios basados en localización son una fase posterior al cumplimiento de las exigencias de la FCC con el estándar E911. Dentro de lo desarrollado en la Universidad San Francisco de Quito se ha seguido un orden sui géneris desarrollado primero las aplicaciones de la Fase III y evaluando ciertas técnicas de localización. Es por ello que este proyecto busca dar información teórica de localización, así como de las BS que dan servicio en el momento de requerirse la localización. De esta manera se cumpliría con la fase dos y se deja la posibilidad de estudiar el desarrollo de la fase uno. Todo esto con la primicia de que en el Ecuador las operadoras celulares Allegro PCS, Movistar y Porta no han implementado servicios de localización, y tampoco existen una legislación por parte del CONATEL² y SENATEL³ que las obligue a cumplir con la localización al realizarse una llamada de emergencia [6].

² CONATEL Consejo Nacional de Telecomunicaciones (Ecuador)

³ SENATEL Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (Ecuador)

1.3 Algoritmos Adaptativos y Seguimiento: Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es un algoritmo concebido por Rudolf E. Kalman que provee una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Este filtro es ampliamente utilizado como estimador lineal, cuando se dispone de un conjunto suficiente de ecuaciones que describen el estado de un sistema. A partir de mediciones realizadas en el instante $t-1$, se predice el estado del sistema en el instante t y a partir de los nuevos datos se corrige el modelo de predicción [7]. Este filtro ha demostrado su eficacia y eficiencia en sistemas basados en GPS, principalmente en casos de Sistemas de Navegación Inercial (INS) por lo que su aplicación y estudio es bien recibida justificando su uso en este proyecto. La integración de los GPS con un sistema de navegación inercial (INS) y un Filtro de Kalman proporcionan un resultado global mejorado en toda la navegación. Siendo el Filtro de Kalman una poderosa herramienta que usa los datos estadísticos como alimentación, ayudando a aprovechar las características de los diferentes errores y minimizar las tendencias [8]. Más adelante en este trabajo se detallarán aspectos del Filtro de Kalman que posibilitan su entendimiento y el porque de su inclusión en este proyecto.

1.4 Esquema de las simulaciones

Las simulaciones presentan un escenario en donde se pone a prueba el Filtro de Kalman y las técnicas de localización utilizadas, procurando realizar un aporte significativo sobre el problema de visualización gráfica de los resultados. Para las simulaciones se escogió un área de la ciudad de Quito en condiciones variables para analizar cómo ellas afectan a los resultados. El escenario escogido correspondió a la Avenida Interoceánica, en la cual se puede observar una trayectoria llena de curvas, rectas y hasta redondeles, lo cual enriquece los resultados de las simulaciones.

Los datos previos de la simulación se obtuvieron a partir del programa *MapTool*⁴. Estos datos fueron analizados posteriormente bajo los esquemas previstos sobre el lenguaje de programación de *Matlab*. A partir de los datos recolectados se hicieron análisis estadísticos para buscar información sobre los mismos, encajarlos en nuestro simulador y finalmente estudiarlos de forma apropiada.

Estos resultados se presentaron en mapas reales para tener una apreciación realista de lo que sucede con un usuario móvil; para lo cual se usaron las funcionalidades de visualización

⁴ Maptool es parte de un simulador de Ericsson para desarrollar servicios Basados en Localización.

que nos ofrece *Google Earth* y que han revolucionado el mercado de la información geográfica alrededor del mundo debido a que es un programa de uso libre.

1.5 Justificación e Importancia del Proyecto

Este proyecto intenta formar parte de las investigaciones que se han realizado en la Universidad San Francisco de Quito en el tema de Servicios Basados en Localización aportando soluciones prácticas y concretas, así como dar conclusiones más profundas sobre los resultados de las investigaciones para de esa forma guiar las investigaciones futuras que se realicen en la Universidad.

Además este proyecto hace uso de herramientas de uso libre que fueron evaluadas y ubicadas en un contexto de investigación que permite su posterior uso por estudiantes y profesores para la mejor comprensión de temas relacionados al campo de las comunicaciones móviles.

Como ya se ha detalló anteriormente el uso de herramientas estadísticas que mejoran los resultados obtenidos es una de las principales metas de este proyecto, debido principalmente al aporte significativo de trabajos de investigación desarrollados en la Universidad San Francisco de Quito que han motivado esta iniciativa.

El estudio de soluciones de localización sobre redes celulares presupone el conocimiento de las características de las redes celulares y de los escenarios disponibles para el proyecto. Esto entrega los elementos de juicio que permiten esbozar algunas conclusiones sobre los sistemas actuales de segunda generación y de los sistemas futuros de tercera generación que permiten dar mayor y mejores servicios a los usuarios con necesidades cada vez más crecientes.

Además la intención de programar enteramente esta tesis sobre *Matlab* posibilita que este trabajo sea revisado por otras partes interesadas, y que sea sujeto de análisis y debates de los que se consigan aportes a este campo de estudio.

1.6 Objetivos

El principal objetivo de este proyecto es plantear una solución soportada en el Filtro de Kalman para la localización de suscriptores móviles celulares en sistemas basados en red, haciendo uso de los conocimientos y estudios que se tienen en este campo de investigación.

De forma detallada se presentan los siguientes objetivos como los principales o generales de este trabajo:

- Estudiar exhaustivamente la determinación de posibles servicios basados en localización haciendo uso de esta técnica antes descrita y que podrían ser desarrollados conforme a las necesidades de sus posibles usuarios.
- Estudiar y evaluar las técnicas de localización del ToA: *Time Of Arrival*, y TDoA: *Time Difference Of Arrival* como las posibles herramientas de alimentación del Filtro de Kalman y sus impactos en los resultados finales.
- Hacer uso de una herramienta de uso libre como *Google Earth* para visualizar los resultados después de todas las herramientas estadísticas y además ampliar el conocimiento de esta herramienta que presenta grandes beneficios como servidor de información geográfico para una aplicación.
- Determinar las guías de investigación futura, para trabajos que sigan esta línea y tener un estudio bastante amplio en esta área en la Universidad.
- Finalmente se pondrá a prueba las destrezas y habilidades adquiridas durante la carrera para solucionar los problemas que se presenten en el desarrollo de este proyecto y de esta forma llegar a un trabajo que refleje una solución eficaz al problema de seguimiento de un suscriptor móvil.

1.7 Contenido

Este proyecto de tesis en su primer capítulo presenta información en forma condensada respecto de los conceptos básicos y el marco de desarrollo utilizado para alcanzar los objetivos planteados. Además se presenta la justificación e importancia que tiene como un proyecto de tesis orientado a la obtención de un título universitario. En el segundo capítulo se presentan todos los fundamentos teóricos necesarios para entender el funcionamiento de las simulaciones y el origen de las ecuaciones que han permitido crear el ambiente de trabajo. En el tercer capítulo se explica algunos aspectos del desarrollo sobre *Matlab* y como se integran en diferentes bloques de la tesis para obtener los resultados y conclusiones del presente trabajo, previo al diseño de los experimentos. En el cuarto capítulo se explican los experimentos que se han planteado, previos a la obtención de los resultados y conclusiones respectivas, además se dan detalles de cada experimento

ubicándolos dentro de su contexto y facilitando su reproducción por cualquier persona interesada. En el capítulo cinco se analizan los resultados y se hacen conjeturas sobre los mismos, previo al desarrollo de las conclusiones finales. En el capítulo seis se dan a conocer los resultados explicando los argumentos que sustentan las conclusiones dadas. Finalmente en el capítulo siete se termina con recomendaciones para trabajos futuros sobre esta tesis y se dan pautas de lo que se podría seguir investigando y de las expectativas que se tienen sobre este trabajo.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A lo largo de la tesis se mencionan conceptos y definiciones que permiten entender el desarrollo de este proyecto, por lo que este capítulo se dedica enteramente a aclarar esos fundamentos básicos. Algunos de los puntos a tratarse serán los conceptos de redes UMTS y los procesos para realizar un requerimiento de localización. Luego se analizan los servicios basados en localización y su desarrollo en una red UMTS. En el siguiente punto se explica las técnicas de localización usadas, conjuntamente con el desarrollo matemático y estadístico que permite obtener un estimador inicial de la posición. Además de otros temas necesarios, la introducción inicial hacia el Filtrado de Kalman constará en este capítulo y se enfocará en explicar su funcionamiento y la solución utilizada para el desarrollo de este proyecto.

2.1 Redes UMTS

2.1.1 Arquitectura del Servicio de Localización en el Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS)

UMTS es un concepto propuesto por el Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeo (ETSI) y que propende la normalización de las comunicaciones a escala global, con el objeto de facilitar la interoperabilidad entre sistemas de comunicaciones y el uso de una interfaz de usuario común [2].

El sistema de comunicaciones móviles UMTS está concebido por tres partes principales: el equipo de usuario (UE), la red de acceso radio (RAN: *Radio Acces Network*) y el núcleo de red (CN: *Core Network*). Siendo este último el encargado de transportar datos y de la señalización, contiene la inteligencia del sistema y conecta la red UMTS a otras redes como son la red pública conmutada (PSTN: *Public Switching Telephone Network*).

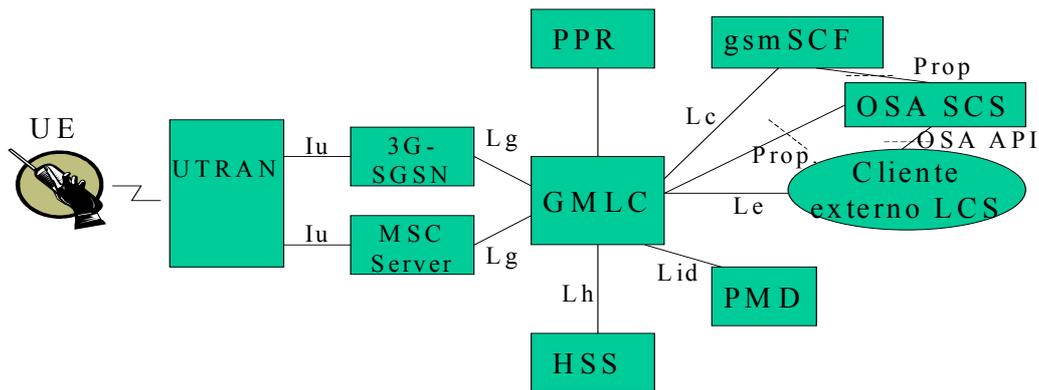


Figura 2.1
Arquitectura del Servicio de Localización en UMTS [2].

En la figura 2.1 se muestra la arquitectura del servicio de localización en UMTS, e ilustra la relación de los clientes de localización y los servidores en el núcleo de red con la red de acceso radio terrestre universal (UTRAN: *UMTS Terrestrial Acces Network*). Las entidades de localización en la red de acceso radio se comunican con el núcleo de red a través de la interfaz Iu, y entre ellas haciendo uso de las capacidades de la propia red de acceso. Los clientes de localización pueden solicitar la información de localización del usuario como parte de su servicio u operación, y pueden estar asociados a la red UMTS o a la red de acceso. Los requerimientos de localización se los realiza al servidor de localización y estos son autenticados previamente antes de recibir respuesta. Posteriormente se entrega la posición estimada al cliente conjuntamente con una estimación de su exactitud y el momento (*time-of-day*) en que se realizó todo el proceso. Dentro del núcleo o en las entidades asociadas al mismo se llevan a cabo operaciones de validación y procesos de autenticación de quienes realizan los requerimientos de localización. Entre otras operaciones que tiene a cargo el núcleo está la de determinar un cierto nivel de calidad de servicio, facturación e información para el cliente [2].

2.1.2 Procedimientos para la petición del Servicio de Localización en UMTS

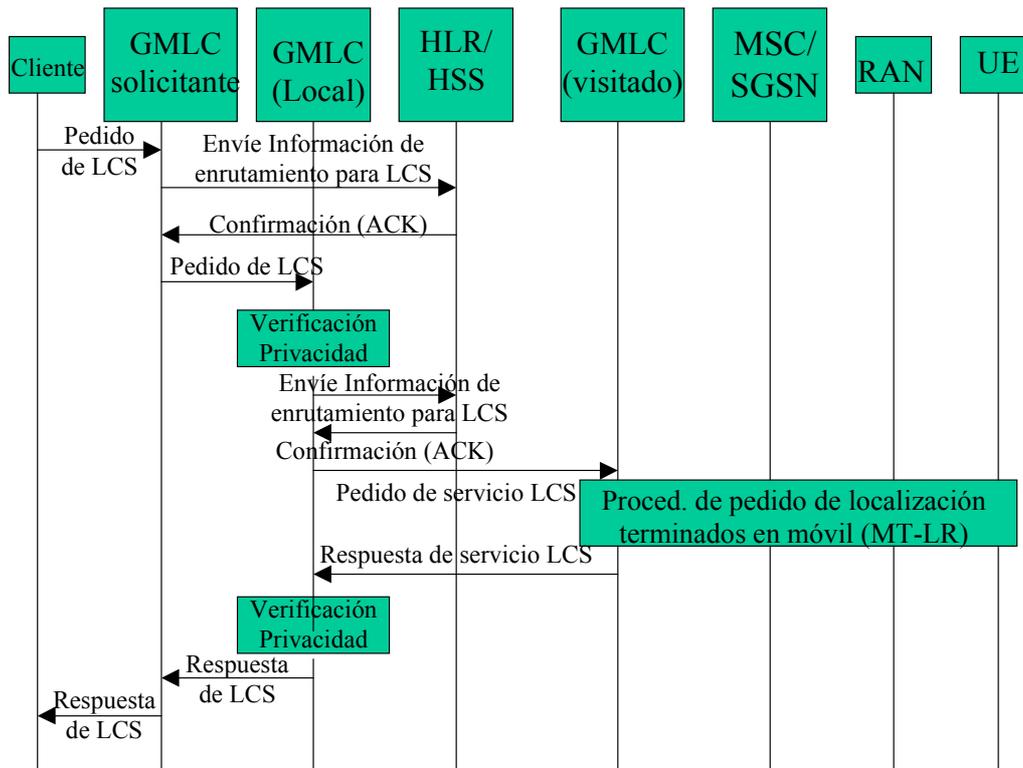


Figura 2.2

Procedimientos Generales de Red para el Posicionamiento en UMTS [2].

Los procedimientos generales de red disponibles para proveer la información de localización de un equipo de usuario son de tres tipos y se ilustran en la Tabla 2.1.

Procedimientos para proveer información de localización	
<i>1. Procedimientos de preparación de la localización.</i>	Encargados de validar el requerimiento, hacer verificaciones de privacidad y seguridad, reservar los recursos necesarios y elegir el método de posicionamiento adecuado
<i>2. Procedimientos de establecimiento de las medidas de posicionamiento.</i>	Se encargan del proceso de obtención de las medidas
<i>3. Procedimientos de cálculo de la posición y liberación.</i>	Encargados de realizar el cálculo de la posición a partir de las mediciones obtenidas

Tabla 2.1

Procedimientos de localización

El procedimiento se inicia con el pedido de un cliente externo solicitando la localización de una unidad móvil a una GMLC (*Gateway Mobile Location Center*). La solicitud a la GMLC (*Request-GMLC*) verifica la identidad del cliente de localización y su suscripción al servicio requerido, y obtiene una identificación adecuada del usuario a ser localizado y la calidad de servicio requerida a partir de la información de suscripción o directamente obtiene esa información del cliente. La identificación del UE (*User Equipment*) puede ser una dirección MSISDN (*Mobile Station Integrated Digital Services Network*), IMSI (*International Mobile Subscriber Identity*), PDP (*Packet Data Protocol*), o un seudónimo. Si la dirección de la GMLC local (*Host-GMLC*) no puede deducirse del seudónimo, la R-GMLC determina la identidad accediendo al dispositivo de mediación de seudónimos (PMD). La R-GMLC indaga al HLR/HSS (*Home Location Register*) por la información de enrutamiento para el pedido de localización. Si la R-GMLC tiene autorización para solicitar esta información recibe en contestación alguna de las direcciones de red del nodo SGSN (*Service GPRS Support Node*) y/o del servidor VMSC/MSC (*Mobile Switching Center*). También se le proporciona la dirección de la H-GMLC y las direcciones del registro del perfil de privacidad (PPR) y de la V-GMLC si están disponibles. La R-GMLC hace el pedido de localización a la H-GMLC. Esta última se informa sobre la información de enrutamiento del HLR/HSS y envía el pedido de localización a la puerta GMLC correspondiente al área visitada por el UE (V-GMLC). La puerta V-GMLC invoca los procedimientos adecuados conforme el pedido esté asociado a una sesión del servicio de paquetes o a una llamada de conmutación de circuitos. Una vez obtenida la respuesta del servicio de localización la puerta V-GMLC la envía a la puerta local H-GMLC donde se realiza una verificación de privacidad si es pertinente, y entonces se envía a la puerta R-GMLC, la cual se encarga de entregarla al cliente de localización [2].

2.2 Servicios Basados en Posicionamiento

Los servicios basados en localización (LBS) se han convertido en un creciente mercado de las telecomunicaciones, el teléfono móvil ofrece la posibilidad de acceder al Internet y también de obtener ciertos servicios ligados a la posición del usuario, mediante triangulación pasiva, que forma parte de las técnicas que se han mencionado brevemente en el capítulo 1. En muchas ocasiones, los servicios de navegación y localización van unidos, para ilustrar esta idea se puede pensar en una empresa de prestación de información, que permitirá al usuario acceder a una base de datos de contenidos en función de sus requerimientos (hoteles, ocio, comidas, etc). El sistema utilizará localización para ubicar el

teléfono móvil, y posteriormente el cliente accederá a los contenidos que hayan sido elegidos mediante navegación WAP [5][9][10]. Es cierto que esta información puede recibirse también en un terminal móvil mediante mensajes, lo cual amplía el universo de usuarios que pueden acceder a estos servicios sin tener teléfonos de última generación.⁵ También se puede considerar el caso de una definición más amplia de los LBS como cualquier servicio o aplicación que suministra tratamiento de información espacial o capacidades de Sistema de Información Geográfica (GIS), a un usuario final a través de Internet y/o redes inalámbricas de comunicación [2][9].

En la Figura 2.3 se puede observar de un ejemplo de solicitud de información geográfica por parte de un móvil, la misma que puede ser devuelta al solicitante o se visualiza en un cliente externo de acuerdo a las necesidades que se tengan para ese caso específico.

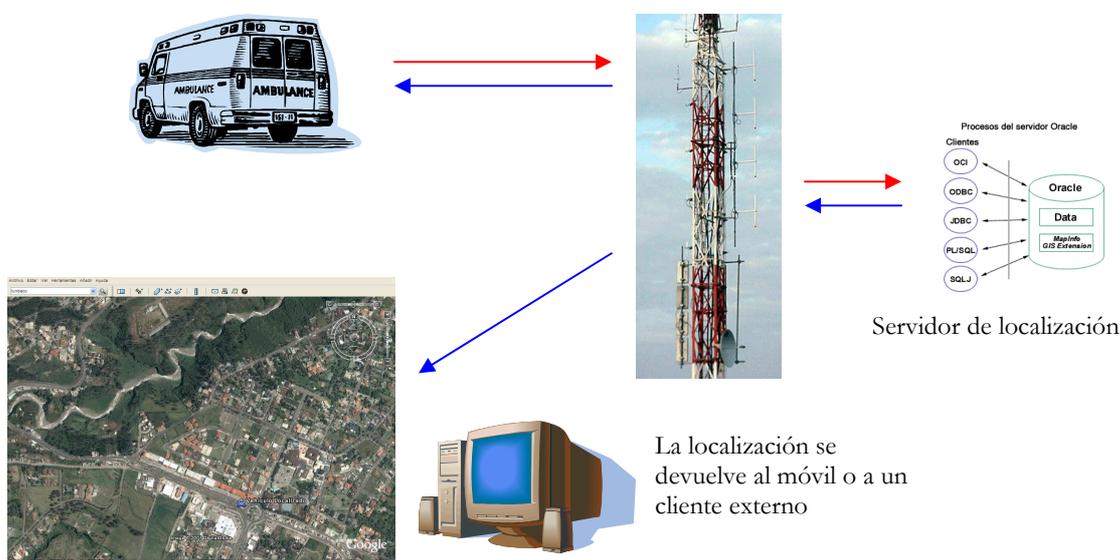


Figura 2.3
Servicio de localización móvil,
en el que se incorpora un Servidor de Información Geográfica (GIS)

2.2.1 Nacimiento de los servicios basados en localización

El nacimiento de los Servicios basados en localización se debe en gran medida a una iniciativa nacida en EEUU, a raíz de un mandato legislativo promulgado por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC: *Federal Communications Commission*). La FCC decidió que a partir de diciembre de 2005 las operadoras de telefonía tendrían que ser capaces de localizar automáticamente a cualquier persona que efectuara una llamada de emergencia con un

⁵ Para más información sobre el desarrollo e implementación de aplicaciones para servicios basados en localización se puede consultar [10]

rango de precisión en base al esquema utilizado, como se explica en la introducción del capítulo 1 [1][10].

Los servicios de localización no se limitan únicamente a aplicaciones de tipo comercial, aunque es en este sector donde se espera que tenga su mayor campo de aplicación y desarrollo. Además la misma red se ve beneficiada ya que puede hacer uso de los LBS para mejorar su desempeño, y con fines de seguridad como es el caso de una localización de emergencia o el servicio legal de interceptación. Los servicios basados en localización pueden clasificarse en tres tipos según la forma en que se accede a ellos: “*Push*”, “*Pull*” y “*Telemetría*” [2].

<i>Tipo de Servicio</i>	<i>Explicación</i>	<i>Ejemplos</i>
<i>“Pull”</i>	Proporcionan la información de localización requerida por el usuario del servicio justo en el momento en que este la solicita.	Sistemas de asistencia a la navegación, que además establecen una ruta hacia el destino especificado. Además despliegan información de direcciones de farmacias, centros comerciales, gasolineras, etc.
<i>“Push”</i>	Utilizan la posición del usuario para calificarlo como un cliente potencial o receptor de un servicio.	Se usan eventualmente para enviar publicidad, ofertas, promociones. Además alertan de la presencia de otros usuarios definidos dentro de los parámetros de afinidad, como padres, hijos, amigos, etc.
<i>Telemetría</i>	Transmite periódicamente su posición, conjuntamente con información de estado al proveedor de servicio.	Podemos mencionar entre ellos a máquinas de refrescos, sistemas de aire acondicionado, y sistemas de seguridad vehicular.

Tabla 2.2

Tipos de servicios según parámetros de lo ofrecido al cliente

2.3 Localización mediante la técnica del ToA

En la técnica de localización conocida como ToA, el objetivo es conocer la distancia entre el móvil (MS) y la estación base (BS), para ello se miden el tiempo de propagación de la señal que toma en llegar desde la MS a la BS y se lo multiplica por la velocidad de la luz [11]. Esto permite plantear un esquema en el que se triangula la posición del móvil en base a la distancia y así obtener la localización del móvil dentro de la red celular [12].

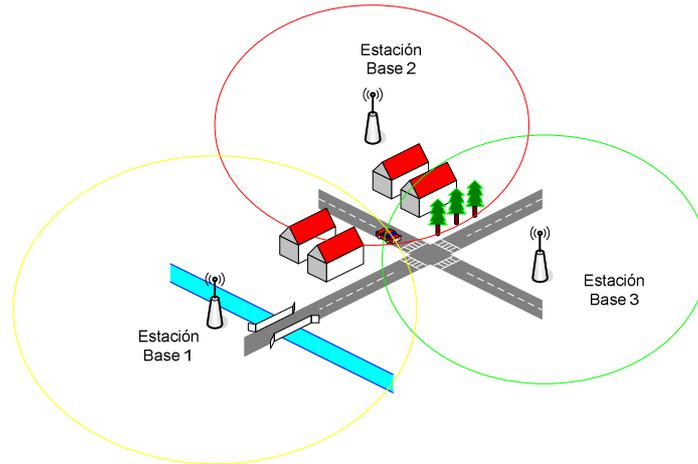


Figura 2.4
Visualización de la técnica del ToA.

Como se observa en la Figura 2.4 el automóvil hace un requerimiento de posicionamiento y la red calcula su posición con la técnica del ToA, la misma que resulta en el punto de intersección de las tres circunferencias trazadas. Ahora bien se va a asumir que la medición de los tiempos de llegada entre la MS y la BS toma la siguiente forma debido a la introducción de errores asociados a la propagación y a la técnica de estimación utilizada:

$$t_i = \frac{d_i}{c} + e_i \quad (\text{Ec. 2.3.1})$$

donde, d_i es la distancia del dispositivo móvil a la estación base más cercana y es una componente del vector de distancias $\mathbf{d} = [d_1, d_2, \dots, d_n]$, e_i viene del vector \mathbf{e} asociado al error de la estimación de \mathbf{t} ($\mathbf{t} = [t_1, t_2, \dots, t_n]$), y c es la velocidad de la luz, pudiendo i tomar valores de 1,2,... hasta n ($n =$ número de Estaciones Base). De lo cual se puede determinar la distancia d_i de la siguiente forma:

$$d_i = \| \mathbf{r} - \mathbf{s}_i \| = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (\text{Ec. 2.3.2})$$

Donde $\mathbf{r} = [x \ y]^T$ tiene la estimación inicial de la posición y $\mathbf{s}_i = [x_i \ y_i]^T$ tiene las coordenadas de estación base BS_i . De todo esto se concluye que el tiempo de llegada para una estación base BS_i viene dado de la forma:

$$\mathbf{t} = \mathbf{d}/c + \mathbf{e} = \mathbf{f}(\mathbf{r}) + \mathbf{e} \quad (\text{Ec. 2.3.3})$$

La dificultad en la solución del sistema expresado por la ecuación (2.3.3) radica en que $\mathbf{f}(\mathbf{r})$ no es una función lineal, como se observa en la ecuación 2.3.2, y que además se desconoce \mathbf{e} y tiene características estocásticas [12].

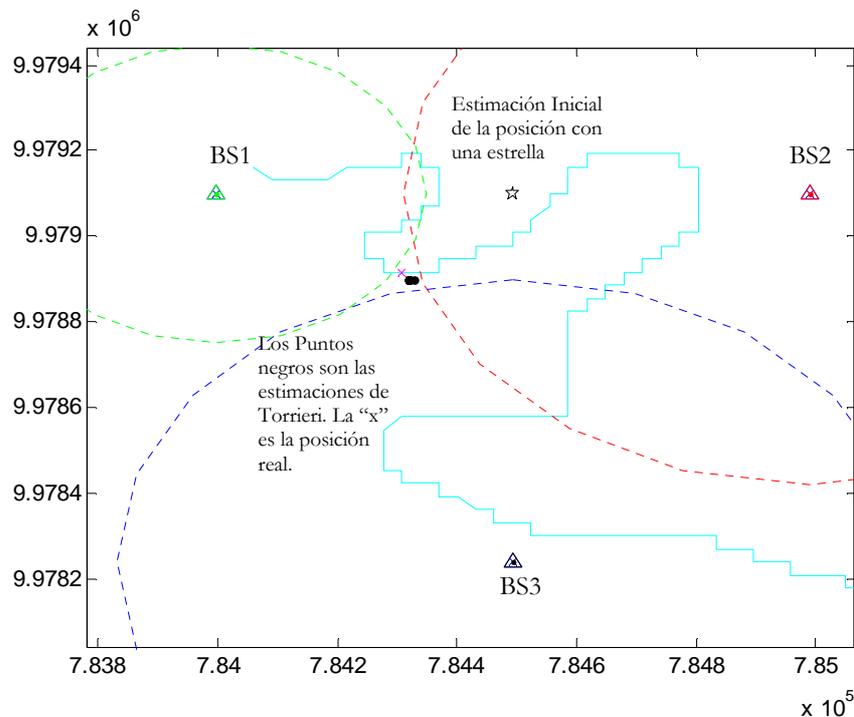


Figura 2.5
Visualización de la técnica del ToA con la solución de Torrieri

Nótese en la Figura 2.5 que el lugar geométrico de la posición para cada una de estas ecuaciones da lugar a una circunferencia centrada en una BS, el punto inicial de estimación entre las dos BS más cercanas marcada con una estrella y la estimación en base a la solución de Torrieri en puntos de color negro.

2.3.1 Linealización de la técnica del ToA con la aproximación de Torrieri

Para la técnica del ToA la solución de Don J. Torrieri es ahora clásica, y se basa en asumir que el vector de error \mathbf{e} se distribuye como ruido blanco y Gaussiano de media nula y matriz de covarianza \mathbf{N}_e [2].

Es así como en [2] explican que se define la probabilidad de estimar t dado que el móvil se encuentra en la posición \mathbf{r} , como se observa en la expresión (2.3.4), siendo N el número de ecuaciones de rango (número de estaciones base) disponibles:

$$p(\mathbf{t} | \mathbf{r}) = \frac{1}{(2\pi)^{N/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}[\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]^T \mathbf{N}_e^{-1} [\mathbf{t} - f(\mathbf{r})]\right\} \quad (\text{Ec. 2.3.4})$$

A partir de la ecuación (2.3.4) la solución de Torrieri en (2.3.5) se calcula buscando el valor de \mathbf{r} que minimiza la probabilidad de cometer un error en la estimación de \mathbf{t} , aplicando el teorema de máxima verosimilitud para inmediatamente linealizar la solución a través de una expansión de Taylor alrededor de \mathbf{r}_0 (que es el punto de partida para un ciclo iterativo de búsqueda de la posición) y se obtiene la siguiente expresión:

$$\hat{\mathbf{r}}_{TOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{d}_0 / c) \quad (\text{Ec. 2.3.5})$$

Para este problema basta con cuatro o cinco iteraciones según [2] para conseguir la solución deseada y según se ha comprobado en los experimentos planteados en el capítulo 4. La matriz \mathbf{F} hace alusión a la geometría del problema de localización y se basa la técnica del ToA, tomando la forma en la ecuación (2.3.6).

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_1)^T / \mathbf{d}_{01} \\ \vdots \\ (\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_N)^T / \mathbf{d}_{0N} \end{bmatrix} \quad \mathbf{d}_{0i} = \|\mathbf{r}_0 - \mathbf{s}_i\| \quad (\text{Ec. 2.3.6})$$

2.3.2 GDOP (*Geometric Dilution of precision*) para la técnica del ToA

La Disolución Geométrica de la Precisión (GDOP) es un parámetro que se utiliza en las técnicas de posicionamiento y se define como la relación entre la raíz media cuadrada del error en el posicionamiento y la raíz media cuadrada del error de rango, y se expresa como se ve en (2.3.8), siendo \mathbf{C}_{TOA} la matriz de covarianza del error en el posicionamiento y que se calcula como se ve en (2.3.7) [2][12].

El GDOP tiene la capacidad para medir la pérdida de precisión en el posicionamiento originada únicamente por la geometría del problema y la técnica de posicionamiento empleada [2].

$$\mathbf{C}_{TOA} = c^2 (\mathbf{F}^T \mathbf{N}_e^{-1} \mathbf{F})^{-1} \quad (Ec. 2.3.7)$$

$$GDOP = \frac{\text{error rms posición}}{\text{error rms rango}} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{C}_{TOA})} / \sigma_t = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} / \sigma_t \quad (Ec. 2.3.8)$$

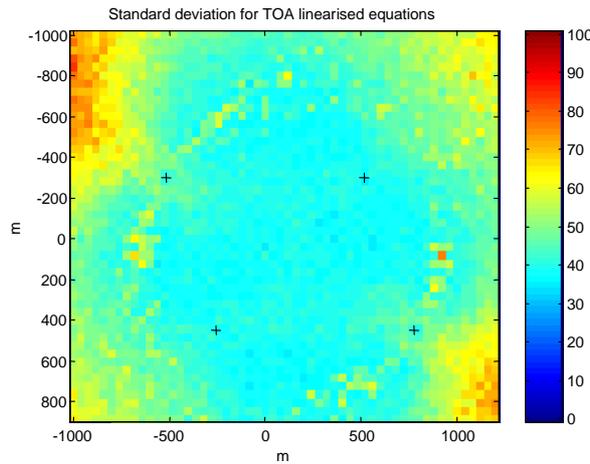


Figura 2.6

Disolución Geométrica de la Precisión (GDOP) para el posicionamiento basado en ToA. [2]

La figura 2.6 ilustra a manera de ejemplo la GDOP para el caso de un sistema de posicionamiento basado en la estimación de ToA, presentando resultados que no tiene problemas asociados a su geometría, y que posee la capacidad de proporcionar resultados similares dentro del área limitada por las cuatro estaciones base [2].

2.4 Localización mediante la técnica del TDoA

En redes celulares donde los terminales móviles y las estaciones base no operan de forma sincrónica, el sesgo del reloj (*clock offset*) es un problema que debe ser resuelto y considerado. Es por ello que el uso de la técnica del TDoA (*Time Differential of Arrival*) en sustitución de la técnica del ToA da la posibilidad de considerar esa incertidumbre que es común en la técnica del ToA y tener una mejor precisión en las estimaciones [2][12].

La aproximación mediante la técnica del TDoA se puede realizar dependiendo del lugar donde se la implementa. En el primer escenario donde la localización es realizada por la red, la diferencia en los tiempos de llegada se mide a partir de la señal transmitida por el

dispositivo móvil hacia las diferentes estaciones base. En el segundo escenario donde la localización se realiza en el dispositivo móvil la diferencia en los tiempos de llegada (TDoA's) son iguales a la diferencia en pares de los tiempos de llegada (ToA's) medidos por el mismo dispositivo móvil. En ambos casos la diferencia en el tiempo de llegada de dos BS's define una hipérbola de la cual se puede obtener una posición bidimensional de donde se localiza el dispositivo móvil [2].

En un sistema de localización por hipérbolas, los respectivos tiempos de llegada se definen como:

$$t_i - t_{i+1} = (d_i - d_{i+1})/c + n_i \quad (\text{Ec. 2.4.1})$$

$$n_i = e_i - e_{i+1} \quad (\text{Ec. 2.4.2})$$

De todo esto se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones no-lineales:

$$H\mathbf{t} = H\mathbf{d}/c + \mathbf{n} \quad (\text{Ec. 2.4.3})$$

Donde la matriz H define la geometría del problema en base a la técnica del TDoA.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 2.4.4})$$

2.4.1 Linealización de la técnica del TDoA con la aproximación de Torrieri

Como se describe en [2], la solución de Torrieri para la técnica del TDoA es análoga a la presentada para la técnica del ToA que consiste en linealizar la ecuación (2.4.3) y estimar la posición con el mejor estimador posible. En este caso la solución toma la forma de la ecuación (2.4.5).

$$\hat{\mathbf{r}}_{TDOA} = \mathbf{r}_0 + c(\mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F})^{-1} \mathbf{F}^T \mathbf{H}^T \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{H}\mathbf{t} - \mathbf{H}\mathbf{d}_0 / c) \quad (\text{Ec. 2.4.5})$$

Con una matriz de covarianza del error de medición \mathbf{N} , definido como:

$$\mathbf{N} = (\mathbf{H}\mathbf{N}_e \mathbf{H}^T) \quad (\text{Ec. 2.4.6})$$

2.4.2 GDOP (*Geometric Dilution of precision*) para la técnica del TDoA

Como se explicó en el punto 2.3.2 la determinación de la Disolución Geométrica de la Precisión es análoga para el caso del TDoA, con la diferencia respectiva en la matriz de covarianza \mathbf{N} , y se sigue el mismo procedimiento, siendo \mathbf{C}_{TDOA} la matriz de covarianza del error de posicionamiento y que se calcula como se ve en la ecuación (2.4.7). Finalmente se sigue la ecuación (2.4.8) para el cálculo de del GDOP.

$$\mathbf{C}_{TDOA} = c^2 (\mathbf{F}^T \mathbf{N}^{-1} \mathbf{F})^{-1} \quad (Ec. 2.4.7)$$

$$GDOP = \frac{\text{error rms posición}}{\text{error rms rango}} = \sqrt{\text{trace}(\mathbf{C}_{TDOA})} / \sigma_t = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} / \sigma_t \quad (Ec. 2.4.8)$$

2.5 Generalidades del Filtro de Kalman

2.5.1 Introducción al Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es una herramienta de gran aplicación cuya importancia radica en que se constituye en el principal procedimiento para estimar sistemas dinámicos representados en la forma de estado-espacio (*State-Space*), y que ha sido objeto de una extensiva investigación y aplicación, particularmente en el área de la navegación autónoma y asistida, en rastreo de misiles y en economía [13].

El filtro tiene su origen gracias a Rudolf E. Kalman, quien describe el mismo como una solución recursiva para el problema del filtrado lineal de datos discretos. La derivación del Filtro de Kalman fue dentro de un amplio contexto de modelos estado-espacio, en donde el núcleo es la estimación por medio de mínimos cuadrados recursivos. Siendo su funcionamiento un proceso matemático que opera por medio de la predicción y corrección. En esencia este algoritmo pronostica el nuevo estado a partir de su estimación previa en base a la observación del parámetro x , añadiendo un término de corrección proporcional al error de predicción, de tal forma que este último es minimizado estadísticamente [7][14]. En la Figura 2.7 se visualiza de manera general el funcionamiento del Filtro de Kalman.

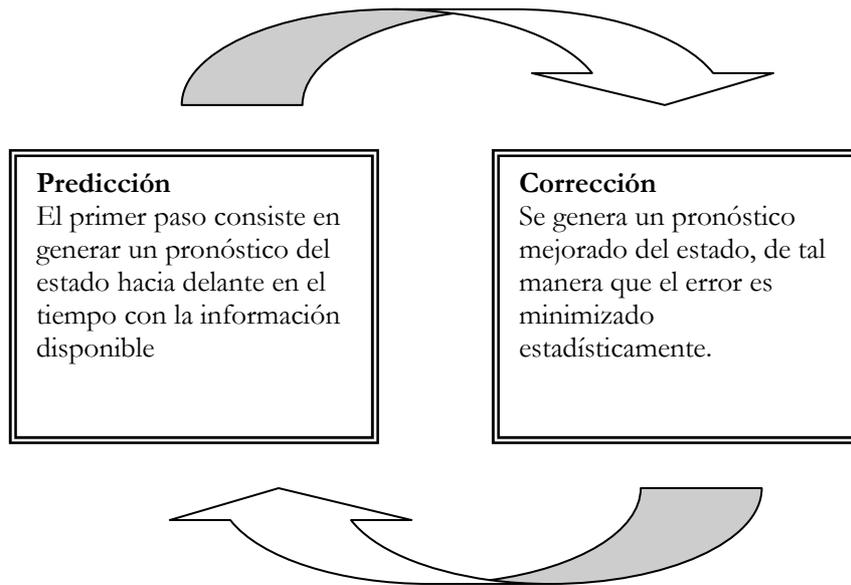


Figura 2.7
Esquema del proceso de funcionamiento del Filtro de Kalman

2.5.2 Explicación del proceso de estimación del Filtro de Kalman

El Filtro de Kalman es el principal algoritmo para estimar sistemas dinámicos representados en la forma de estado-espacio. En esta representación el sistema es descrito por un conjunto de variables denominadas de estado. El estado contiene toda la información relativa al sistema a un cierto punto en el tiempo. Esta información debe permitir la inferencia del comportamiento pasado del sistema, con el objetivo de predecir su comportamiento futuro [13][14]. La solución es óptima por cuanto el filtro combina toda la información observada y el conocimiento previo acerca del comportamiento del sistema para producir una estimación del estado de tal manera que el error es minimizado estadísticamente. El término recursivo significa que el filtro recalcula la solución cada vez que una nueva observación o medida es incorporada en el sistema.

Lo que hace al filtro tan interesante es precisamente su habilidad para predecir el estado de un sistema en el pasado, presente y futuro, aún cuando la naturaleza precisa del sistema modelado es desconocida. En la práctica, las variables estado individuales de un sistema dinámico no pueden ser exactamente determinadas por una medición directa. Dado lo anterior, su medición se realiza por medio de procesos estocásticos que involucran algún grado de incertidumbre en la medición.

La formalización del filtro de Kalman es como sigue. Una nueva medición se adquiere y se procesa en cada instante, t . Se asume que el intervalo de muestreo es 1 por simplicidad, y lo suficientemente pequeño para considerar que el movimiento de características entre dos puntos consecutivos de la trayectoria es lineal [13][15]. Aunque estas consideraciones pueden cambiar en función de las necesidades del proceso a estimar y no necesariamente se deben asumir en todos los casos.

El filtro de Kalman tiene como objetivo resolver el problema general de estimar el estado $x \in \mathfrak{R}^n$ de un proceso controlado en tiempo discreto, el cual es dominado por una ecuación lineal en diferencia estocástica de la siguiente forma:

$$\tilde{x}_t = A\tilde{x}_{t-1} + w_{t-1} \quad (\text{Ec. 2.5.1})$$

Con una medida $y \in \mathfrak{R}^n$, que es

$$\tilde{y}_t = H\tilde{x}_t + v_t \quad (\text{Ec. 2.5.2})$$

Donde las variables aleatorias w_t, v_t representan el error del proceso y de la medida respectivamente. Además se asume independencia entre ellas y que tienen ruido blanco Gaussiano con matrices de covarianza Q y R respectivamente.

$$p(w) \cong N(0, Q) \quad (\text{Ec. 2.5.3})$$

$$p(v) \cong N(0, R) \quad (\text{Ec. 2.5.4})$$

En la práctica las matrices de covarianza de la perturbación del proceso, Q , y de la perturbación de la medida, R , suelen cambiar en el tiempo y por simplicidad se asumen valores constantes, sin embargo para la elaboración de este trabajo la perturbación de la medida vendrá de cálculos que se realizan en base a la técnica de localización utilizada y la perturbación del proceso se determinará en base a una estimación inicial del proceso.

En términos del vector de estado $\tilde{x}_t = [x_{1t}, x_{2t}, vx_{1t}, vx_{2t}]$, las ecuaciones 2.5.1 y 2.5.2 se pueden escribir como,

$$\tilde{x}_t = F_{(n+1,n)}\tilde{x}_{t-1} + w_t \quad (\text{Ec. 2.5.5})$$

Con

$$F_{(n+1,n)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & dt & 0 \\ 0 & 1 & 0 & dt \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde F se denomina matriz de transición de estados.

Como medida se utiliza y_t y se supone que se dispone de un extractor capaz de medir la posición en cada punto necesario de la trayectoria. Por tanto, el modelo de medida del filtro de Kalman es,

$$y_t = C_{(n)} \tilde{x}_{t-1} + v_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t-1} \\ x_{2t-1} \end{bmatrix} + v_t \quad (\text{Ec. 2.5.6})$$

Donde $C_{(n)}$ es la matriz de medida y v_t es la incertidumbre de la medida modelada como ruido blanco Gaussiano.

El objetivo del filtro es estimar el vector de estados a partir del valor de los mismos en instantes anteriores en función de una matriz llamada ganancia de Kalman $G_{(n)}$. Siguiendo con la idea general del filtro se debe corregir el estimado \tilde{x}_t a partir de la nueva medida, la ganancia de Kalman y un estimado de la nueva medida.

$$\tilde{x}_{(n+1|Y_n)} = F_{(n+1,n)} \tilde{x}_{(n|Y_{n-1})} + G_{(n)} \alpha_{(n)} \quad (\text{Ec. 2.5.7})$$

Donde:

$$\alpha_{(n)} = y_{(n)} - C_{(n)} \tilde{x}_{(n|Y_{n-1})} \quad (\text{Ec. 2.5.8})$$

Siendo el principal objetivo hallar la expresión de la ganancia que minimice el error de los estimados, para ello se debe minimizar la traza de la matriz de covarianza del error, la forma en que se logra esto no es de importancia para el contenido del trabajo y puede ser consultado en las respectivas obras citadas en el labor.

El algoritmo del filtro de Kalman se resume en las siguientes ecuaciones. En el instante t , las entradas están formadas, por las matriz de covarianza del proceso, la matriz de

covarianza de la medición en el instante $t-1$, Q y R , respectivamente, la matriz de estado F , la matriz de medida invariante en el tiempo $C_{(n)}$ y la medida de la posición en el instante t , $y_{(t)}$. La matriz de correlación de la varianza del proceso, Q , es en donde se mide el proceso en sí mismo.

Ecuaciones de predicción y corrección

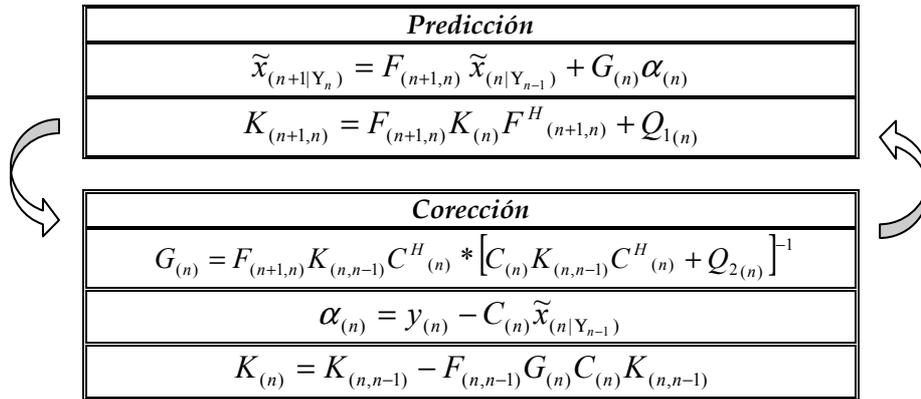


Figura 2.8
Ecuaciones del Filtro de Kalman

2.5.3 Análisis de las matrices de covarianza para el Filtro de Kalman

De lo presentado en el punto 2.5.2 se puede entender que la solución del Filtro de Kalman pasa por determinar las matrices de covarianza del ruido y de la medición. Si bien este análisis sería conveniente realizarlo en el capítulo 3 como parte del desarrollo, la solución al mismo pasa a ser material del desarrollo técnico de la tesis.

Con respecto a la matriz de covarianza de la medición esta se asume como la matriz de covarianza del error de posicionamiento, que se explica en la determinación del GDOP (*Geometric Dilution of precision*) para las técnicas usadas que son la del ToA y la del TD0A.

Para la matriz de covarianza del proceso se asume un vector de posicionamiento $\tilde{x}_t = [x_{1t}, x_{2t}, vx_{1t}, vx_{2t}]$, en el que incluyen dos coordenadas y sus respectivas velocidades. En este punto es necesario precisar que en términos generales basta con definir la varianza de las componentes de las velocidades para tener la varianza en las posiciones. Para ver esto se puede realizar un experimento en el que se crea una ruta y en donde se conocen los estadísticos y de esta forma se puede analizar el comportamiento del filtro y entender parte de su funcionamiento.

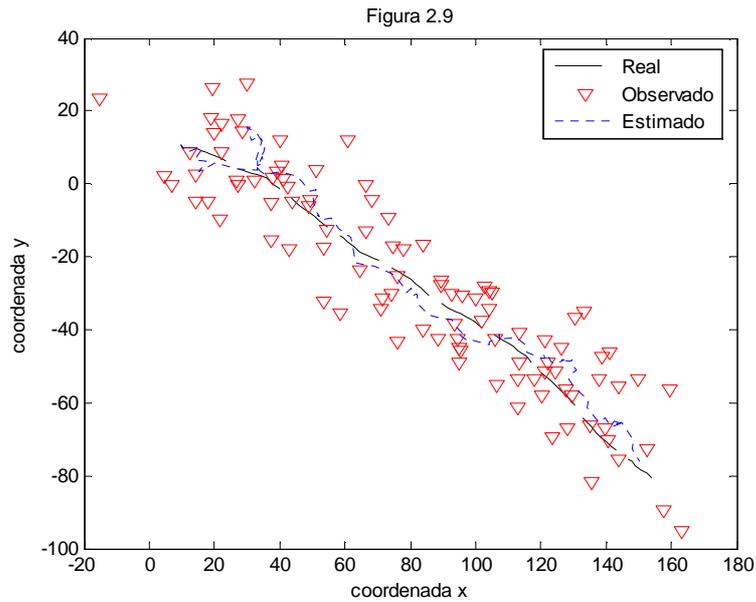


Figura 2.9
Ejemplo inicial del Filtro de Kalman

En la figura 2.9 se ha creado una trayectoria en la que la varianza de las posiciones y la velocidad se han fijado previamente en un valor de 0.01 y la varianza de las mediciones con un valor de 100 para cada coordenada. Para la predicción mediante el Filtro de Kalman se han usado estos valores directamente y se puede ver que la estimación se aproxima con la trayectoria real. En el archivo de *Matlab* respectivo se pueden hacer experimentaciones cambiando los valores de las varianzas y se podrá llegar a la conclusión que la solución al problema radica en determinar los valores más óptimos de las varianzas en cada instante, ayudando a la correcta predicción de la posición.

2.5.4 Determinación experimental de la varianza del proceso

Parte de la solución del Filtro de Kalman consiste en determinar el estadístico de la varianza del proceso. En términos simples esto se traduce en la probabilidad de que el móvil se mueva de un determinado lugar a otro. Por ello una de las primeras consideraciones consiste en asumir tiempos de muestreo pequeños (generalmente $t = 1s.$), además de ello se ha introducido el concepto de tener velocidades fijas que permitan realizar un estudio mas simplificado del Filtro de Kalman.

Explicado lo anterior el problema se enfoca en determinar de una forma experimental el movimiento del móvil, esta suposición es parte de la solución planteada en este trabajo para el seguimiento de dispositivos móviles.

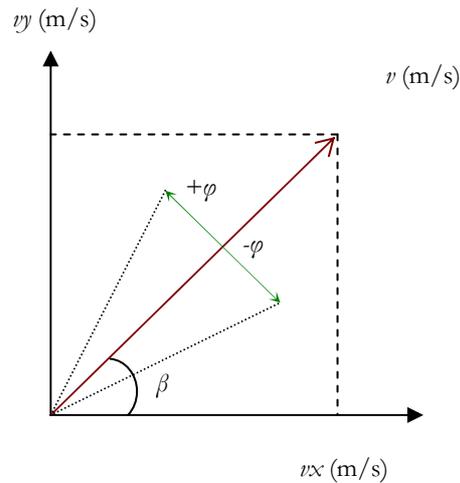


Figura 2.10

Rango de visión para el movimiento del móvil (β , φ son ángulos medidos en grados sexagesimales)

En la Figura 2.10 se observa un vector v , que corresponde al módulo de la velocidad que se ha dibujado dentro de un plano cartesiano con un ángulo de dirección β . Además en la figura se ilustra un ángulo φ que puede ser añadido o restado al ángulo de dirección β con el propósito de cambiar las componentes de las velocidades después de un instante de tiempo determinado, pero manteniendo el módulo de la velocidad constante. Este procedimiento se lo ha denominado “*Rango de Movilidad*” y sugiere que el móvil se moverá sin realizar cambios exagerados en su velocidad y dentro de un límite como se explica en la Figura 2.10. Sin ser una aproximación exacta de la realidad, esto se convierte en una simulación que permite tener una idea del comportamiento de la varianza manteniendo siempre una velocidad constante.

2.5.5 Valor experimental de las varianzas de la velocidad

En concordancia con el trabajo que se desarrolla en el Capítulo 4 y 5, el escenario de simulación de este trabajo puede ser el de una persona movilizándose a pie y la misma persona en un vehículo, de lo explicado en el punto 2.5.4 se debe determinar la velocidad del móvil y su rango de movilidad. Para esto se ha propuesto un ejemplo en *Matlab* en el que se simula un dispositivo móvil con tres diferentes rangos de movilidad y con una velocidad que va desde 1 a 120 km/h, todo esto con el objetivo de visualizar como se comporta la varianza del proceso a medida que aumentamos la velocidad.

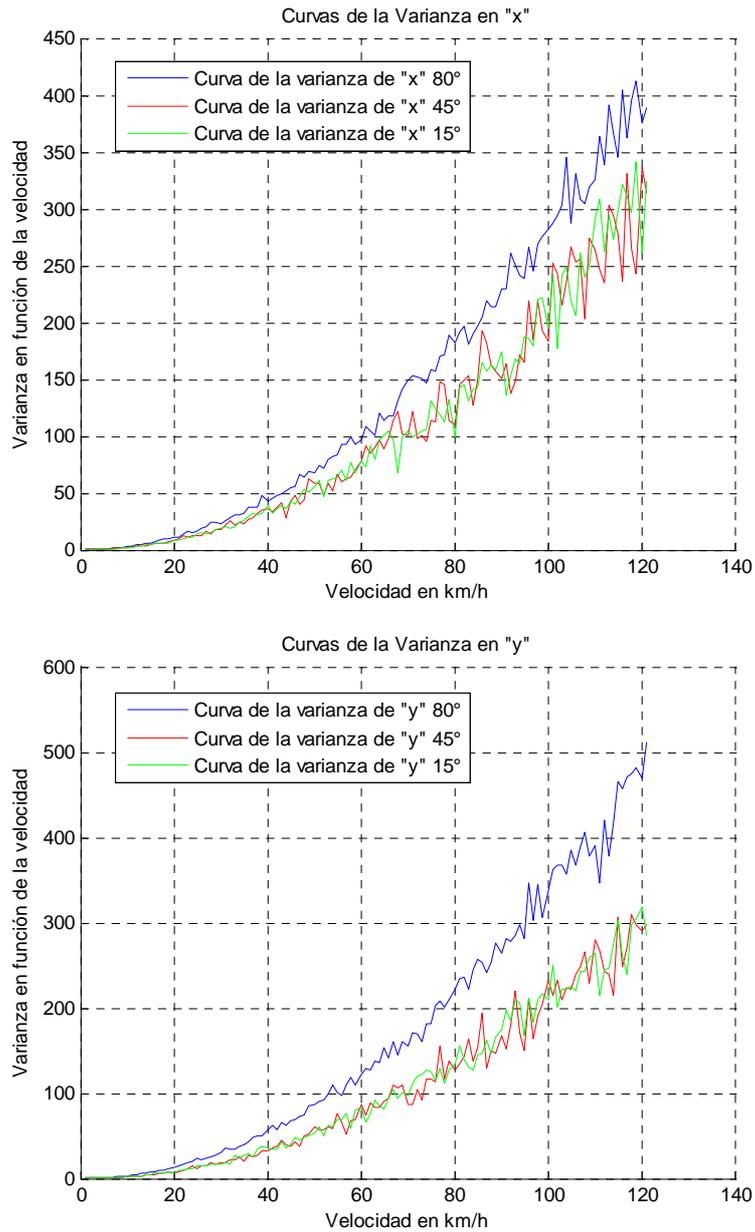


Figura 2.11

Varianza del proceso en función de la velocidad.

Dentro de un rango de movilidad de 80, 45 y 15°. El archivo que permite realizar este gráfico se encuentra detallado y puede ser analizado en la sección de Anexos.

De lo observado la Figura 2.11 se puede concluir que a medida que aumenta la velocidad del móvil, incrementa el valor de su varianza, además a un valor de Rango de Movilidad pequeño la varianza parece no alterarse y procurar valores pequeños. Para este experimento se mantiene constante la velocidad vectorial por un trayecto determinado para posteriormente cambiar la misma por otro trayecto y así realizar la medida de la varianza.

2.6 Uso de la información geográfica en *Google Earth*

La idea de usar el servidor de *Google Earth* en este proyecto se fundamenta en la necesidad de visualizar los datos obtenidos luego de los procesos de localización y refinamiento de la posición. Esto a su vez permite tener una imagen de la ruta sobre un mapa que puede ser analizada y sujeta a discusión en este trabajo.

Google Earth hace uso del lenguaje KML que es un lenguaje que puede ser interpretado del mismo modo que un navegador lee un archivo HTML y nos muestra su contenido, esta funcionalidad permite añadir información al mismo, además de compartir lugares e información geográfica relevante con otras personas a través de la red. Éstos pueden ser marcas de posición, descripciones, líneas, polígonos, etc. Lo que además otorga a *Google Earth* de una funcionalidad de servidor de información geográfica (GIS: *Geographic Information System*).

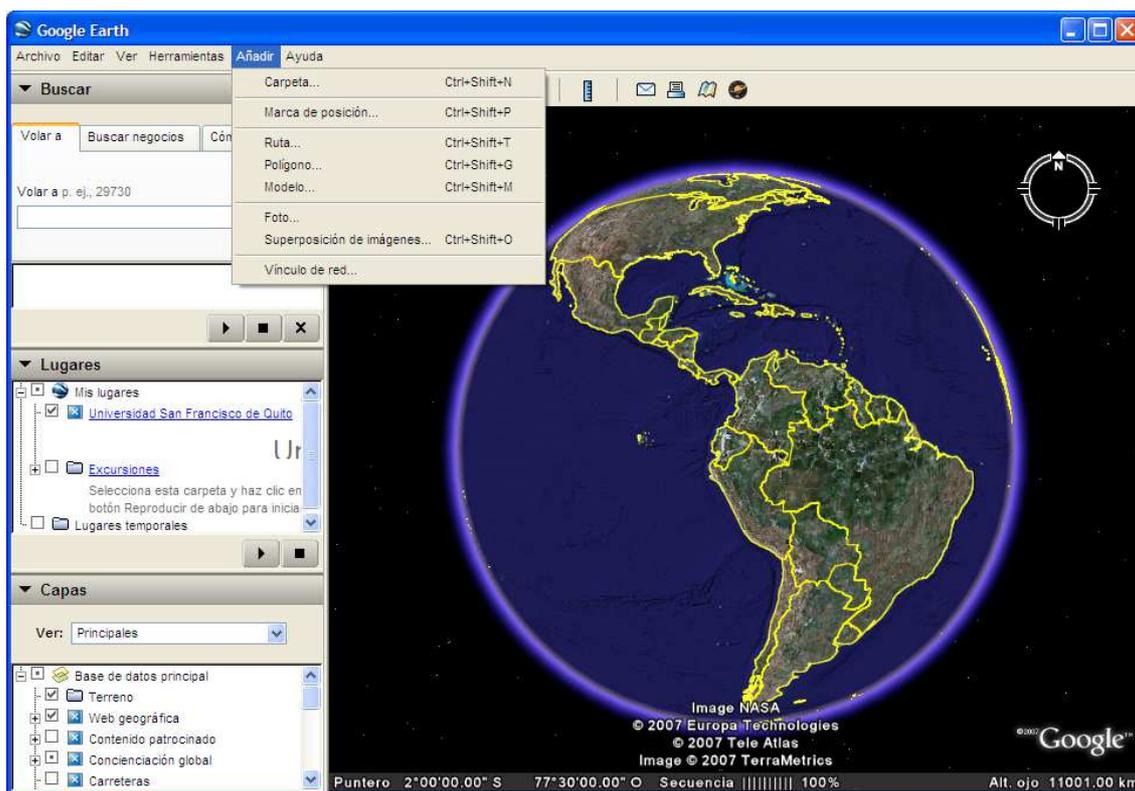


Figura 2.12

Ventana principal de *Google Earth*,
en donde se puede ver la ventana de Añadir y ver las opciones de Marca de Posición, Ruta, Polígono y modelo

2.6.1 Lenguaje KML y su relación con XML y HTML

El lenguaje KML tiene una estructura de etiquetas con elementos anidados y atributos y está basado en los estándares XML. XML por su parte es un Lenguaje de Etiquetado Extensible muy simple, pero estricto que juega un papel fundamental en el intercambio de una gran variedad de datos. Se basa principalmente en el lenguaje HTML pero su función es la de describir datos y no mostrarlos como es el caso de HTML. XML es un formato que permite la lectura de datos a través de diferentes aplicaciones y sirve para estructurar, almacenar e intercambiar información. Por su parte el lenguaje HTML es un lenguaje de marcación diseñado para estructurar textos y presentarlos en forma de hipertexto o texto enriquecido, que es el formato que usa para visualizar las páginas *web* en el Internet [16][17].

2.6.2 Creación de un archivo KML

Con la utilización de los archivos KML se pueden crear marcas de posición, rutas, capas de terreno, polígonos, etc. Sin embargo para este proyecto es de exclusivo interés el cómo se crean las marcas de posición (*Placemarks*) y las rutas (*Paths*) ya que estas dos funcionalidades permitirán la visualización de los trayectos que se usarán para los análisis de las técnicas de localización [16].

Existen diferentes caminos para conseguir que los datos generados se visualicen en *Google Earth*, estos pueden variar desde crear un simulador GPS con los datos y tener la versión de *Google Earth Pro* y verlos en tiempo real, cargar los datos generados y generar un archivo KML con la ruta y verlo después, etc. Sin embargo es del interés de este proyecto tener un esquema que permita ver los datos en tiempo real de ser el caso y explorar ciertas funcionalidades de *Google Earth* que podrán ser usadas más adelante.

2.6.3 Ejemplo de programación en lenguaje KML

En el siguiente ejemplo de la Figura 2.13, se presenta el código de un programa KML en el que se generan marcas de posición y rutas, las mismas que se visualizan en *Google Earth* y permiten tener la localización geográfica del dispositivo móvil.

```
1. <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
2. <kml xmlns="http://earth.google.com/kml/2.0">
3. <Document>
4. <LookAt>
5. <longitude>-78.43302666666667</longitude>
6. <latitude>-0.18301</latitude>
7. <range>1000</range>
8. <tilt>45</tilt>
```

```

9. <heading>45</heading>
10. </LookAt>
11. <Placemark>
12. <name>rutadata</name>
13. <Style>
14. <IconStyle>
15. <Icon>
16. <href>root://icons/palette-4.png</href>
17. <x>224</x>
18. <y>224</y>
19. <w>32</w>
20. <h>32</h>
21. </Icon>
22. </IconStyle>
23. </Style>
24. <Point>
25. <altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
26. <coordinates>-78.4330266666667,-0.18301,0</coordinates>
27. </Point>
28. </Placemark>
29. <Placemark>
30. <name>Track</name>
31. <Style>
32. <LineStyle>
33. <color>FF00FF00</color>
34. <width>6</width>
35. </LineStyle>
36. </Style>
37. <MultiGeometry>
38. <LineString>
39. <tessellate>0</tessellate>
40. <altitudeMode>relativeToGround</altitudeMode>
41. <coordinates> -78.4355416666667,-0.185525,0
42. -78.4354366666667,-0.18542,0
43. ....
44. </coordinates>
45. </LineString>
46. </MultiGeometry>
47. </Placemark>
48. </Document>
49. </kml>

```

Figura 2.13

Programa en lenguaje KML para visualización en *Google Earth*

a. Creación de una marca de posición (Placemark)

Del código presentado en la Figura 2.13 las primeras líneas son declaraciones de nombre, tipo, etc. propias de *Google Earth*, por lo demás el tipo de icono usado, su tamaño y otras características se las puede encontrar bajo la etiqueta de `<Icon>`. Muchas de las funcionalidades de este tipo de archivo pueden ser consultadas y vistas directamente en la documentación en línea que *Google* mantiene sobre su producto. Para nuestro caso analizaremos la etiqueta `<Placemark>`.

En la línea 11 se ha inicializado el proceso de colocar una marca de posición, posteriormente en la línea 12 se da un nombre para ser mostrado en la marca de posición.

En las siguientes líneas a partir de la línea 26 se ubica la marca en las coordenadas de longitud, latitud, altura respecto al terreno (*relativetoground*), altura e inclinación del ojo (altura a la que se ve la foto satelital) e inclinación sobre el plano *xy* del mapa.

b. Creación de una ruta (Path)

En la línea 29 se inicia el proceso de creación de la ruta a manera de un *Placemark* extendido y a partir de la línea 41 se colocan las coordenadas de longitud, latitud y altura para luego cerrar las etiquetas y visualizar estos datos en *Google Earth*. Igualmente se usa la etiqueta `<altitudemode>` para indicar que se visualice los datos pegados al suelo y de esa forma evitar la determinación de la altura que no se han considerado en este trabajo.

2.7 Sistema de Coordenadas

Un Sistema de coordenadas, es un sistema de identificación de elementos en un conjunto de puntos marcándolos con números. Estos números se denominan coordenadas y se puede considerar que dan la posición de un punto dentro del conjunto. El sistema de latitud y longitud es un ejemplo de sistema de coordenadas que se utiliza para localizar la posición de un punto en la superficie de la Tierra, siendo uno de los tantos sistemas que se pueden utilizar para identificar una posición en el globo terráqueo [18][19].

2.7.1 Coordenadas Geográficas

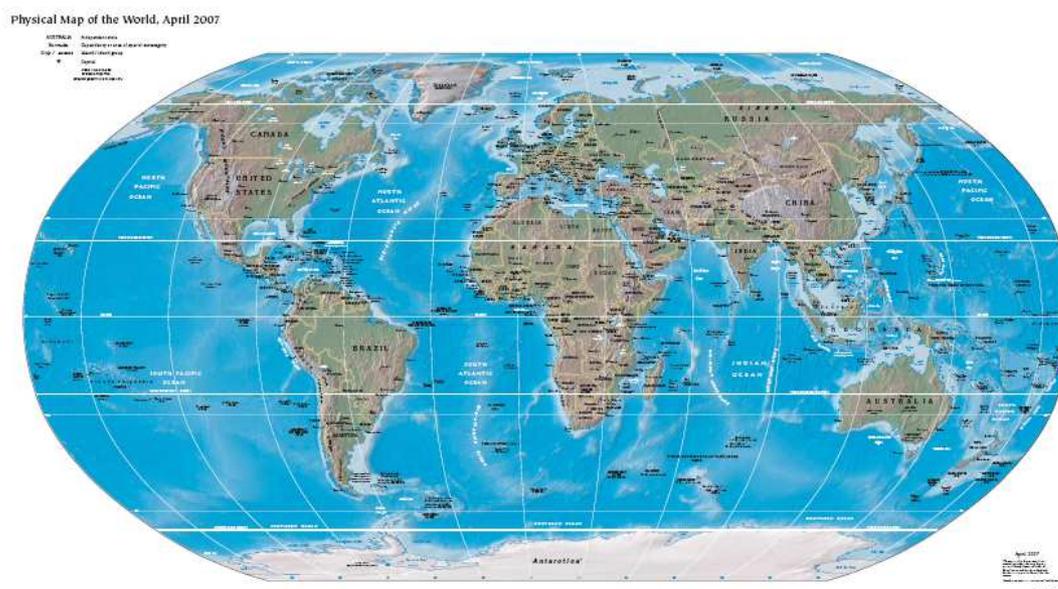


Figura 2.14

Mapa de la Tierra mostrando las líneas de latitud (horizontales) y longitud (verticales)⁶

⁶ La fuente de este mapa es la Central Intelligence Agency <http://www.cia.gov>

Dentro de los sistemas de coordenadas usados para la ubicación de un punto dentro del globo terráqueo, el sistema de Coordenadas Geográficas es el más utilizado y conocido. Para ello expresa las posiciones sobre la Tierra usando dos de las tres coordenadas de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con el eje de rotación de la Tierra. Este define dos ángulos medidos desde el centro de la Tierra:

- La latitud mide el ángulo entre cualquier punto y el ecuador. Las líneas de latitud se llaman paralelos y son círculos paralelos al ecuador en la superficie de la Tierra.
- La longitud mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Se acepta que *Greenwich* en Londres es línea de longitud 0 en la mayoría de los países. Las líneas de longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos.

La combinación de estos dos ángulos, puede expresar la posición de cualquier punto de la superficie de la Tierra. Por ejemplo, la Universidad San Francisco de Quito (Ecuador) esta ubicada en las coordenadas geográficas $0^{\circ}11'45.92''$ de latitud sur y $78^{\circ}26'8.01''$ de longitud oeste. Finalmente hay que mencionar que el ecuador es un elemento importante de este sistema de coordenadas; representa el cero de los ángulos de latitud y el punto medio entre los polos. Es el plano fundamental del sistema de coordenadas geográficas [20].

2.7.2 Coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator)

El sistema de coordenadas más conocido y ampliamente utilizado es el de coordenadas geográficas, que usa dos de las tres coordenadas de un sistema de coordenadas esféricas que está alineado con el eje de rotación de la Tierra cuyas unidades de medida son: latitud y longitud, sin embargo, por facilidad de operación, en el proyecto de Posicionamiento Global por Satélite, GPS por sus siglas en inglés, se utiliza el sistema de coordenadas UTM, que es otro sistema muy usado, el cual generalmente, es encontrado en Cartografía Temática de Investigación, Gubernamental y etc; este tipo de coordenadas son mas fáciles de usar, ya que maneja las unidades de medición en metros. El Sistema de Coordenadas UTM secciona el Globo Terráqueo en pequeñas divisiones, estas secciones son llamadas zonas. Este Sistema de Coordenadas Universal se basa en la

proyección geográfica transversa de *Mercator*⁷, que se construye como la proyección de *Mercator* normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano [21][22].

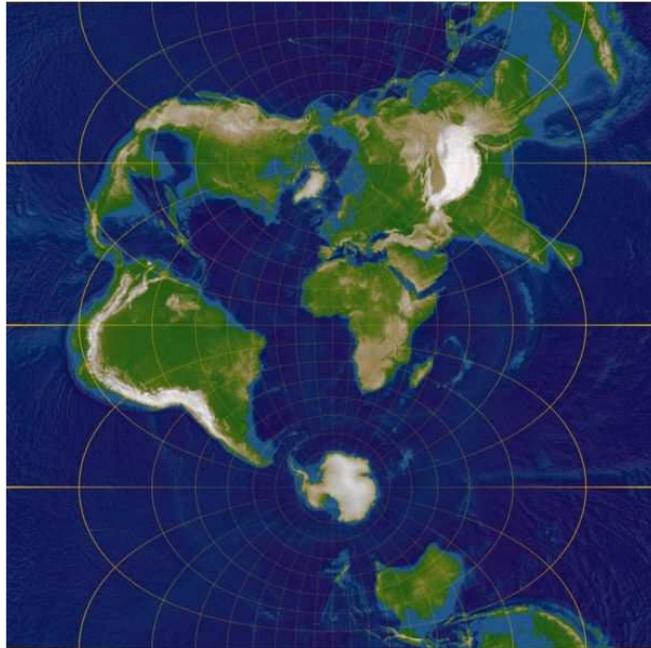


Figura 2.15

Mapa del mundo en proyección transversa de Mercator, centrado sobre el meridiano 45° E y el ecuador

⁷ Se basa en el modelo ideal que trata a la tierra como un globo hinchable que se introduce en un cilindro y que empieza a inflarse ocupando el volumen del cilindro e imprimiendo el mapa en su interior. Este cilindro cortado longitudinalmente y ya desplegado sería el mapa con proyección de *Mercator*.

3 FUNCIONAMIENTO Y DESARROLLO

Para el desarrollo de esta tesis ha sido necesario involucrar varias herramientas que permiten crear los escenarios de simulación apropiados para el estudio del Filtro de Kalman. Dentro de las técnicas de localización se han mencionado la del *Time of Arrival* (ToA) y *Time Differential of Arrival* (TDoA) como las que permitirán el estudio del Filtro de Kalman, es por ello que se detallan los procesos de obtención de los datos previo a las simulaciones de este trabajo.

3.1 Funcionamiento General del esquema de simulación

3.1.1 Aproximación y explicaciones iniciales

Para realizar el análisis de las técnicas de localización y del seguimiento mediante el filtro de Kalman es necesario definir que este trabajo está orientado hacia la evaluación de las dos técnicas mencionadas (ToA y TDoA) conjuntamente con el filtro y no incluirá los procesos de gestión requeridos para la adquisición de señales para la estimación de la posición, que se harían en una red celular. La intención es obtener evidencia estadística que permita tener conclusiones sobre las técnicas y variables que influyen en su funcionamiento.

3.1.2 Obtención de la posición geográfica de la ruta y de las estaciones base

Para la simulación de los datos se ha utilizado la herramienta *MapTool*, la cual permite dibujar las trayectorias los dispositivos móviles en la red y obtener sus coordenadas en un archivo de texto llamado *RoutFile.txt*, del cual se extraerán los datos necesarios para infectarlos con ruido y realizar los análisis respectivos. Además en otro archivo de texto llamado *CellData.txt* se encuentran las localizaciones geográficas de las BS, las cuales son imprescindibles en el proceso de localización.

3.1.3 Proceso de obtención de los datos usando *MapTool* y *Google Earth*

a) Paso 1.

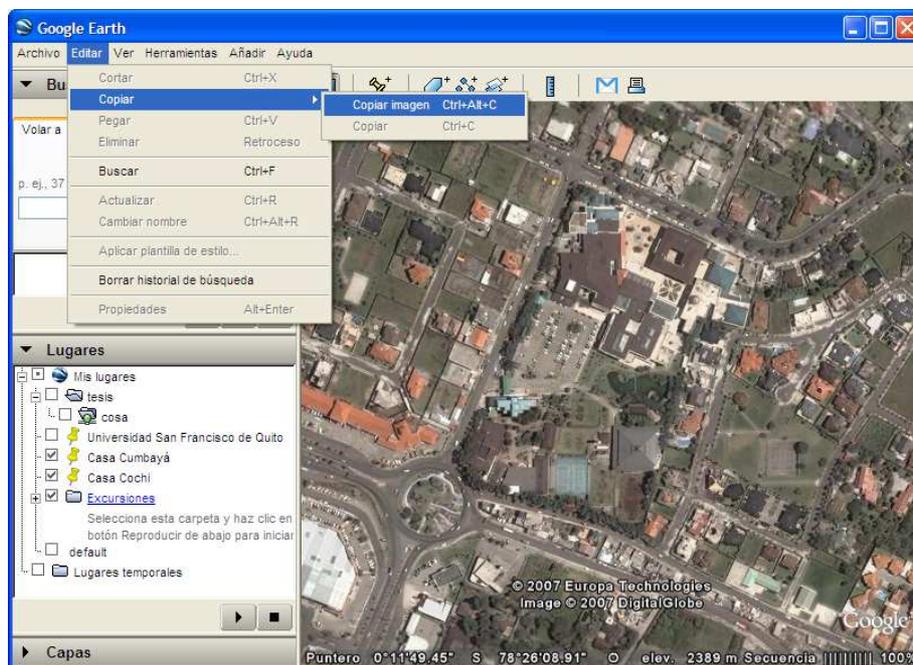


Figura 3.1

Visualización en Google Earth del Mapa a utilizarse

Se obtiene el mapa del área a ser analizada mediante el programa *Google Earth*. Además se deberá obtener las coordenadas geográficas de las esquinas del mapa en coordenadas UTM, para introducirlas posteriormente en la herramienta *MapTool*. Existiendo para esto la posibilidad de obtenerlos directamente desde *Google Earth* en la ventana Herramientas – Opciones – Vista3D y cambiando el formato en que se muestra la latitud y la longitud.

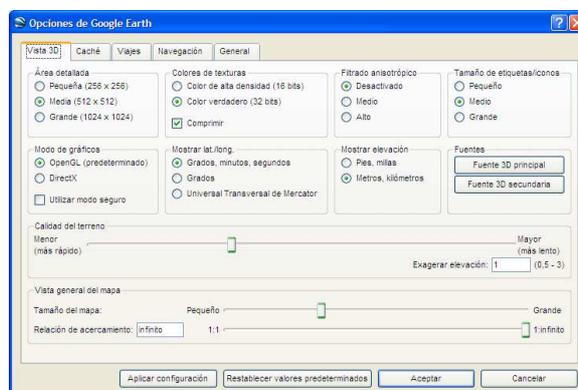


Figura 3.2

Ventana de Opciones de Google Earth

b) Paso 2.

Abrimos el programa *MapTool* y nos dirigimos hacia *File – Open Map*. Después de esto se nos abrirá una ventana en la que podremos elegir nuestro mapa para tratarlo con el programa y seguir los pasos para su calibración en la herramienta.

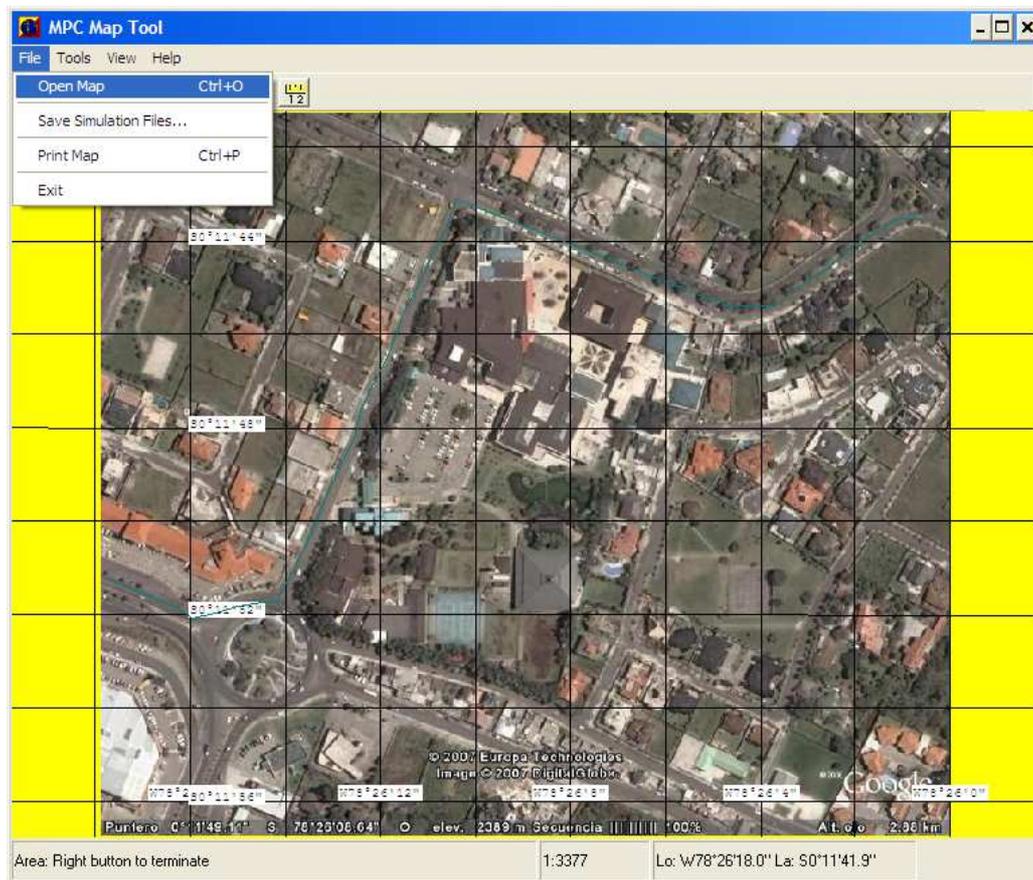


Figura 3.3
Ventana Principal de *MapTool*

c) Paso 3.

En este cuadro de diálogo se nos permitirá elegir las unidades UTM en metros para el mapa que hemos cargado desde la ventana anterior. Posterior a esto se elegirá una zona UTM de referencia que para nuestro caso debe ser una zona cercana al Ecuador en la Zona 17, hemisferio sur.

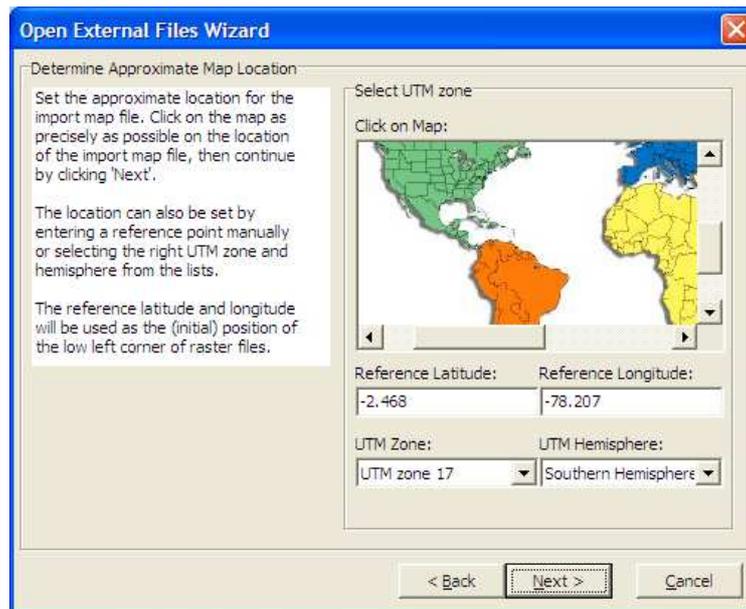


Figura 3.4

Calibración del Mapa de acuerdo a las coordenadas UTM

d) Paso 4.

En el siguiente cuadro de diálogo se procederá a calibrar el mapa con las coordenadas de las esquinas. Para ello se selecciona el cuadro de texto *Edit the coordinates of the low left corner* y se introducen los datos de la esquina inferior izquierda. De igual manera se debe escoger en la lista *Defining method* la opción *Upper right corner* e introducir los datos de la esquina superior derecha y el mapa quedará ajustado automáticamente.

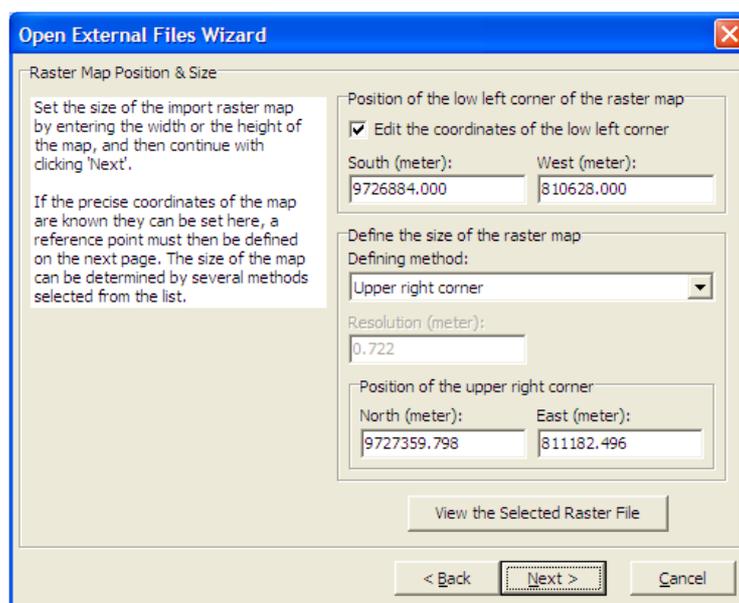


Figura 3.5

Calibración del Mapa en base a las coordenadas de las esquinas

e) Paso 5.

En la última ventana se deberá introducir cualquier punto de referencia del mapa en sus coordenadas geográficas. Este paso permite tener una mejor calibración de los datos y a continuación veremos nuestro mapa y podremos comprobar que al mover el puntero por el mismo veremos las coordenadas geográficas, las mismas que deberán ser bastante aproximadas a las que se ven en *Google Earth*.

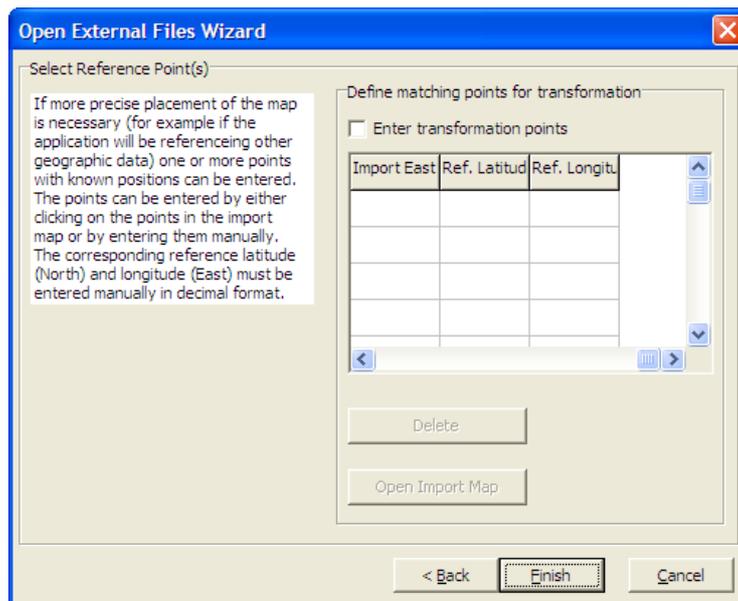


Figura 3.6

Calibración con puntos del mapa en Coordenadas Geográficas

f) Paso 6.

Ya en la ventana del programa *MapTool* se podrá dibujar la ruta del dispositivo móvil, además de ello se debe generar el *Cell Pattern* en la pestaña *Tools*. Después de eso en la pestaña *File* se escoge *Save Simulation Files...* y se generarán los archivos que sirven para los propósitos de la simulación.

Una vez obtenida los archivos de texto con la información requerida es necesario procesarlos para su análisis directo en *MatLab* y para ello se cuenta con dos rutinas llamadas *read_RoutFile.m* y *read_CellData.m*; estas rutinas son programas que los entiende *MatLab* y además usan ciertas funciones propias de lectura y obtención de datos a partir de un archivo de texto.

3.1.4 Proceso de lectura de los archivos de datos

A continuación se explica el programa `read_RoutFile.m`, que es el encargado del proceso de lectura y adquisición de datos de los archivos de texto con la información obtenida del programa *MapTool*. Proceso similar al seguido por el programa `read_CellData.m` para la obtención de sus datos.

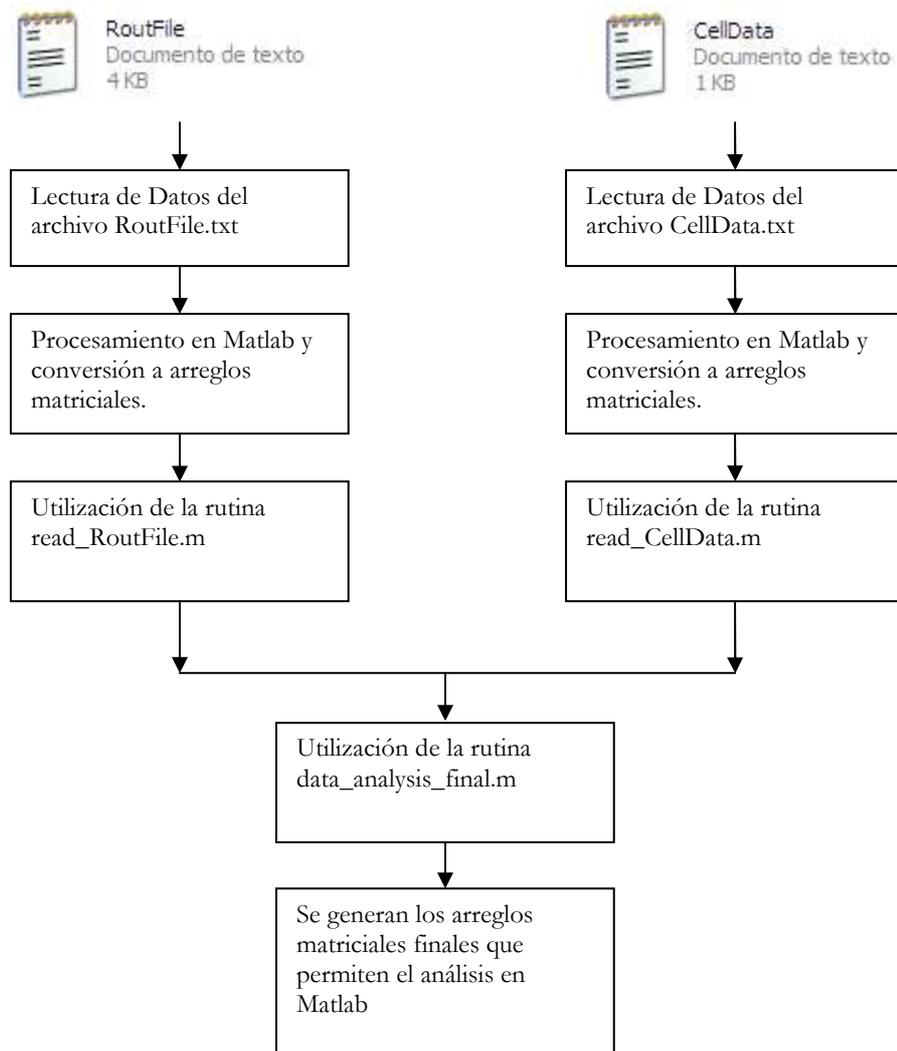


Figura 3.7
Diagrama del procesamiento de los datos

Una vez realizado este proceso con los archivos `RoutFile.txt` y `CellData.txt` se obtienen los datos de forma que entran a un procesamiento en donde son ordenados en forma matricial y en donde además se asocian los datos de las BS más cercanas con cada muestra de posición que se obtiene de la traza de la ruta en el mapa mediante *MapTool*. De todo este

proceso se encarga el archivo `data_analysis_final.m` y se lo encuentra en la parte de anexos debidamente comentado. De este proceso se obtienen los siguientes arreglos matriciales:

cell_local: es una matriz de tamaño $n \times 7$ donde n depende del número de BS y 7 representa las columnas en las que están la información de su ubicación y datos de las antenas.

COLUMNA1	TIPO DE INFORMACIÓN
1	no se usa (para un alcance mayor este debería incluir el nombre específico de la BS)
2	dato de posición de la latitud
3	dato de posición de la longitud
4	dato de la altitud promediada
5	dato del radio de cobertura de la BS
6	dato del ángulo de cobertura (sirve en el caso de antenas sectorizadas)
7	no se usa (en este espacio se puede incluir la variable <i>type</i> que indica el tipo de antena omnidireccional o sectorizada según sea el caso)

Tabla 3.1

Información de los datos ubicados en las variables *cell_local*

data_track_nearBTS: son el mismo grupo de datos duplicados por ser el que mayor cantidad de información usa y que tienen un tamaño $n \times 19$ donde n es el número de mediciones de la posición realizada y 19 son las columnas con los datos que se describen a continuación:

COLUMNA1	TIPO DE INFORMACIÓN
1	dato de posición de la latitud de la n medición
2	dato de posición de la longitud de la n medición
3	dato de la altura de la n medición
4	dato de posición de la latitud de la n medición para la 1ra. BTS más cercana
5	dato de posición de la longitud de la n medición para la 1ra. BTS más cercana
6	distancia de la medición a la BTS
7	estimación del tiempo de llegada de la señal a la 1ra. BTS más cercana
8	dato de posición de la latitud de la n medición para la 2da. BTS más cercana
9	dato de posición de la longitud de la n medición para la 2da. BTS más cercana
10	distancia de la medición a la BTS
11	estimación del tiempo de llegada de la señal a la 2ra. BTS más cercana
12	dato de posición de la latitud de la n medición para la 3ra. BTS más cercana
13	dato de posición de la longitud de la n medición para la 3ra. BTS más cercana
14	distancia de la medición a la BTS
15	estimación del tiempo de llegada de la señal a la 3ra. BTS más cercana
16	dato de posición de la latitud de la n medición para la 4ta. BTS más cercana
17	dato de posición de la longitud de la n medición para la 4ta. BTS más cercana
18	distancia de la medición a la BTS

19	estimación del tiempo de llegada de la señal a la 4ta. BTS más cercana
----	--

Tabla 3.2

Información de los datos ubicados en las variables *data_track_nearBTS* y *track_nearBTS*

Finalmente los datos son guardados en el archivo *previous_data.mat* que será usado directamente para las simulaciones de localización mediante la técnica del ToA y del TDoA.

3.2 Diagrama General del proceso de simulación.

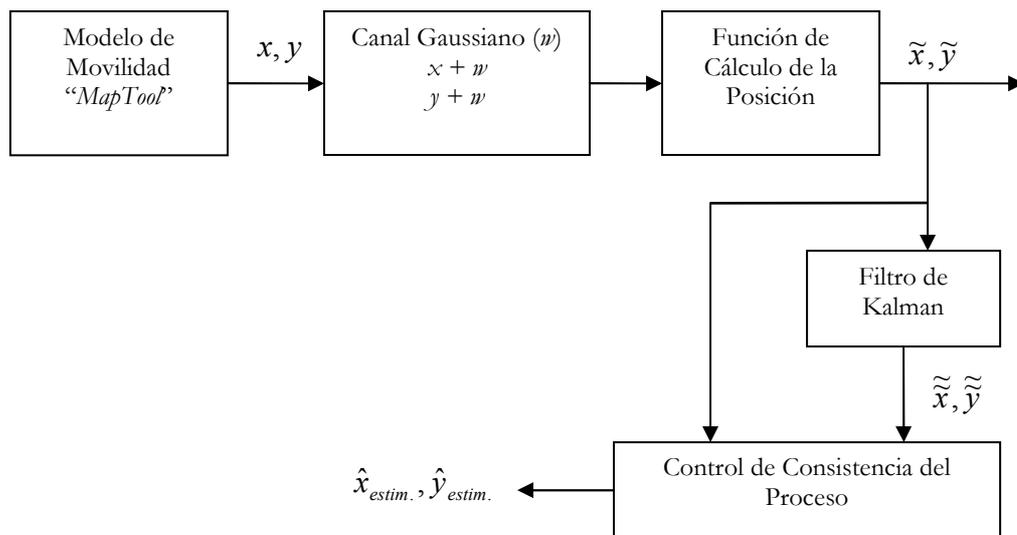


Figura 3.8

Diagrama General del proceso de simulación

En la figura 3.8 se puede observar el flujo de los datos de los distintos procesos para obtener la estimación de la posición. En la primera fase se obtienen las mediciones x, y del programa *MapTool* que se generan en base a un Modelo de Movilidad en el que se fijan los parámetros de velocidad, número de Estaciones Base, y ruta del dispositivo móvil. En la siguiente etapa se introduce el ruido generado por el canal, que se lo asume como de tipo Gaussiano (w). El bloque posterior determina la posición en base a las técnicas de localización y obteniéndose una primera estimación de la posición. Inmediatamente esos estimados entran al Filtro de Kalman y se genera una segunda estimación. Finalmente en el último bloque de Control de consistencia del Proceso se realiza una verificación entre la estimación \tilde{x}, \tilde{y} y la estimación $\tilde{\tilde{x}}, \tilde{\tilde{y}}$; con el objetivo de tener un filtro adicional que de encontrar inconsistencias al momento del refinamiento de la posición con el Filtro de Kalman el sistema tenga la posibilidad de usar directamente la estimación en base a la técnica de localización basada en ToA ó TDoA.

3.2.1 Localización mediante la técnica del ToA aproximada con Torrieri

Para la simulación mediante la técnica del ToA se sigue lo explicado en el capítulo 2 en el punto 2.3.2, haciendo las modificaciones respectivas para el manejo de las variables y llevar a cabo la simulación con *MatLab*. Como se ve brevemente en las líneas 15 a 18 se asume un error aditivo Gaussiano de media cero y varianza sigma. El valor de sigma se lo usa de las experimentaciones y análisis realizados del *SATURN Report D621*, de la Universidad Politécnica de Cataluña, en donde se ha analizado el problema tomando en cuenta un desempeño eficiente de las técnicas de localización (sus resultados son los mejores posibles). De esta forma la precisión obtenida depende de las varianzas de las mediciones todo lo cual está dado por los cotas de Cramer-Rao (CRB *Cramer-Rao Bounds*). Las ecuaciones de CRB han sido obtenidas para arreglos de antenas en la configuración de $\lambda/2$ para el canal de subida y arreglos múltiples para el canal de subida y bajada [12].

```

1. %=====
2. %En esta sección se procederá a analizar los datos para la técnica del ToA
3. %con la aproximación de Torrieri
4. %Universidad San Francisco de Quito.- Santiago Silva P.
5. %=====
6. clear all
7. close all
8. load previous_data.mat
9. %=====
10. %El siguiente análisis cargará los datos de los tiempos de llegada con la
11. %desviación estándar que se ha obtenido de estudios y formulaciones
12. %anteriores. Esto con el objetivo de alimentar la técnica del ToA y TDoA.
13. sigma = 0.125e-6; %desviación estándar en el tiempo de llegada
14. time_length=length(track_nearBTS);
15. track_nearBTS(:,7) = track_nearBTS(:,7) + sigma*(randn(time_length,1));
16. track_nearBTS(:,11) = track_nearBTS(:,11) + sigma*(randn(time_length,1));
17. track_nearBTS(:,15) = track_nearBTS(:,15) + sigma*(randn(time_length,1));
18. track_nearBTS(:,19) = track_nearBTS(:,19) + sigma*(randn(time_length,1));
19. %=====
20. c=3e8; %Velocidad de la luz para los cálculos mediante ToA
21. %=====
22. %conversión de los datos de la ruta y las BTS a coord. UTM
23. [x_track,y_track,utmzone_track] =
    deg2utm(track_nearBTS(:,1),track_nearBTS(:,2));
24. [x_cell,y_cell,utmzone_cell] = deg2utm(cell_local(:,2),cell_local(:,3));
25. %matriz de la estimación por el método de Torrieri (Se guarda la estim.)
26. torrieri_estim_toa = zeros(length(track_nearBTS),2);
27. %=====
28. %=====
29. %localización por ToA
30. for i = 1:length(track_nearBTS);
31.     plot(x_track,y_track,'c')
32.     hold on
33.     grid on
34.     plot(x_cell,y_cell,'bx')
35.     %=====
36.     %se necesitan usar coordenadas UTM para visualizar los datos.
37.     [coord_BTS_x1,coord_BTS_y1,utmzone_BTS_1] =
        deg2utm(track_nearBTS(i,4),track_nearBTS(i,5));
38.     [coord_BTS_x2,coord_BTS_y2,utmzone_BTS_2] =
        deg2utm(track_nearBTS(i,8),track_nearBTS(i,9));

```

```

39.     [coord_BTS_x3,coord_BTS_y3,utmzone_BTS_3] =
deg2utm(track_nearBTS(i,12),track_nearBTS(i,13));
40.     %[coord_BTS_x4,coord_BTS_y4,utmzone_BTS_4] =
deg2utm(track_nearBTS(i,16),track_nearBTS(i,17));
41.     %-----%
42.     %Se visualizan las BTS
43.     plot(coord_BTS_x1,coord_BTS_y1,'g^:');
44.     plot(coord_BTS_x2,coord_BTS_y2,'r^:');
45.     plot(coord_BTS_x3,coord_BTS_y3,'k^:');
46.     %plot(coord_BTS_x4,coord_BTS_y4,'^');
47.     plot(x_track(i),y_track(i),'mx') %se visualiza en primera instancia el
punto real con una 'x'
48.     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
49.     %Aproximación de Torrieri y determinación de las varianzas para cada
50.     %coordenada. Además se inicializan ciertos valores.
51.     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
52.     t = [ track_nearBTS(i,7);
53.         track_nearBTS(i,11);
54.         track_nearBTS(i,15)];
55.         %track_nearBTS(:,19)];
56.     %localizaciones geográficas de las BTS
57.     s1 = [coord_BTS_x1,coord_BTS_y1]';
58.     s2 = [coord_BTS_x2,coord_BTS_y2]';
59.     s3 = [coord_BTS_x3,coord_BTS_y3]';
60.     %s4 = [coord_BTS_x4,coord_BTS_y4]';
61.     %se determina un r0, para empezar la aproximación de Torrieri.
62.     r0= [(coord_BTS_x1 + coord_BTS_x2)/2,(coord_BTS_y1 + coord_BTS_y2)/2]';
63.     %plot(r0(1,1),r0(2,1),'kp')
64.     %matriz F del sistema de ecuaciones después de la linealización
65.     F = [ (r0'-s1')./norm(r0-s1);
66.         (r0'-s2')./norm(r0-s2);
67.         (r0'-s3')./norm(r0-s3)];
68.     %vector d0, de las distancias calculadas del mobil a la BTS
69.     d0 = [ norm(r0-s1);
70.         norm(r0-s2);
71.         norm(r0-s3)];
72.     %varianza en las mediciones de los tiempos
73.     sigma2 = 0.125e-6^2;
74.     %matriz de covarianzas del proceso de medición
75.     Ne = [ sigma2 0 0;
76.         0 sigma2 0;
77.         0 0 sigma2];
78.     %-----%
79.     %se empieza un ciclo iterativo de torrieri, para estimar la posición
80.     %del mobil dadas las estadísticas que se conocen. Se ha concluido que
81.     %la linealización alcanza su mejor estimación después de 4 ó 5
82.     %iteraciones.
83.     %-----%
84.     for ki = 1:10
85.         r_toa = r0 + c * inv(F'*inv(Ne)*F) * F' * inv(Ne) * (t - d0./c);
86.         r0 = r_toa;
87.         %matriz F del sistema de ecuaciones después de la linealización
88.         F = [ (r0'-s1')./norm(r0-s1);
89.             (r0'-s2')./norm(r0-s2);
90.             (r0'-s3')./norm(r0-s3)];
91.         %vector d0, de las distancias calculadas del mobil a la BTS
92.         d0 = [ norm(r0-s1);
93.             norm(r0-s2);
94.             norm(r0-s3)];
95.         %plot(r_toa(1,1),r_toa(2,1),'k.')
96.     end
97.     c_toa = c^2 * inv(F'*inv(Ne)*F);
98.     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
99.     %se guardan los datos estimados por Torrieri
100.     torrieri_estim_toa(i,1) = r_toa(1,1);
101.     torrieri_estim_toa(i,2) = r_toa(2,1);
102.     torrieri_estim_toa(i,3) = c_toa(1,1);
103.     torrieri_estim_toa(i,4) = c_toa(2,2);

```

```

104.     plot(r_toa(1,1),r_toa(2,1),'k.')
105.     hold off
106.     pause (0.1)
107. end
108. hold on
109. plot(torrieri_estim_toa(:,1),torrieri_estim_toa(:,2),'k')
110. figure
111. hold on
112. grid on
113. plot(torrieri_estim_toa(:,1),torrieri_estim_toa(:,2),'k-')
114. plot(x_track,y_track,'c')
115. %=====
116. %Ahora se salvan los datos que son de interés
117. save ToA_torrieri_3BTS.mat cell_local track_nearBTS torrieri_estim_toa
    c_toa
118. clear all
119. load ToA_torrieri_3BTS.mat

```

Figura 3.9

Programa para localización mediante la técnica del ToA

En la Figura 3.9 se puede ver el programa para el cálculo del ToA, en la línea 13 se determina la desviación estándar de las mediciones del tiempo según [12], en las líneas 14 a 18 se procede a infectar de ruido las mediciones del tiempo de llegada de las señales. En las líneas 23 y 24 se cambian los valores de las coordenadas de las BS y de la posición en coordenadas UTM, para trabajar en unidades de metros. En las siguientes líneas se comentan los procesos para la visualización de los datos en un lazo iterativo, nótese que en las líneas 40 y 46 se han comentado para el caso de tener 4 BS disponibles. A partir de la línea 48 empieza el ciclo de la aproximación de Torrieri, para ello se cargan los tiempos de llegada estimados (los que han sido infectados previamente con ruido Guassiano) y las coordenadas de las BS. En la línea 62 se procede a determinar un punto inicial de ubicación que se considera el punto medio entre las 2 BS más cercanas al móvil. En las siguientes líneas se definen las matrices de la linealización de Torrieri según lo explicado en el punto 2.3, para después en la línea 84 a 96 empezar el ciclo iterativo que aproxima la posición. Finalmente se puede ver en el programa un proceso para guardar los datos de interés y almacenarlos para su posterior análisis.

El procedimiento seguido para la localización mediante la técnica del ToA, puede ser usado para la técnica del TDoA haciendo los cambios en la linealización referente a la técnica. Todo esto puede hacer debido a que se sigue el mismo manejo de los datos, tanto en su infección con ruido como en el almacenamiento de los resultados.

3.2.2 Localización mediante la técnica del ToA de forma gráfica

Una experimentación adicional para la formulación de este proyecto es el asumir los tiempos de llegada como no Gaussianos. En esta experimentación los tiempos de llegada no cuentan con falsas detecciones, es decir nunca se detectará un tiempo de llegada menor al necesario para que la señal llegue del dispositivo móvil a la antena de la BS. Explicado esto siempre se detectarán tiempos de llegada mayores a los necesarios.

Para esto se toma el área de intersección de los círculos generados con el tiempo de llegada con su centro respectivo en la estación base de la que se genera la medición. En la Figura 3.10 se observa un área de intersección de color verde que correspondería al lugar más probable donde se podría localizar al dispositivo móvil, la posición real es un “x” en color rojo y la estimación en base al centroide⁸ representada en color amarillo.

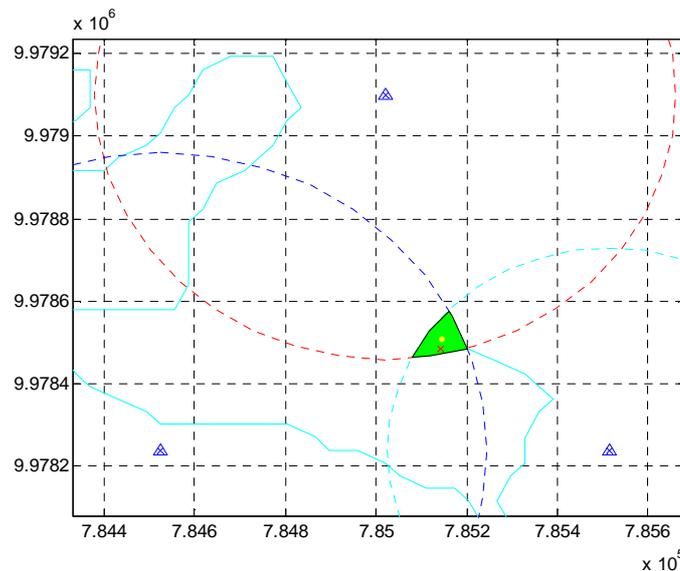


Figura 3.10

Localización Visual mediante la técnica del ToA

Esta formulación se la ha hecho estrictamente de forma didáctica y su aplicación no simplificaría el uso del filtro de Kalman. Sin embargo la presentación gráfica ayuda a entender directamente el funcionamiento de la técnica del ToA

⁸ El centroide o baricentro de un objeto X perteneciente a un espacio n -dimensional es la intersección de todos los hiperplanos que dividen a X en dos partes de igual n -volumen con respecto al hiperplano. Informalmente, es el promedio de todos los puntos de X . [Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Centroide>]

3.2.3 Filtrado de Kalman de los datos

Utilizando lo presentado en el Capítulo 2, en el punto 2.5.2 se ha procedido a utilizar las ecuaciones del Filtro de Kalman a lenguaje de *Matlab* y de esta forma realizar los análisis respectivos que permiten su inclusión dentro del estudio de las técnicas de localización y seguimiento de dispositivos móviles.

```

1.  %-----
2.  %Filtrado de Kalman. Ejemplo de seguimiento
3.  %-----
4.
5.  clear all
6.  close all
7.  %todos los datos expuestos para el filtrado de kalman extendido para 2
8.  %dimensiones se encuentra explicado y detallado en el trabajo respectivo
9.  %aquí se explicará brevemente los pasos seguidos y algunos comentarios en
10. %la programación.
11.
12. ss = 4;           %matriz de estado
13. os = 2;           %la matriz de observación
14. dt = 1;           %período de muestreo
15. F = [1 0 dt 0;
16.      0 1 0 dt;
17.      0 0 1 0;
18.      0 0 0 1];
19. C = [1 0 0 0;
20.      0 1 0 0];
21.
22. sigma_v1 = 0.01;  %varianza del ruido del proceso
23. sigma_v2 = 75;    %varianza del ruido de la medición
24. Q1 = sigma_v1*eye(ss); %contrucción de la matriz Q1
25. Q2 = sigma_v2*eye(os); %viene de la técnica del TDoA
26.
27. %-----%
28. %Ahora se van a generar algunas observaciones
29. x(:,1)=[10 10 1 0]';
30. x_clean(:,1)=x;
31. y = zeros(2,100);
32.
33. for i=1:100
34.     x(:,i+1) = F * x(:,i) + sqrt(sigma_v1)*randn(4,1);
35.     y(:,i) = C*x(:,i) + sqrt(sigma_v2)*randn(2,1);
36. end;
37.
38. %estimación inicial de estado, en nuestro caso en particular este dato
39. %provendrá de la estimación inicial por el método del TDoA
40. xhat(:,1)=[10 10 1 0]';
41.
42. %Estimación Inicial de la matriz de correlación de error filtrada
43. Kn=5*eye(4);
44.
45. %-----%
46. %algoritmo de Kalman.- estas ecuaciones son las que dominan el filtrado de
47. %Kalman y usan como base todo lo que se ha introducido con anterioridad.
48.
49. for i = 1:100
50.     G = F * Kn * C' * inv(C*Kn*C' + Q2);
51.     alpha(:,i) = y(:,i) - C*xhat(:,i); %cálculo de la ganancia
52.     xhat(:,i+1) = F*xhat(:,i) + G*alpha(:,i); %cálculo del error
53.     K = Kn - F * G * C * Kn; %actualizo la covarianza
54.     Kn = F * K * F' + Q1; %proyecto la covarianza
55. end;

```

```

56.
57.
58. plot(x(1,:),x(2,:), 'k--');
59. hold on;
60. plot(y(1,:),y(2,:), 'rv');
61. plot(xhat(1,:),xhat(2,:), 'b:');
62. hold on;
63. xlabel('coordenada x');
64. ylabel('coordenada y');
65. title('Filtrado de Kalman');
66. legend('Real', 'Observado', 'Estimado');

```

Figura 3.11

Programa para suavizado y seguimiento mediante el Filtro de Kalman

En la figura 3.11 se presenta el código en *Matlab* para realizar un ejemplo de seguimiento y entender el funcionamiento del Filtro de Kalman. En la línea 12 se define el tamaño de la matriz de correlación del ruido del proceso y en la línea 13 se define la matriz de correlación del ruido del proceso, estas sirven para realizar los estimativos de la señal y poder suavizar los resultados. En la línea 14 la variable dt es el período de muestreo respectivo para la señal. En la línea 15 se tiene la matriz F , la misma que representa las ecuaciones de posición y velocidad, conocida esta también como matriz de transición. En la línea 19, la matriz C es la matriz de medición para los datos que se obtienen del proceso de localización. En la línea 22 y 23 se dan valores a las varianzas del proceso y de la medición respectivamente y en la línea 24 y 25 se generan las matrices correspondientes. En las líneas 29 a 36 se generan los datos que van a ser estudiados para el Filtro de Kalman, el proceso seguido es el de crear iterativamente los puntos e infectarlos con el ruido de estadísticas conocidas. En la línea 40 se ha dado un punto de partida para el Filtro de Kalman, al igual que en la línea 43 se da un estimativo inicial de la matriz de correlación del error filtrado. Finalmente en la línea 49 a 55 se inicia el proceso de Filtrado de Kalman para suavizar los datos según lo explicado en el Capítulo 2, además en la figura 2.9 se puede ver un ejemplo del seguimiento de ruta directamente generada en *Matlab*.

3.2.4 Conexión con el servidor de *Google Earth*

Google Earth nos da la oportunidad de crear vínculos de red (*Networks Links*) que han sido explicados en el Capítulo 2 para visualizar los datos generados a partir de las técnicas de localización y el Filtrado de Kalman. La idea de utilizar el programa *Google Earth* se debe a la gran versatilidad que tiene este al momento de poder utilizarlo como un servidor de información Geográfico (GIS), esto debido principalmente a la facilidad de colocar etiquetas en los mapas que permitan la búsqueda y localización de ciertos lugares

estratégicos en sectores de interés dentro de una ciudad. Además al ser *Google Earth* una herramienta con motores de búsqueda avanzado y con la ventaja de contar con etiquetas de lugares por parte de los usuarios, se cuenta con información adicional que ayuda en la identificación de lugares alejados de perímetros urbanos y rurales.

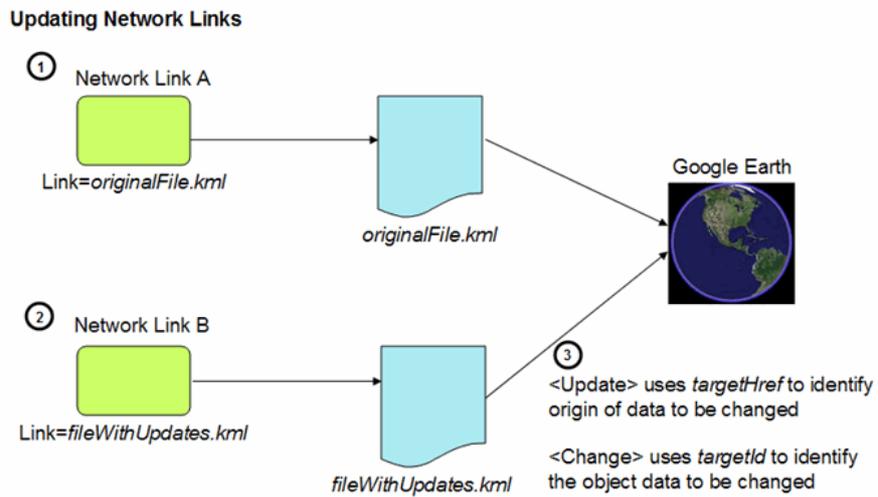


Figura 3.12

Visualización de la conexión con el servidor de *Google Earth*, mediante archivos *Network Link*
Fuente [16]

4 DISEÑO DE LOS EXPERIMENTOS

En este capítulo se detallan los experimentos que se siguieron para analizar las técnicas de localización, conjuntamente se tiene una sección de pre-diseño de los experimentos donde se estudian aspectos que permitieron evaluar la herramienta *MapTool* para la generación de la ruta, así como de programas propios escritos en *Matlab* para la localización mediante ToA y TDoA, y el suavizado mediante Filtro de Kalman. Todo esto se lo hace en este capítulo, llegando incluso a visualizar algunos aspectos y resultados, dejando de esa forma completamente abierto el capítulo 5 para la presentación de los resultados de las técnicas de localización y Filtro de Kalman

4.1 Pre-diseño del experimento

Antes de proceder con el detalle de los experimentos a realizar en este trabajo es necesario hablar de ciertos aspectos que restringirán el uso de las herramientas utilizadas en esta tesis que no han sido desarrolladas específicamente para este trabajo. Tal es el caso de la herramienta *MapTool*, que al ser diseñada para el desarrollo de aplicaciones para servicios de localización, no tiene un enfoque en el estudio y análisis de la técnica en sí misma, lo cual ha restringido el desarrollo de escenarios de la forma que se explica a continuación.

1. Como se detalla más ampliamente en el punto 4.1.1, *MapTool* no genera una trayectoria cercana a la dibujada en se ventana principal. Después de generar los archivos que se usarán en la simulación estos sufren un proceso de cuantización de la trayectoria. Esto por la incapacidad de *MapTool* de manejar aproximaciones decimales en los datos de latitud y longitud que le den mayor precisión.
2. *MapTool* maneja un periodo de muestreo de $dt=10seg$. Lo cual limita el manejo de los periodos o al menos restringe su uso a determinadas velocidades, siendo que para las simulaciones de este trabajo se ha visto necesario el uso de un periodo $dt=1 seg$. Este dato se lo ha pensado en función del Filtro de Kalman, que también trabaja en función del tiempo de muestreo de la señal para realizar la predicción, siendo 1 *seg* un dato que simplifica los cálculos y el manejo de las ecuaciones del filtro.

Por este motivo se pensó en la siguiente solución que permitirá usar el tiempo de muestro de $dt=1 seg$. en el Filtro de Kalman aún cuando *MapTool* maneje un tiempo de muestro distinto. Primeramente dado que no se asumen efectos del canal en la señal que se usa para estimación de la posición no hay ningún problema al asumir que dada

una determinada velocidad con un periodo de muestro, existe un desplazamiento. Por eso si se puede mantener de alguna forma el desplazamiento según las necesidades del proyecto y conociendo el periodo de muestro que se necesita ($dt=1 \text{ seg}$) se puede realizar lo siguiente, sabiendo que la mínima velocidad que *MapTool* maneja es de 1 km/h .

$$\text{velocidad} = 1 \text{ Km/h } (0,28 \text{ m/s})$$

$$d = v * dt = 0,28 \text{ m} * 10 \text{ seg.} = 2,80 \text{ m.}$$

De esto se puede ver que el mínimo espacio que se puede tener es de 2,80 metros. Lo que a su vez limita el uso de determinadas velocidades que no se podrán utilizar en los experimentos o deberán tener un periodo de muestreo mayor.

<i>Velocidad deseada en Km/h</i>	<i>Espaciamiento en metros, con dt = 1seg.</i>	<i>Velocidad necesaria en MapTool (Km/h)</i>
1	0,28	n/a
2,5	0,70	n/a
5	1,40	n/a
20	5,60	2
40	11,20	4
50	14,00	5
60	16,80	6
80	22,40	8
100	28,00	10

Tabla 4.1

Equivalencias de velocidades entre diferentes periodos de muestreo

3. El manejo de la velocidad del dispositivo móvil que se mueve en la trayectoria que se genera en el programa *MapTool*, es fija y se no se puede manipular. Con esto queda imposibilitada la opción de tener escenarios en donde el dispositivo móvil tenga una aceleración o cambios de velocidad.
4. Las estaciones base se generan de forma automática y en función de los parámetros de radio de cobertura. Siendo que una vez generada la simulación, no existe la posibilidad de colocar estaciones base en puntos específicos del área de cobertura.

4.1.1 Análisis de la trayectoria obtenida a partir de la herramienta *MapTool*

Debido a ciertas limitaciones de precisión que tiene la herramienta *MapTool*, las trayectorias generadas en el programa no corresponden a lo que se visualiza en su pantalla principal al momento de ser reconstruidas en *Matlab*. Este error puede ser entendido como un error de cuantización de la trayectoria por efecto de la aproximación decimal. En la figura 4.1 se puede observar la trayectoria dibujada en la ventana principal de *MapTool* y en la figura 4.2 se ve la trayectoria que ha generado el programa reconstruida en *Matlab*.

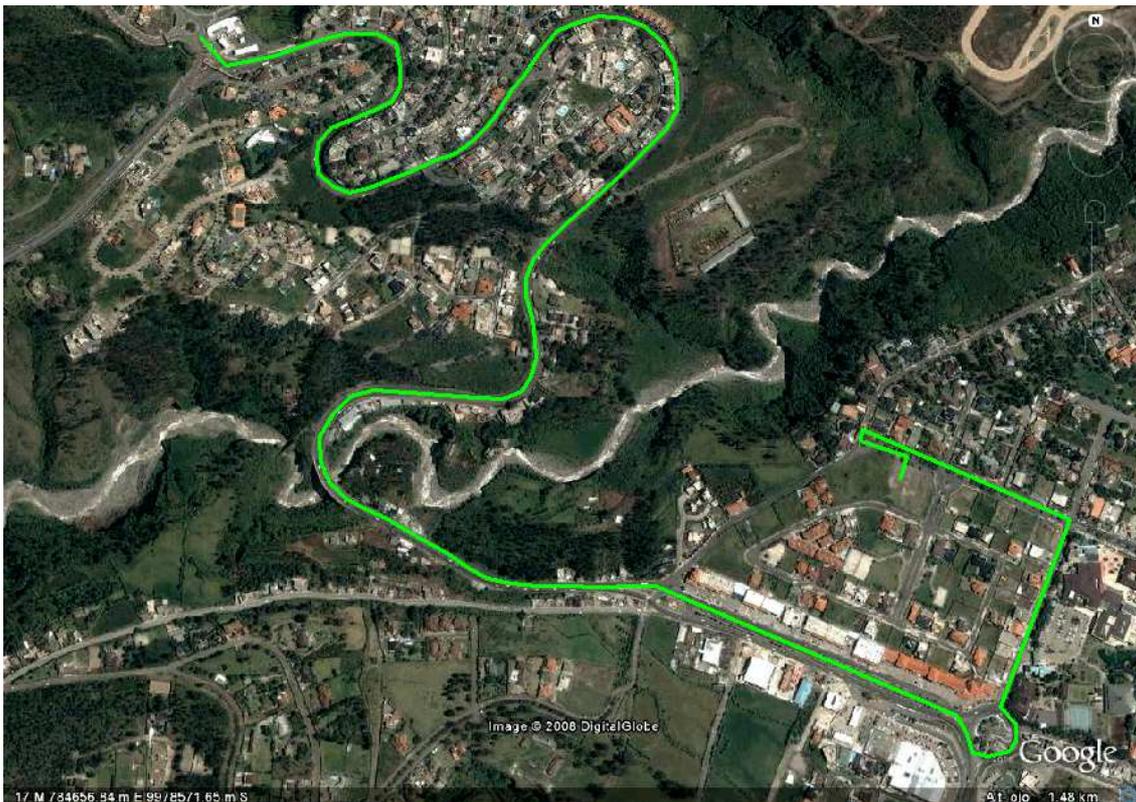


Figura 4.1

Ruta real que se ha dibujado en *MapTool*, esta ruta es la que idealmente sigue el móvil para llegar a su destino.

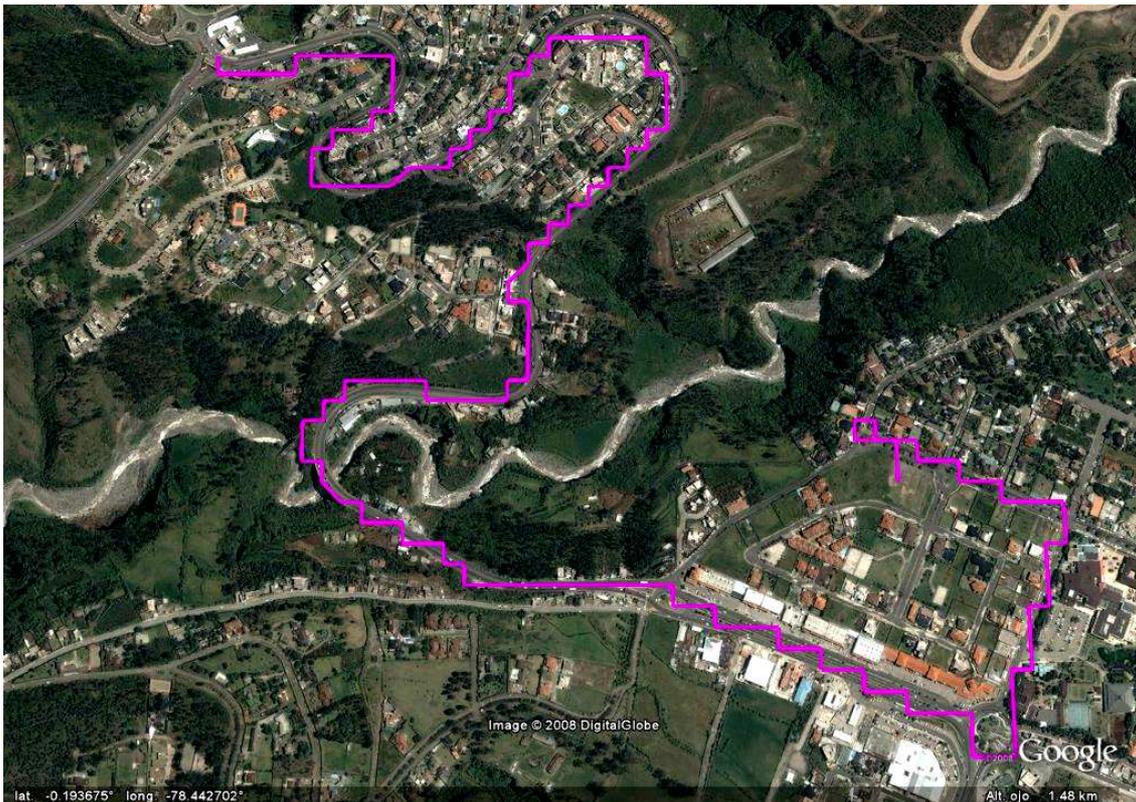


Figura 4.2

Ruta reconstruida a partir del trayecto generado en *MapTool*, se puede notar que a pesar de mantener semejanza con la ruta real, la ruta de *MapTool* ha perdido cierta continuidad y precisión

4.1.2 Determinación del Error de cuantificación

Como se mencionó en el punto 4.1.1 la aproximación de la señal mediante el programa *MapTool*, se lo ha considerado como un error de cuantificación o ruido de cuantificación, que se lo entiende como una distorsión en la señal que se introduce por el proceso de cuantificación y que resulta de igualar los niveles de las muestras de amplitud continua a los niveles de cuantificación más próximos. Para el caso del cuantificador ideal se trata del único error que introduce el proceso.

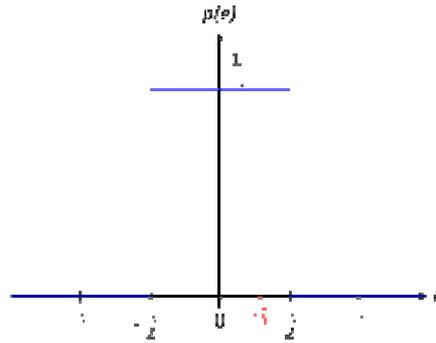


Figura 4.3

Función de densidad de probabilidad de los valores del error de cuantificación. Se trata de una distribución uniforme continua en el rango $(-\Delta/2, \Delta/2)$. Su varianza es de $\Delta^2/12$ y su desviación estándar (σ_e) está marcada en rojo.

Si el error de cuantificación se mantiene uniforme en el rango $(-\Delta/2, \Delta/2)$ (Figura 4.3), el valor medio del error es, por tanto, cero y la potencia del ruido en toda la banda de Nyquist con relación al escalón de cuantificación es la varianza σ_e^2 de esta distribución uniforme:

$$\sigma_e^2 = \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} e^2 p(e) de = \frac{1}{\Delta} \int_{-\Delta/2}^{\Delta/2} e^2 de = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\Delta^3}{12} \right) = \frac{\Delta^2}{12}$$

En este error de cuantificación el Δ es de 1 segundo, lo que traducido a metros equivale alrededor de 30 metros [23][24].

Finalmente a pesar de haber determinado el error, para los fines de esta tesis la trayectoria de la Figura 4.2 se ha de considerar como la ruta real y la que se ha de tomar como base para la determinación del error de aproximación con las técnicas de localización.

4.1.3 Suavizado de la curva mediante Matlab

Como se ha explicado en el punto anterior, el error de cuantización introduce un error adicional a las simulaciones que en primera instancia limitan su precisión y aplicación posterior en el Filtro de Kalman, es por ello que se ha seguido un procedimiento en *Matlab* que nos permite suavizar la trayectoria, para asemejarla lo más posible a la trayectoria real y de esa forma realizar un trabajo más acercado a la realidad del problema.

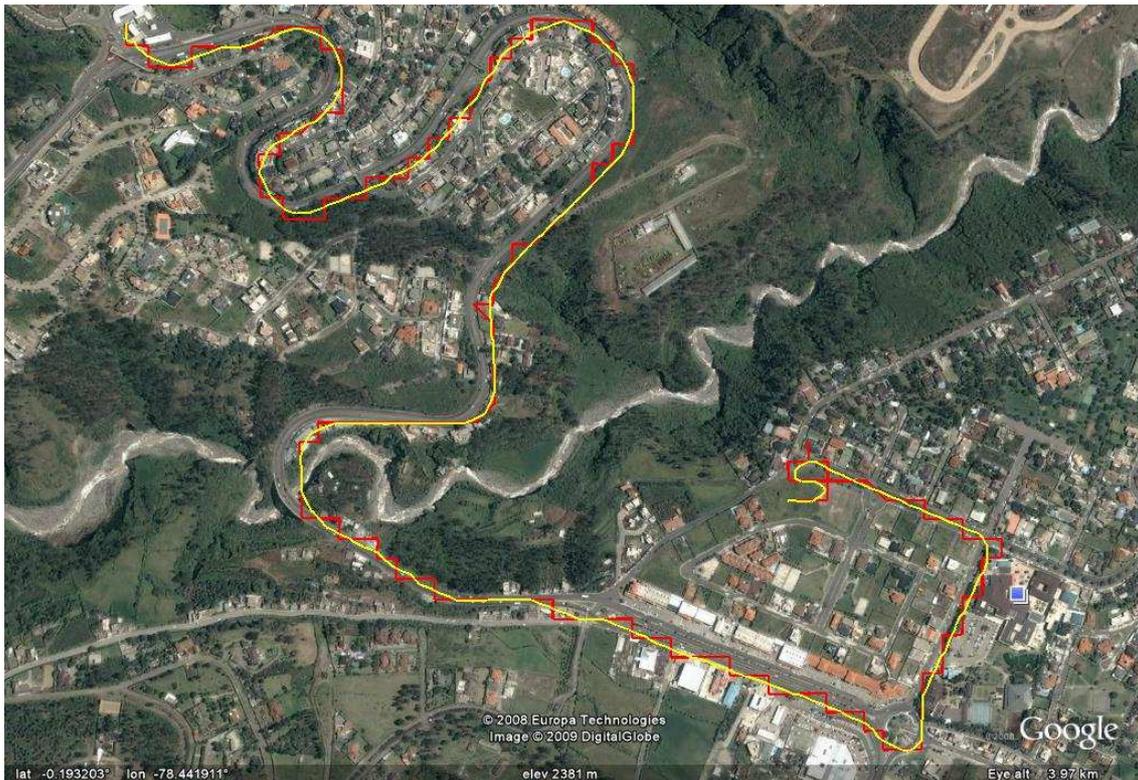


Figura 4.4

Ruta reconstruida a partir del trayecto generado en *MapTool*, la ruta real se presenta en color rojo la, la aproximación de la ruta que se ha suavizado en *Matlab* es de color amarillo.

En la Figura 4.3 se puede observar que se realizó el proceso de suavizado de la ruta en *Matlab* con el propósito de obtener una trayectoria lo más ajustada a la realidad. Sin embargo mirando la ruta detenidamente esta no se ajusta a la trayectoria de la carretera, pero a pesar de ello se ha asumido estos datos como los reales con el objetivo de llevar a cabo las simulaciones. Este suavizado se lo puede hacer gracias a la función *smooth*, en donde se utilizó el valor del error de cuantización para generar la curva de color amarillo, esto se lo hizo para el primer experimento realizado, en los siguientes se debió observar un proceso de ajuste manual hasta obtener una curva que se ajuste a lo presentado en la gráfica.

4.2 Validación de los programas utilizados

El primer paso hacia la simulación de un dispositivo móvil con requerimientos de localización es determinar la ruta que va a seguir y dentro de ello se necesita validar los datos a usar. Es por esta razón que los datos que se obtienen a partir de *MapTool* y sin tener ruido presente, deben poder estimarse con cualquier técnica de localización de las usadas

en este trabajo y obtener la misma estimación de la ruta seguida. De esta forma se está validando que el proceso de localización está funcionando adecuadamente y se puede proceder a hacer el análisis posterior. La ruta utilizada en este caso corresponde al experimento 2 que se explica más ampliamente en este capítulo, de donde se visualiza la Figura 4.5 en *MatLab*.

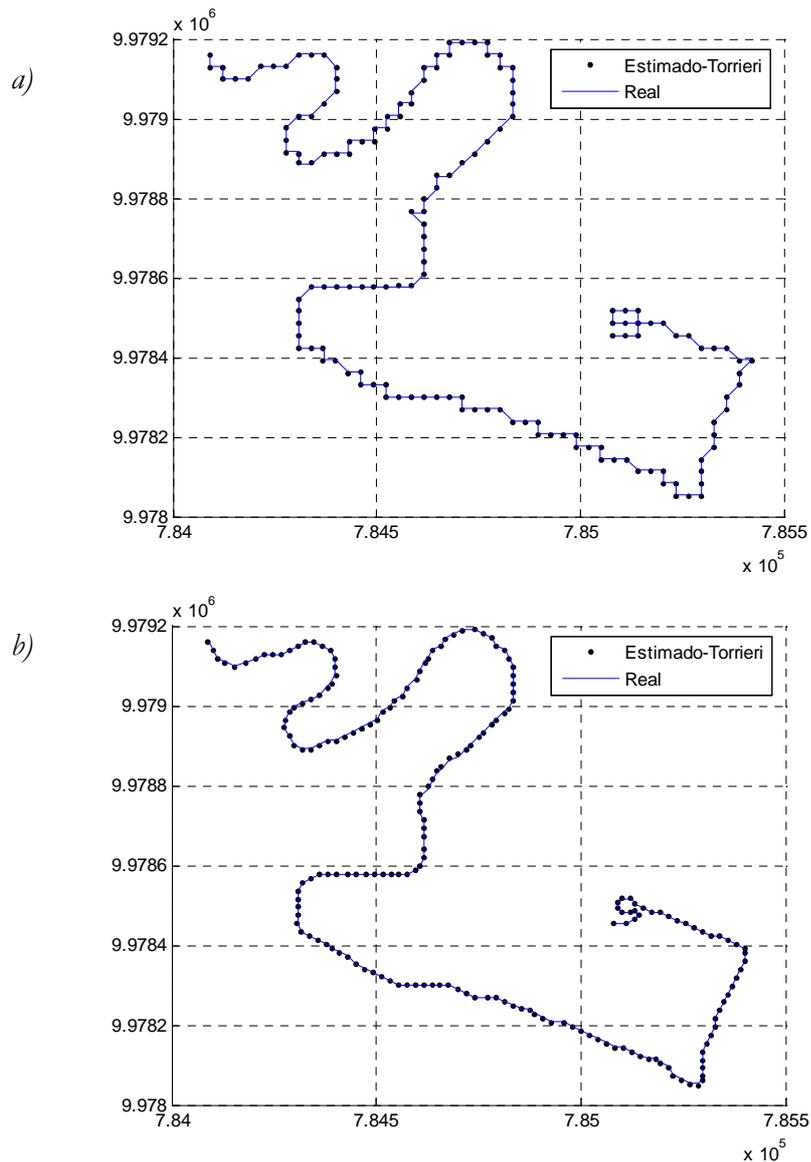


Figura 4.5

Gráfica de la validación de la técnica de localización (ToA con 3BS)

- a) Trayectoria con error de cuantización
- b) Trayectoria suavizada mediante *Matlab*.

En la figura 4.5 se puede observar en el *diagrama a* una línea de color azul que representa la trayectoria verdadera sobrepuesta con puntos de color negro que representa el aproximativo de la trayectoria mediante la técnica del ToA en ausencia de errores en la medición de los tiempos de llegada, de forma que las gráficas coinciden.

4.3 Localización iterativa de un mismo punto mediante ToA y TDoA.

Uno de los primeros experimentos que se realizaron para observar la eficacia de las técnicas de localización consiste en realizar la localización de un mismo punto por varias veces. Este simple experimento busca ver la eficacia de la técnica de localización de una forma general y además permitirá jugar con los parámetros del tiempo de llegada y el número de iteraciones necesarias para que las técnicas de localización converjan hacia la solución más óptima. Los resultados de este análisis se los presenta más adelante en el capítulo 5.

4.4 Área de Pruebas

Inicialmente se planteó la alternativa de usar varios escenarios de prueba en los que se simularía condiciones distintas para cada área, sin embargo se observó que estos escenarios no aportarían con información adicional. Por esta razón se ha simplificado el experimento y se usará un solo escenario de pruebas en el que se harán los análisis respectivos. La principal razón y motivación para usar un solo escenario de pruebas surgió a partir del simulador usado para generar las rutas, en el cual sin importar el mapa introducido se puede hacer los cambios necesarios para simular condiciones distintas tales como rangos de velocidades, alcance de las estaciones base, etc. En el siguiente gráfico se podrá observar las principales características de simulación que serán comunes para cualquier simulación que se haga independientemente del mapa que se utilice.

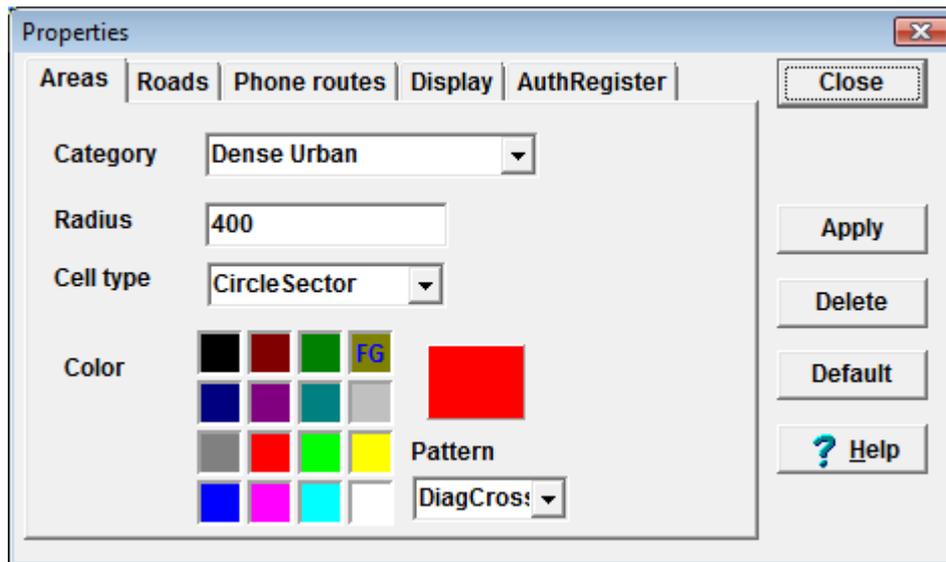


Figura 4.6

Cuadro de propiedades del Simulador *MapTool*, en el que se puede determinar el tipo de área de cobertura, radio de la BS y tipo de antena utilizada.

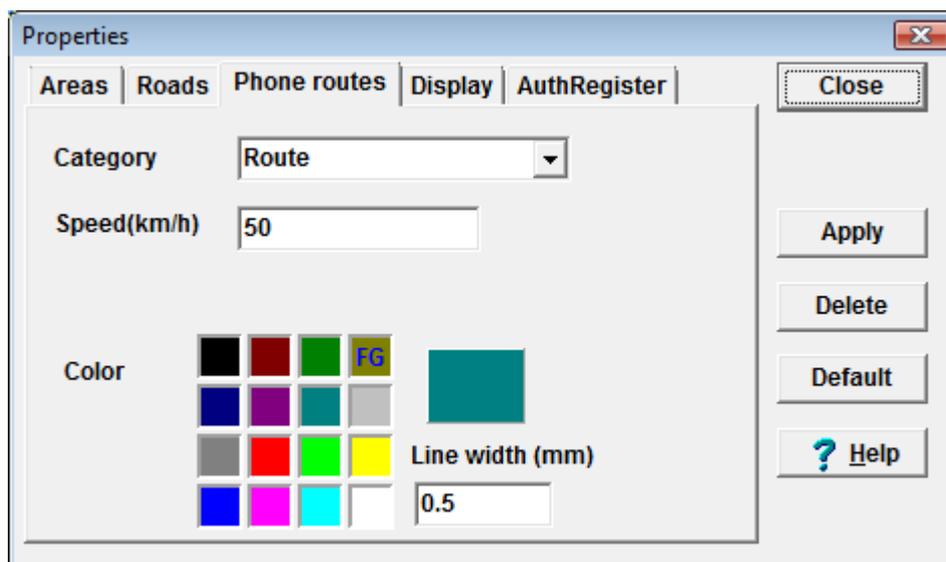


Figura 4.7

Cuadro de propiedades de *Maptool*, en donde se determina la velocidad del dispositivo móvil dentro de la simulación.

Como se puede ver el simulador *MapTool* ofrece parámetros limitados para la simulación y no tiene características del nivel de señal recibida, ni pérdidas por la propagación de la señal, por lo que queda justificado el uso de un sólo escenario de simulación dentro del estudio para este trabajo.

4.4.1 Explicación del escenario de pruebas

El escenario de simulación se ubicó en Cumbayá, en el cual se tomará directamente los datos sobre la vía Av. Interoceánica. Esto permitirá tener un escenario donde el movimiento se hace en un vehículo motorizado y recorre una vía claramente visible desde el servidor de *Google Earth*. Además sobre este escenario se harán varios ensayos sobre la velocidad y número de estaciones base disponibles para la triangulación de la posición. En la Figura 4.8 se puede observar la trayectoria que siguió el dispositivo móvil para su simulación.

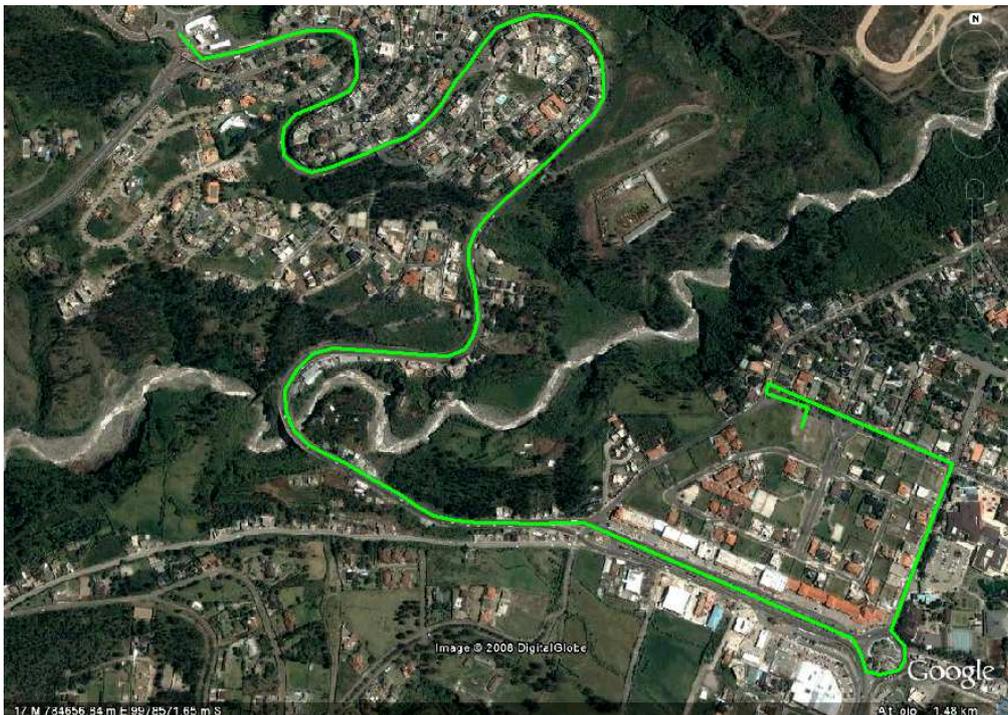


Figura 4.8

Mapa del Sector de Cumbayá con la ruta real dibujada en *MapTool*

4.5 Inicialización de la aproximación de Torrieri y Filtro de Kalman

Para el proceso de estimación es necesario tener un punto de partida para que la técnica de Torrieri inicie la estimación hacia el lugar más probable donde se encontrará el dispositivo móvil. De manera similar el Filtro de Kalman necesita un dato inicial a partir del cual empezar el proceso de filtrado, sin embargo este dato se lo obtiene a partir de los datos que entrega la técnica de localización. Volviendo al problema inicial en la técnica de Torrieri, se planteó empezar la estimación usando como referencia el punto medio entre las dos

estaciones base (BS) más cercanas al dispositivo móvil al momento de realizar una solicitud de localización tal como se ilustra en la Figura 4.9.

Como complemento es necesario resaltar que en el punto 3.2.1 se explica de donde se utilizó el valor para introducir el ruido en el sistema y proceder al cálculo de la posición.

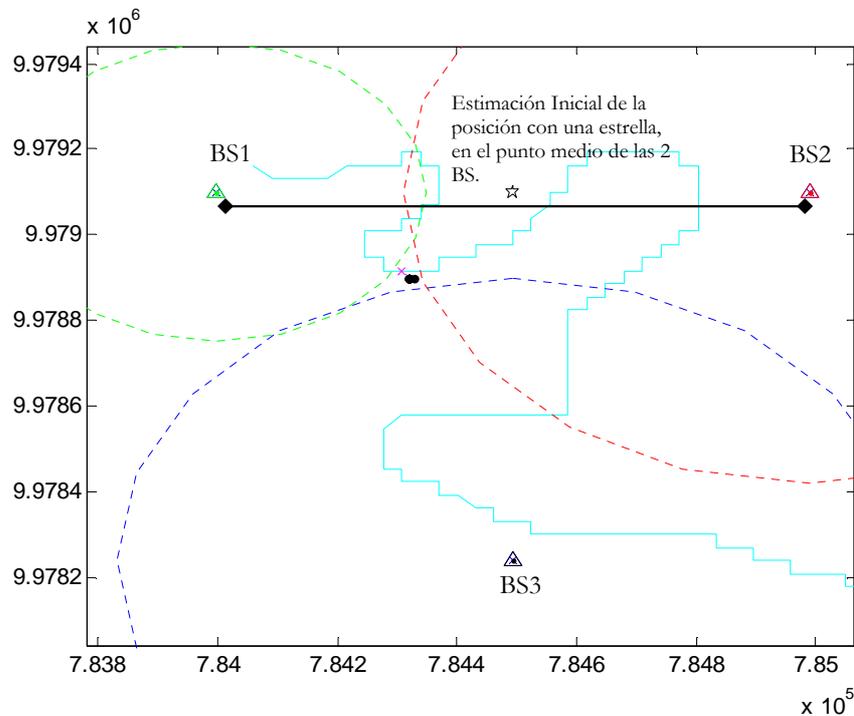


Figura 4.9
Inicialización del proceso de estimación en la técnica de Torrieri para ToA ó TDoA.

4.6 Variables de estudio

Para el escenario de simulación se ha planteado una serie de objetivos que nos permitirán esbozar las conclusiones finales de este trabajo. Es por ello que se detallarán específicamente que es lo que se quiere obtener de cada escenario planteado.

- Estudiar el funcionamiento del sistema de localización y del filtro en un rango de velocidades que van desde 10 hasta 80 Km/h.
- Visualizar y estudiar el comportamiento del filtro cuando se realiza una trayectoria semi-cerrada. Para ello se dará una vuelta sobre un redondel presente en la trayectoria.
- Ver de forma experimental el comportamiento del filtro y como este afecta en el refinamiento de la posición obtenida mediante las técnicas de localización planteadas.

- Determinar las limitaciones del sistema en cuanto al error de localización.

4.7 Experimentos de simulación en escenarios reales para ToA y TDoA con el Filtro de Kalman

Ya definidos los apartados respectivos a los experimentos de variables de estudio y del área de pruebas respectiva, se necesita definir ciertas variables propias del programa *MapTool* así como de variables en el error de la medición de los tiempos de llegada, muestreo, etc. Para cada experimento se plantearán diferentes simulaciones con el objetivo de tener la mayor cantidad de evidencia sobre el correcto funcionamiento del filtro y de las técnicas de localización. A continuación se detalla cada simulación en la Tabla 4.2.

	# Exp.	Velocidad def. en <i>MapTool</i>	Radio de Cobertura (metros)		Tipo de Antenas	Técnica de Localización
			Radio 1	Radio 2		
<i>Escenario de simulación</i>	1	10 Km./h	200	500	Omnidireccional	ToA y TDoA
	2	20 Km./h	500	1000	Omnidireccional	ToA y TDoA
	3	40 Km/h	500	1000	Omnidireccional	ToA y TDoA
	4	50 Km/h	500	-	Omnidireccional	ToA y TDoA
	5	80 Km/h	500	-	Omnidireccional	ToA y TDoA

Tabla 4.2
Variables del programa *MapTool* para las simulaciones

4.8 Presentación de resultados de los experimentos

Al momento de realizar los experimentos se involucran los mapas obtenidos desde *Google Earth* y que se procesaron con *MapTool*, según el procedimiento explicado en el capítulo 3, se siguen diferentes etapas en las que es posible visualizar la generación de las trayectorias, así como la presentación gráfica del proceso de ubicación, etc. Por ello se estimó necesario introducir un ejemplo del proceso intermedio hasta conseguir las gráficas cumulativas del error en cada coordenada.

a) Paso 1

Posterior a los pasos seguidos en el capítulo 3 en el que se indique la forma de empezar el análisis de las técnicas de localización, en la sección de resultados se ha seguido un proceso

por etapas de forma de tener la seguridad de que el proceso esta en pleno funcionamiento y que los resultados obtenidos mantienen un orden lógico. El primer paso consistió en graficar la trayectoria en *Google Earth* donde se buscaba observar una trayectoria que coincidiera lo más posible con la graficada en *MapTool*.

b) Paso 2

En el siguiente paso mediante *Matlab*, se introducen los datos en nuestro esquema de simulación y se calculan los tiempos de llegada de la señal con cada una de las Estaciones Base más cercanas y se los infecta con ruido aditivo gaussiano según lo explicado en el punto 3.2.1. Posterior a esto se realiza la estimación mediante la técnica del ToA o TDoA según sea el caso mediante la aproximación de Torrieri.

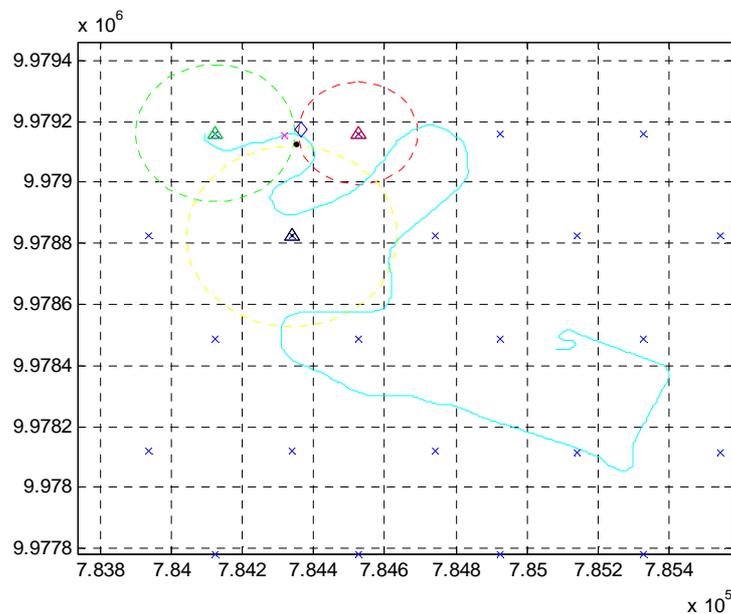


Figura 4.10

Ruta Real conjuntamente con la estimación a partir de la técnica del ToA-Torrieri de color rojo.

En la Figura 4.11 vemos la generación de la gráfica en la que se visualiza el resultado de la técnica del ToA mediante la aproximación de Torrieri. En la figura se puede observar como se estima la posición de forma gráfica, sin embargo este es un tanto complejo por lo que se ha limitado a presentarlo directamente y de ser necesario se puede hacer acercamientos al gráfico. Para nuestro estudio nos limitaremos a recoger los datos y presentar las gráficas cumulativas con los estadísticos de la señal, realizar los análisis respectivos y presentar los resultados.

c) Paso 3

Finalmente con lo analizado en la Tabla 2.3 es necesario introducir un valor en la varianza del proceso para proceder con el Filtro de Kalman. Esto es necesario con el objetivo de inicializar el filtro y su correcta selección mejorará los resultados del mismo. Para ello se ha escogido un rango de movilidad que disminuye conforme aumenta la velocidad en los experimentos y siguiendo lo explicado en la Tabla 4.1 para tener un espaciamiento de $dt = 1 \text{ seg}$. En la Tabla 4.3 se expone los valores de las varianzas que se usarán en los experimentos para determinar las curvas cumulativas del error respectivas a cada caso.

Velocidad Km/h	Velocidad m/s	Rango de movilidad	Varianza x (m^2/s^2)	Varianza y (m^2/s^2)
10	2,28	- 45° a + 45°	1,4487	1,7234
		- 25° a + 25°	0,5194	1,6507
		- 15° a + 15°	0,0216	1,2307
		- 10° a + 10°	0,0221	0,3328
20	5,56	- 45° a + 45°	14,3235	12,5137
		- 25° a + 25°	2,5898	0,9096
		- 15° a + 15°	0,0993	0,4551
		- 10° a + 10°	0,1004	2,0704
40	11,12	- 45° a + 45°	43,9924	37,6773
		- 25° a + 25°	25,4663	13,8194
		- 15° a + 15°	0,0981	6,7599
		- 10° a + 10°	0,0984	1,8733
50	13,90	- 45° a + 45°	11,5128	56,7601
		- 25° a + 25°	8,7804	11,4021
		- 15° a + 15°	1,1971	6,1288
		- 10° a + 10°	0,1372	16,1916
80	22,24	- 45° a + 45°	28,0387	141,6998
		- 25° a + 25°	8,1909	36,9407
		- 15° a + 15°	1,2447	17,1998
		- 10° a + 10°	0,0154	4,1655

Tabla 4.3

Varianzas del proceso en función del ángulo de movilidad.

En la Tabla 4.3 se han planteado las varianzas para los experimentos, como se puede observar a medida que se ha aumentado la velocidad los valores de la varianza aumenta, esto se lo aprecia en valores de *Rango de Movilidad* altos, en los casos que se tienen *Rangos de Movilidad* pequeños se puede observar que los valores son pequeños y que se mantienen constantes.

4.9 Resumen de los experimentos

En la Tabla 4.4 se hace una ampliación de cada experimento desglosándolos en función del radio de cobertura y su *Rango de Movilidad*.

# Exp.	Velocidad	Radio de Cobertura	Rango de Movilidad	Técnica de Localización	Valor de Varianza Utilizada
1	10 Km./h	200 m	25°	ToA y TDoA	0,5194 m ² /s ²
2	10 Km./h	500 m	25°	ToA y TDoA	0,5194 m ² /s ²
3	20 Km./h	500 m	25°	ToA y TDoA	0,9096 m ² /s ²
4	20 Km./h	1000 m	25°	ToA y TDoA	0,9096 m ² /s ²
5	40 Km/h	500 m	15°	ToA y TDoA	0,0981 m ² /s ²
6	40 Km/h	1000 m	15°	ToA y TDoA	0,0981 m ² /s ²
7	50 Km/h	500 m	10°	ToA y TDoA	0,1372 m ² /s ²
8	80 Km/h	500 m	10°	ToA y TDoA	4,1655 m ² /s ²

Tabla 4.4
Resumen de los experimentos

5 RESULTADOS

Los resultados de los ensayos para las técnicas de localización arrojan una serie de datos de los que se calculan ciertos estadísticos como la media y la varianza, los cuales permiten observar su comportamiento y verificar si cumple con las exigencias del estándar E911. Estos se presentan en este capítulo y se explicará brevemente los resultados obtenidos, bajo las condiciones que se han planteado en el capítulo 4.

5.1 Localización iterativa de un mismo punto mediante ToA y TDoA.

El primer experimento que se realizó para observar la eficacia de las técnicas de localización fue la de utilizar esta sobre un mismo punto, cambiando el error en la estimación del tiempo de llegada durante un número de iteraciones, todo esto con el objetivo de observar su comportamiento y tener algunos estadísticos iniciales para este proyecto.

<i>No. Iteraciones</i>	<i>Desviación estándar</i>		<i>Varianza</i>		<i>Valor medio</i>		<i>Valor medio del error absoluto</i>	
	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>x (m²)</i>	<i>y (m²)</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>
1000	15.83	18.83	250.57	354.48	0.91	-2.58	20.97	25.43
5000	15.99	19.05	255.58	362.74	0.76	-1.89	21.22	25.02
10000	16.26	18.94	264.45	358.68	1.04	-1.06	21.55	24.92

Tabla 5.1

Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante ToA con 4 Estaciones Base

<i>No. Iteraciones</i>	<i>Desviación estándar</i>		<i>Varianza</i>		<i>Valor medio</i>		<i>Valor medio del error absoluto</i>	
	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>x (m²)</i>	<i>y (m²)</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>
1000	18.82	19.14	354.25	366.37	0.51	-1.19	25.11	25.57
5000	19.10	19.44	364.71	378.07	1.07	-1.76	25.47	25.35
10000	19.42	19.08	376.97	363.90	0.30	-1.75	25.68	25.41

Tabla 5.2

Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante ToA con 3 Estaciones Base

No. Iteraciones	Desviación estándar		Varianza		Valor medio		Valor medio del error absoluto	
	<i>x</i> (m)	<i>y</i> (m)	<i>x</i> (m²)	<i>y</i> (m²)	<i>x</i> (m)	<i>y</i> (m)	<i>x</i> (m)	<i>y</i> (m)
1000	17.97	18.79	322.76	353.20	0.48	-2.47	23.81	24.89
5000	17.66	18.77	311.84	352.20	0.96	-1.64	23.28	24.44
10000	17.92	18.87	321.36	356.12	0.25	-1.62	23.81	24.32

Tabla 5.3

Estadísticos del error para el cálculo de la posición mediante TDoA con 4 Estaciones Base

De las tablas 5.1 y 5.2 se puede observar que en la técnica del ToA la localización cuando se realiza con 4 estaciones base es ligeramente superior a la realizada con 3 estaciones base. En los valores correspondientes al valor medio del error, se tomo los datos absolutos para entender de mejor forma la precisión de la técnica. De acuerdo a parte de los requerimientos presentados en la tabla 1.1, se puede observar que se cumple con el alcance de la localización en ambos requerimientos sin contar con el porcentaje relativo a las llamadas realizadas. En la técnica del TDoA en general se obtienen mejores resultados en los casos en la que la red presenta un *offset* en el reloj o su sincronización no es la adecuada. Sin embargo esta propiedad solo es referencial en este trabajo ya que no ha sido desarrollada o simulada en su funcionamiento.

De los resultados obtenidos se puede observar que la técnica del TDoA es ligeramente superior a la del ToA comparando los valores medios del error absoluto. Además en general se recomienda el uso de 4BS para TDoA, entre más estaciones base se tengan se entiende que el refinamiento de la posición mejorará.

5.2 Resultados y presentación de la gráfica cumulativa del error

5.2.1 Resultados de los experimentos, basado en la técnica de localización.

	<i>ToA(3BS) - x</i>			<i>ToA(4BS) - x</i>			<i>TDoA(4BS) - x</i>		
	$\delta_x (m)$	$\mu_x (m)$	m_{2x}	$\delta_x (m)$	$\mu_x (m)$	m_{2x}	$\delta_x (m)$	$\mu_x (m)$	m_{2x}
Exp. 1	35,85	-0,70	$1,29 \times 10^{+3}$	28,43	-0,52	$8,09 \times 10^{+2}$	30,53	0,11	$9,32 \times 10^{+2}$
Exp. 2	32,09	0,25	$1,03 \times 10^{+3}$	26,96	0,38	$7,27 \times 10^{+2}$	27,27	0,34	$7,44 \times 10^{+2}$
Exp. 3	32,82	0,25	$1,08 \times 10^{+3}$	26,07	0,62	$6,80 \times 10^{+2}$	26,56	0,71	$7,06 \times 10^{+2}$
Exp. 4	32,81	-2,32	$1,08 \times 10^{+3}$	26,17	-1,29	$6,87 \times 10^{+2}$	26,45	-1,49	$7,02 \times 10^{+2}$
Exp. 5	31,77	-1,10	$1,01 \times 10^{+3}$	26,44	-0,92	$7,00 \times 10^{+2}$	26,66	-1,05	$7,12 \times 10^{+2}$
Exp. 6	34,61	1,82	$1,20 \times 10^{+3}$	26,80	2,24	$7,23 \times 10^{+2}$	26,97	1,81	$7,31 \times 10^{+2}$
Exp. 7	32,65	4,24	$1,08 \times 10^{+3}$	24,99	2,07	$6,29 \times 10^{+2}$	25,03	2,07	$6,31 \times 10^{+2}$
Exp. 8	32,61	-3,24	$1,07 \times 10^{+3}$	26,91	-1,23	$7,26 \times 10^{+2}$	27,57	-1,61	$7,63 \times 10^{+2}$

	<i>ToA(3BS) - y</i>			<i>ToA(4BS) - y</i>			<i>TDoA(4BS) - y</i>		
	$\delta_y (m)$	$\mu_y (m)$	m_{2y}	$\delta_y (m)$	$\mu_y (m)$	m_{2y}	$\delta_y (m)$	$\mu_y (m)$	m_{2y}
Exp. 1	33,33	0,11	$1,11 \times 10^{+3}$	27,32	-0,12	$7,46 \times 10^{+2}$	29,52	0,23	$8,71 \times 10^{+2}$
Exp. 2	32,82	-0,46	$1,08 \times 10^{+3}$	27,43	-0,66	$7,53 \times 10^{+2}$	27,88	-0,82	$7,78 \times 10^{+2}$
Exp. 3	32,20	-1,36	$1,04 \times 10^{+3}$	26,52	0,04	$7,03 \times 10^{+2}$	27,13	-0,01	$7,36 \times 10^{+2}$
Exp. 4	32,29	-0,41	$1,04 \times 10^{+3}$	27,69	-0,25	$7,67 \times 10^{+2}$	28,33	-0,20	$8,03 \times 10^{+2}$
Exp. 5	32,24	0,33	$1,04 \times 10^{+3}$	28,00	0,61	$7,84 \times 10^{+2}$	28,25	0,83	$7,99 \times 10^{+2}$
Exp. 6	32,19	-1,06	$1,04 \times 10^{+3}$	27,74	-0,10	$7,70 \times 10^{+2}$	28,26	0,16	$7,99 \times 10^{+2}$
Exp. 7	33,71	-0,75	$1,14 \times 10^{+3}$	28,26	-0,75	$7,99 \times 10^{+2}$	28,52	-0,70	$8,14 \times 10^{+2}$
Exp. 8	33,83	-0,36	$1,14 \times 10^{+3}$	26,33	-1,98	$6,97 \times 10^{+2}$	27,07	-2,10	$7,37 \times 10^{+2}$

	<i>ToA(3BS) - Módulo</i>			<i>ToA(4BS) - Módulo</i>			<i>TDoA(4BS) - Módulo</i>		
	$\delta_R(m)$	$\mu_R(m)$	m_{2R}	$\delta_R(m)$	$\mu_R(m)$	m_{2R}	$\delta_R(m)$	$\mu_R(m)$	m_{2R}
Exp. 1	24,25	42,52	$2,40 \times 10^{+3}$	18,78	34,66	$1,55 \times 10^{+3}$	22,12	36,24	$1,80 \times 10^{+3}$
Exp. 2	21,71	40,43	$2,11 \times 10^{+3}$	17,91	34,03	$1,48 \times 10^{+3}$	18,40	34,39	$1,52 \times 10^{+3}$
Exp. 3	22,19	40,27	$2,11 \times 10^{+3}$	17,29	32,91	$1,38 \times 10^{+3}$	18,07	33,38	$1,44 \times 10^{+3}$
Exp. 4	21,43	40,78	$2,12 \times 10^{+3}$	17,45	33,87	$1,45 \times 10^{+3}$	17,74	34,47	$1,50 \times 10^{+3}$
Exp. 5	39,90	21,31	$2,05 \times 10^{+3}$	33,92	18,18	$1,48 \times 10^{+3}$	34,08	18,60	$1,51 \times 10^{+3}$
Exp. 6	23,51	41,01	$2,23 \times 10^{+3}$	17,04	34,63	$1,49 \times 10^{+3}$	17,55	34,90	$1,53 \times 10^{+3}$
Exp. 7	23,28	40,90	$2,21 \times 10^{+3}$	17,52	33,42	$1,42 \times 10^{+3}$	17,70	33,59	$1,44 \times 10^{+3}$
Exp. 8	23,43	40,75	$2,21 \times 10^{+3}$	18,24	32,94	$1,42 \times 10^{+3}$	19,36	33,46	$1,49 \times 10^{+3}$

Tabla 5.4

Resultados Estadísticos de las señales, basados en la técnica de localización en la que se asume que se está usando la aproximación de Torrieri. El estadístico m_2 se refiere al momento de orden 2 y equivale a tener $\mu^2 + \delta^2$ (donde μ corresponde al valor medio y δ a la desviación estándar)

5.2.2 Resultados de los experimentos posterior al filtro de Kalman.

	<i>ToA(3BS) - x</i>			<i>ToA(4BS) - x</i>			<i>TDoA(4BS) - x</i>		
	$\delta_x(m)$	$\mu_x(m)$	m_{2x}	$\delta_x(m)$	$\mu_x(m)$	m_{2x}	$\delta_x(m)$	$\mu_x(m)$	m_{2x}
Exp. 1	15,13	-1,73	$2,32 \times 10^{+2}$	12,37	-1,50	$1,55 \times 10^{+2}$	11,91	-1,22	$1,43 \times 10^{+2}$
Exp. 2	13,18	-0,60	$1,74 \times 10^{+2}$	11,61	-0,39	$1,35 \times 10^{+2}$	11,55	-0,49	$1,34 \times 10^{+2}$
Exp. 3	14,86	-1,35	$2,23 \times 10^{+2}$	13,02	-0,73	$1,70 \times 10^{+2}$	13,03	-0,70	$1,70 \times 10^{+2}$
Exp. 4	16,23	-3,28	$2,74 \times 10^{+2}$	14,22	-2,49	$2,08 \times 10^{+2}$	14,26	-2,72	$2,11 \times 10^{+2}$
Exp. 5	34,91	-8,77	$1,30 \times 10^{+3}$	32,18	-6,00	$1,07 \times 10^{+3}$	32,37	-6,23	$1,09 \times 10^{+3}$
Exp. 6	34,63	-4,19	$1,22 \times 10^{+3}$	31,89	-2,75	$1,02 \times 10^{+3}$	32,00	-3,38	$1,04 \times 10^{+3}$
Exp. 7	47,80	-5,02	$2,31 \times 10^{+3}$	41,89	-4,87	$1,78 \times 10^{+3}$	42,17	-4,95	$1,80 \times 10^{+3}$
Exp. 8	30,94	-10,66	$1,07 \times 10^{+3}$	30,22	-6,62	$9,57 \times 10^{+2}$	30,30	-7,07	$9,68 \times 10^{+2}$

	<i>ToA(3BS) - y</i>			<i>ToA(4BS) - y</i>			<i>TDoA(4BS) - y</i>		
	$\delta_y(m)$	$\mu_y(m)$	m_{2y}	$\delta_y(m)$	$\mu_y(m)$	m_{2y}	$\delta_y(m)$	$\mu_y(m)$	m_{2y}
Exp. 1	14,97	0,47	$2,24 \times 10^{+2}$	12,27	0,22	$2,24 \times 10^{+2}$	12,46	-0,63	$2,24 \times 10^{+2}$
Exp. 2	15,40	0,15	$2,37 \times 10^{+2}$	12,48	-0,12	$2,37 \times 10^{+2}$	12,54	-0,20	$2,37 \times 10^{+2}$
Exp. 3	15,91	-0,42	$2,53 \times 10^{+2}$	14,25	0,98	$2,53 \times 10^{+2}$	14,34	0,91	$2,53 \times 10^{+2}$
Exp. 4	16,12	0,36	$2,60 \times 10^{+2}$	14,74	0,58	$2,60 \times 10^{+2}$	14,81	0,73	$2,60 \times 10^{+2}$
Exp. 5	33,90	0,88	$1,15 \times 10^{+3}$	29,15	2,40	$1,15 \times 10^{+3}$	29,18	2,61	$1,15 \times 10^{+3}$
Exp. 6	28,80	1,02	$8,30 \times 10^{+2}$	28,23	2,26	$8,30 \times 10^{+2}$	28,39	2,64	$8,30 \times 10^{+2}$
Exp. 7	43,00	1,41	$1,85 \times 10^{+3}$	37,25	2,25	$1,85 \times 10^{+3}$	37,66	2,38	$1,85 \times 10^{+3}$
Exp. 8	33,03	2,38	$1,10 \times 10^{+3}$	28,31	1,96	$1,10 \times 10^{+3}$	28,38	1,80	$1,10 \times 10^{+3}$

	<i>ToA(3BS) - Módulo</i>			<i>ToA(4BS) - Módulo</i>			<i>TDoA(4BS) - Módulo</i>		
	$\delta_R(m)$	$\mu_R(m)$	m_{2R}	$\delta_R(m)$	$\mu_R(m)$	m_{2R}	$\delta_R(m)$	μ_R	m_{2R}
Exp. 1	10,24	18,74	$4,56 \times 10^{+2}$	8,13	15,48	$4,56 \times 10^{+2}$	8,02	15,31	$4,56 \times 10^{+2}$
Exp. 2	9,65	17,83	$4,11 \times 10^{+2}$	7,79	15,16	$4,11 \times 10^{+2}$	7,78	15,18	$4,11 \times 10^{+2}$
Exp. 3	9,92	19,41	$4,75 \times 10^{+2}$	8,66	17,28	$4,75 \times 10^{+2}$	8,56	17,41	$4,75 \times 10^{+2}$
Exp. 4	10,77	20,44	$5,34 \times 10^{+2}$	9,39	18,37	$5,34 \times 10^{+2}$	9,53	18,43	$5,34 \times 10^{+2}$
Exp. 5	24,23	43,05	$2,44 \times 10^{+3}$	20,60	38,71	$2,44 \times 10^{+3}$	20,73	38,88	$2,44 \times 10^{+3}$
Exp. 6	20,30	40,39	$2,04 \times 10^{+3}$	20,35	37,53	$2,04 \times 10^{+3}$	20,21	37,90	$2,04 \times 10^{+3}$
Exp. 7	29,33	57,36	$4,15 \times 10^{+3}$	24,89	50,43	$4,15 \times 10^{+3}$	24,74	51,04	$4,15 \times 10^{+3}$
Exp. 8	20,20	41,84	$2,16 \times 10^{+3}$	17,17	38,22	$2,16 \times 10^{+3}$	17,70	38,16	$2,16 \times 10^{+3}$

Tabla 5.5

Resultados Estadísticos de las señales usando el Filtrado de Kalman. El estadístico m_2 se refiere al momento de orden 2 y equivale a tener $\mu^2 + \delta^2$

Comparando la Tabla 5.6 y la Tabla 5.7 se puede observar que existe una mejora en la media del módulo del error al momento de aplicar el Filtro de Kalman. Sin embargo en los experimentos 5, 6 y 7 la media del error para cada coordenada empieza alejarse del cero. Es

necesario señalar que en esos experimentos se restringió el rango de movilidad según se planteó en este trabajo, asumiendo que a altas velocidades no se hacen cambios de velocidad muy bruscos. En general se puede ver que los resultados son óptimos cuando se manejan velocidades bajas y la varianza del proceso en sí es baja.

5.2.3 Presentación de las gráficas del error en el proceso de ubicación

En esta sección se presenta las gráficas cumulativas del módulo del error, en ellas se puede observar los casos en que se cumple con las especificaciones del estándar E911 y de esa forma esbozar las conclusiones para este trabajo. Estas gráficas corresponden a lo detallado en la Tabla 4.4 en dónde se desglosan los experimentos según los datos que se han usado para generar las simulaciones.

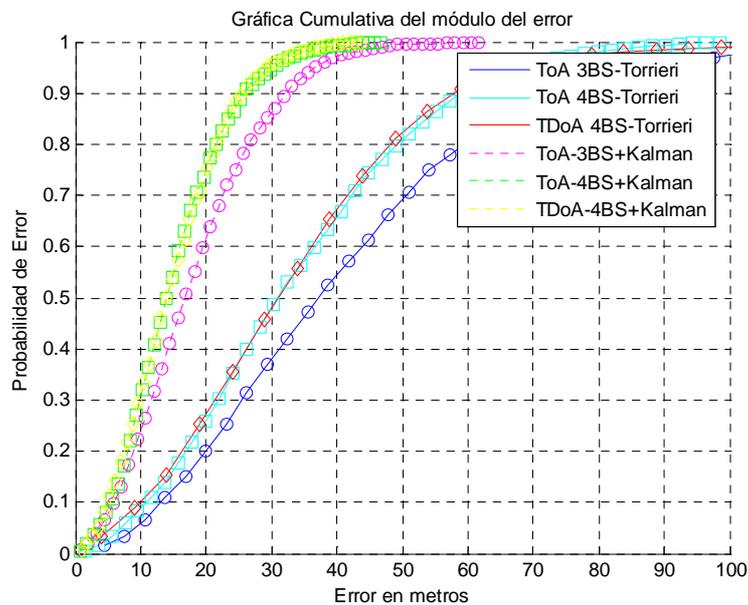


Figura 5.1
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 1

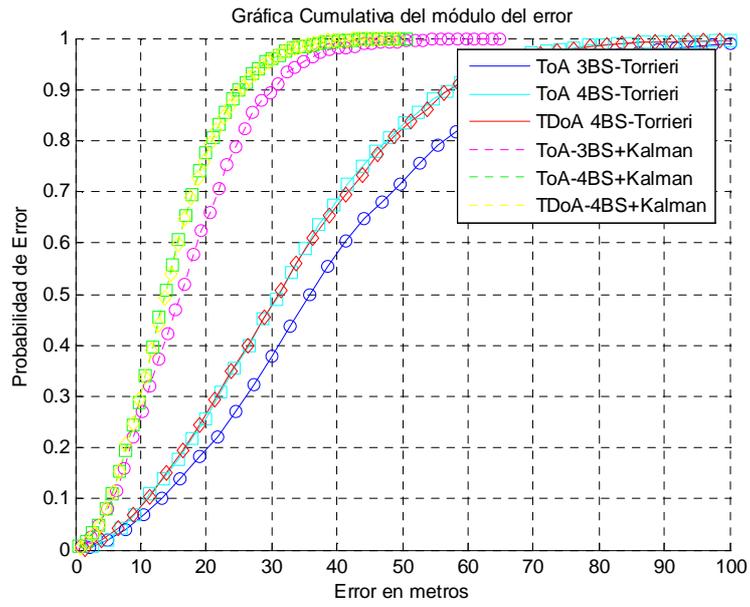


Figura 5.2
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 2

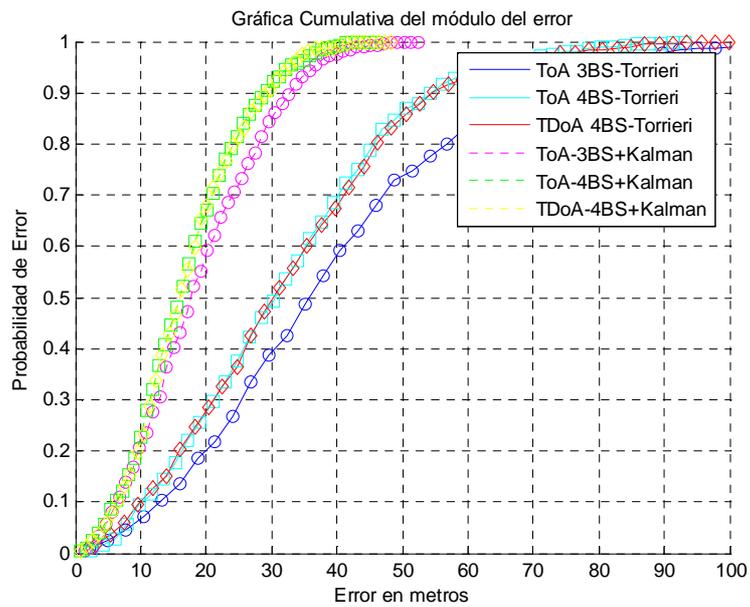


Figura 5.3
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 3

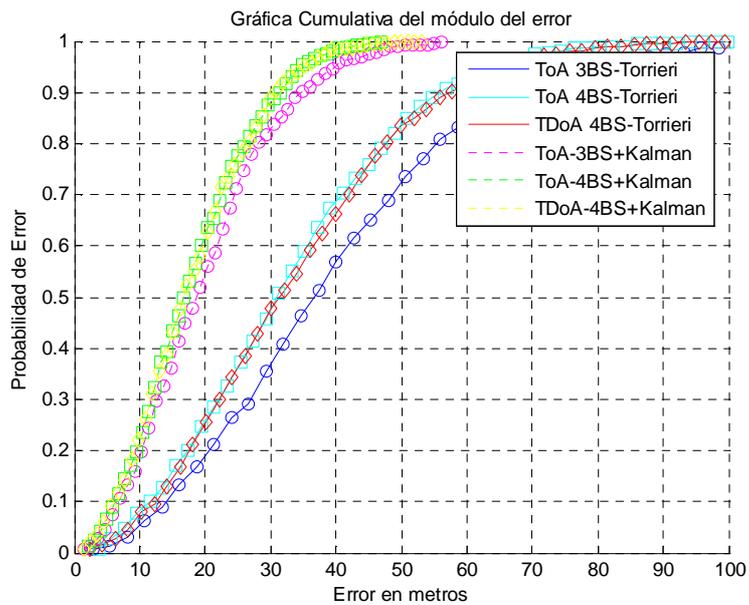


Figura 5.4
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 4

Explicación de la Figura 5.1 a la Figura 5.4 .-

Se puede observar que según lo planteado por los requerimientos de la FCC, en el 67% de los casos el error es menor a los 100 metros y en el caso de un error menor de menor de 300 metros en el 97% de los casos este se cumple, debido a que la mayoría de los datos se agrupan ya alrededor de los 100 metros de error. De manera similar se puede observar que el Filtro de Kalman mejora los resultados, si se analizan las mismas se observa que las curvas se agrupan más rápidamente los datos en errores pequeños de 30 y 40 metros.

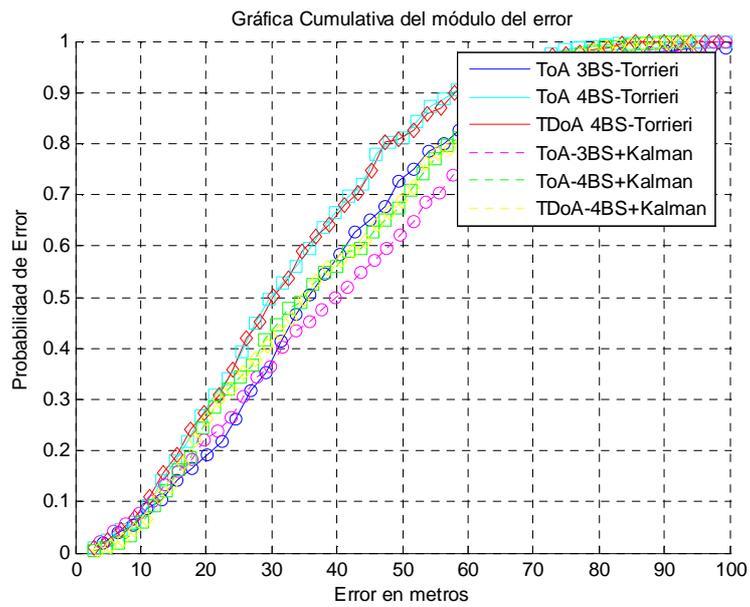


Figura 5.5
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 5

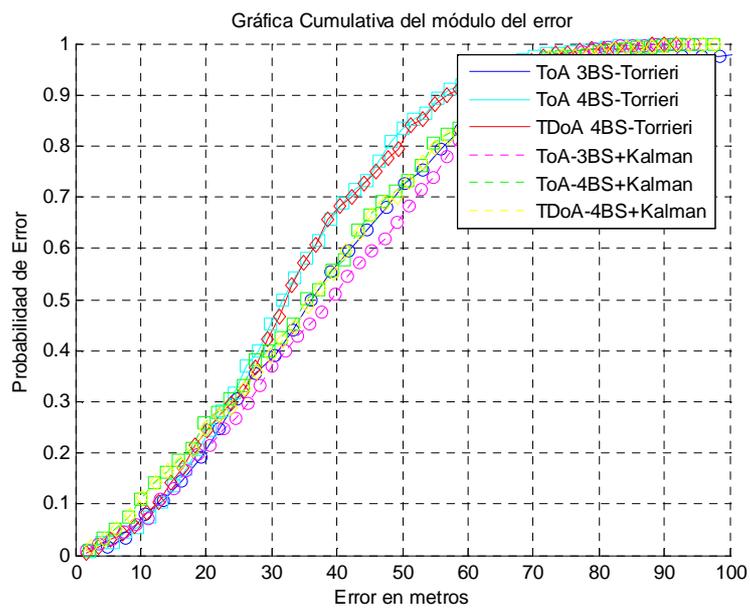


Figura 5.6
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 6

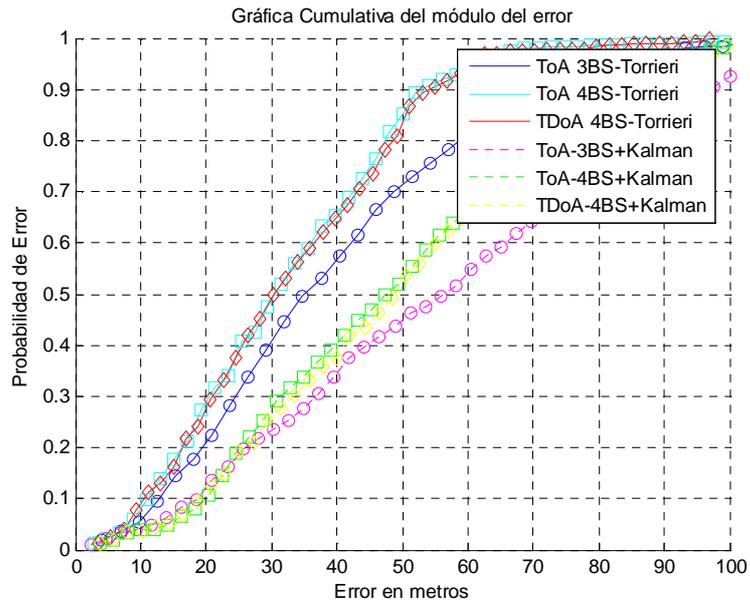


Figura 5.7
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 7

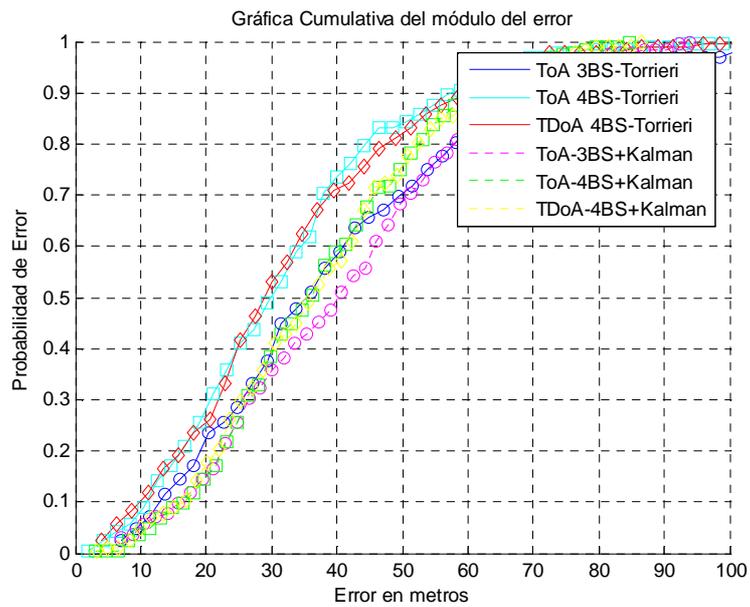


Figura 5.8
Gráfica Cumulativa del módulo del error. Experimento 8

Explicación de la Figura 5.5 a la Figura 5.8 .-

En estas gráficas si bien cumplen los requerimientos de la FCC para localizaciones basadas en red, el Filtrado de Kalman no mejora los resultados de una forma significativa, en la Figura 5.7 incluso se puede

observar que los resultados no mejoran. Este fenómeno pasa directamente por la estimación de la varianza del proceso que se explica más adelante.

5.2.4 Análisis de los Resultados.

Los resultados de los experimentos han demostrado que la localización por medio de las técnicas de localización mencionadas en este trabajo son suficientes por sí solas para cumplir con los requerimientos de la FCC. Como se pudo ver en las cuatro primeras figuras el Filtro de Kalman mejoró los resultados de una forma apreciable, sin embargo en las siguientes figuras cuando las condiciones de los experimentos demandan de mayor precisión el Filtro pierde su eficacia.

Este fenómeno se lo puede atribuir a la falta de estadísticos que describan el movimiento del dispositivo móvil, en este caso la varianza del proceso calculado a partir del criterio de *Rangos de Movilidad* podría necesitar un ajuste o no es el adecuado para el uso con el Filtro de Kalman.

5.2.5 Detalle del Experimento 4 y presentación de los resultados en mapas reales.

En cada experimento es posible realizar una reconstrucción de los datos en el programa Google Earth, de esta forma se puede observar los resultados que se obtienen a partir de un solo experimento, además se pueden ver las gráficas cumulativas del error basado en cada eje de coordenadas UTM. Todo este proceso nos sirve para entender y aplicar los conceptos que se han formulado en este trabajo y presentar soluciones o aplicaciones en trabajos posteriores.

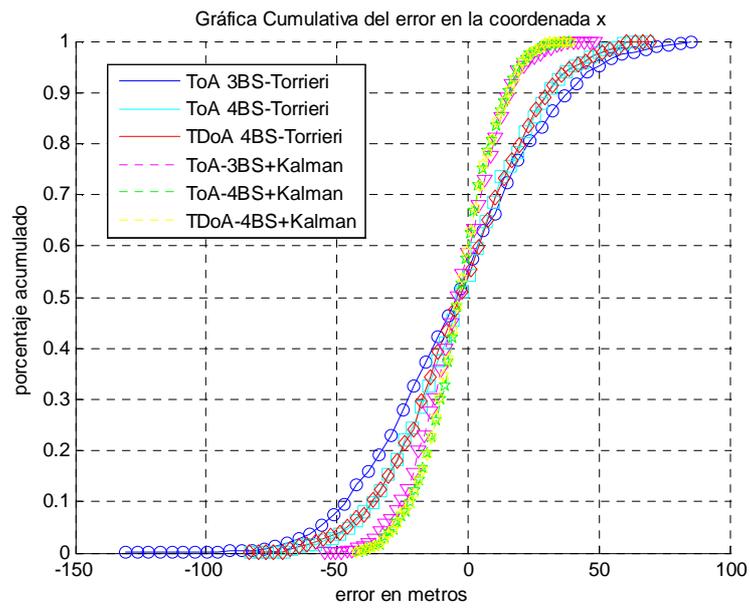


Figura 5.9

Gráfica cumulativa del error en x del experimento 4

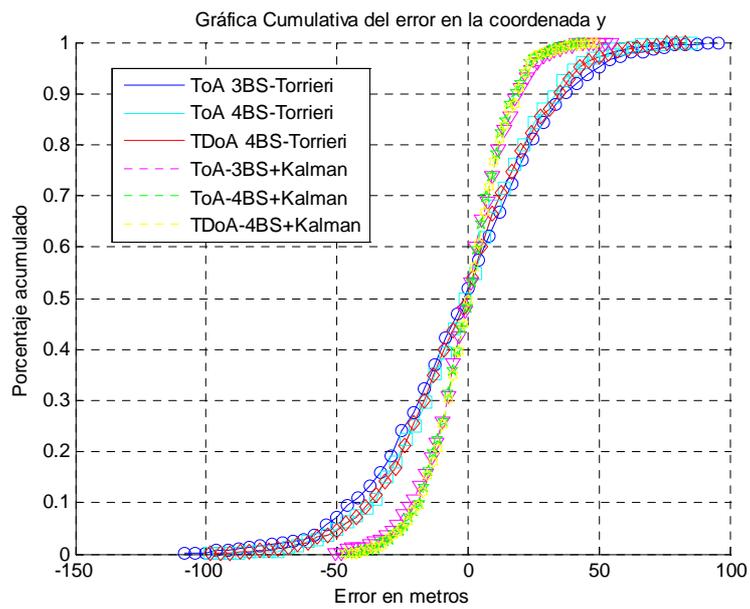


Figura 5.10

Gráfica cumulativa del error en y del experimento 4

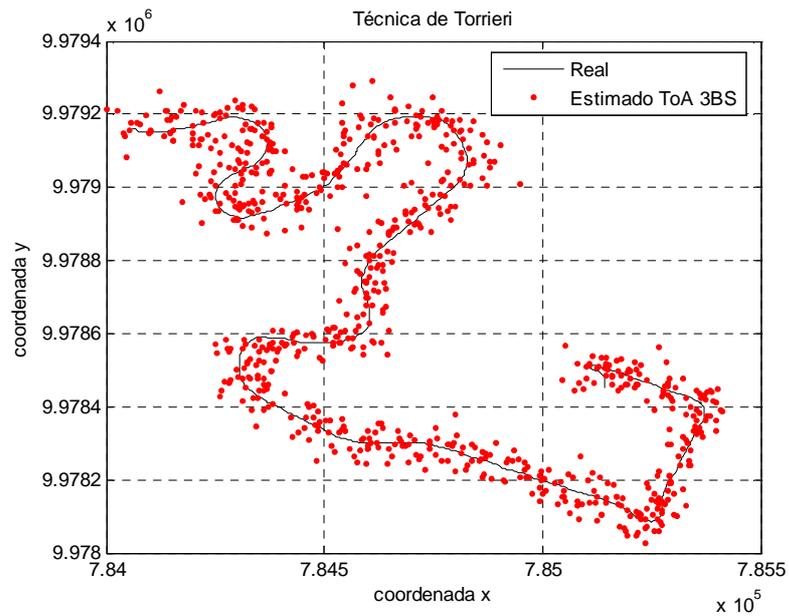


Figura 5.11

Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con ToA 3BS

En esta gráfica se visualiza la trayectoria real en una línea de color negro, la estimación mediante ToA con 3BS se la visualiza con puntos de color rojo.

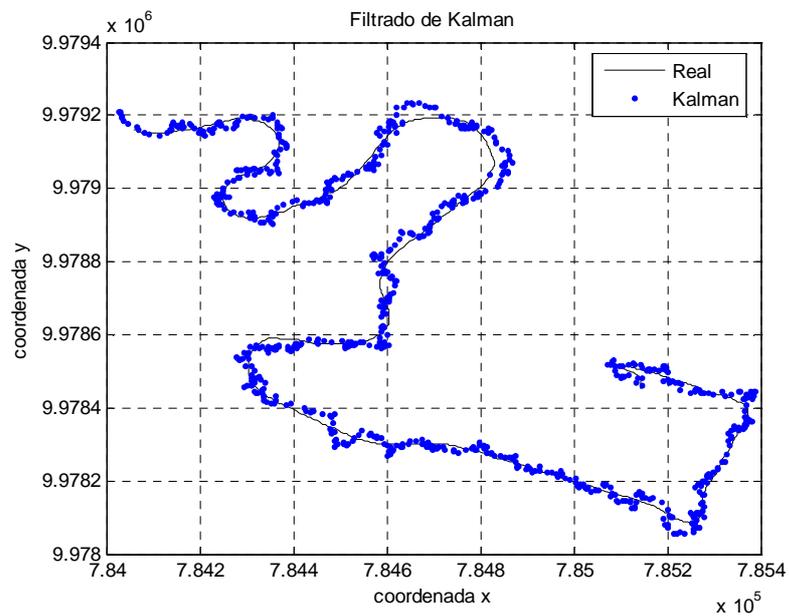


Figura 5.12

Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con Kalman

En esta gráfica se visualiza la trayectoria real en una línea de color negro, la estimación posterior a la utilización del Filtro de Kalman se la visualiza con puntos de color azul.

En las Figuras 5.11 y 5.12 se presentan la trayectoria real conjuntamente con las reconstrucciones realizadas mediante *Matlab*, es importante señalar que estas se pueden

realizar para cada una de los tres casos que se han estudiado (ToA con 3BS, ToA con 4BS y TDoA con 4BS)



Figura 5.13

Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con ToA 3BS visualizado en Google Earth
Reconstrucción mediante la creación de un archivo .kml, la línea en verde representa la trayectoria real, mientras que la línea de color azul es la reconstrucción mediante la técnica del ToA con 3BS.

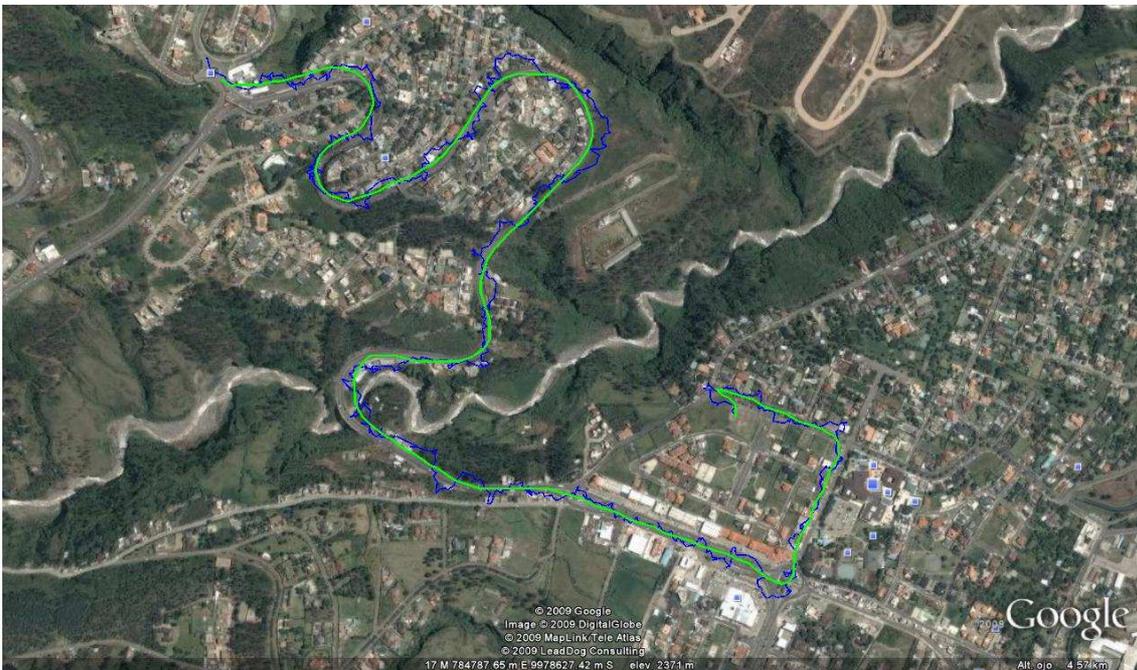


Figura 5.14

Ruta Real vs. Ruta Reconstruida con ToA 3BS visualizado en Google Earth
Reconstrucción mediante la creación de un archivo .kml, la línea en verde representa la trayectoria real, mientras que la línea de color rojo es la reconstrucción mediante la técnica del ToA con 3BS.

La ayuda gráfica que supone la utilización de programas como *MapTool* para la creación de las rutas contribuye al mejor desenvolvimiento al momento de crear experimentos para su estudio, además el uso de *Matlab* ha ayudado a tener un manejo más eficiente de los datos.

El uso de Google Earth en la Figura 5.13 y Figura 5.14, ayuda a visualizar los resultados una vez aplicados todos los algoritmos y suponen un aporte significativo de este trabajo y posterior incorporación en trabajos futuros.

6 Conclusiones

1. Las técnicas de localización como el ToA y el TDoA conjuntamente con su aproximación por linealización de Torrieri son eficientes y otorgan errores bastante moderados en todos los experimentos realizados al momento de cumplir con la normativa de la FCC, de tener un error de 100 metros en el 67% de los casos. Considerando que se ha tomado el mejor de los escenarios posibles, considerando para ello el valor de las cotas de Cramer-Rao (CRB *Cramer-Rao Bounds*), que han sido obtenidas para arreglos de antenas en la configuración de $\lambda/2$ para el canal de subida y arreglos múltiples para el canal de subida y bajada.
2. En el caso del Filtro de Kalman para el suavizado de la trayectoria, el periodo de muestreo debe ser lo más pequeño posible para tener una precisión adecuada y que la trayectoria obtenida se acerque lo más posible a la realidad. Periodos de muestreo muy grandes distorsionan las trayectorias y dificultan el seguimiento del dispositivo. Todo esto sin embargo no es un indicador de que el Filtro no funcione adecuadamente para el propósito de seguimiento, como se observa en la Figura 2.11 en el rango de 0 a 20 km/h las varianzas se mantienen en valores bajos en un muestreo de 1 segundo, lo que facilita el uso de un valor de varianza pequeña e incluso hasta un valor fijo. En cambio al momento de aumentar la velocidad a partir de los 20 km/h las varianzas se incrementan de una manera muy rápida, y es aquí donde se debe replantear un muestreo en periodos menores a 1 segundo con el objeto de mantener la varianza pequeña y de esa forma facilitar la aplicación de Kalman.
3. El Filtro de Kalman a pesar de considerarse una herramienta poderosa en el refinamiento de la señal, depende de conocer estadísticos del proceso (la dinámica del movimiento) y del error en la medición, que el caso de este trabajo han sido asumidos bajo un determinado criterio, como es el uso de los *Rangos de Movilidad* explicado en el punto 2.5.4 para la varianza del proceso y las Cotas de Cramer Rao (CRB) para el retardo en los tiempos de llegada de la señal. Su aplicación se dificulta enormemente si no se asume correctamente esos estadísticos.
4. Para el uso de períodos muy pequeños el proveedor de servicios celulares deberá optimizar sus recursos de radio así como la capacidad de la red para realizar los

cálculos respectivos y tener una tasa de transferencia de datos muy alta, todo lo cual es posible en la red de tercera generación UMTS.

5. Si bien el Filtro de Kalman es ampliamente utilizado, debe considerarse que varios de los ejemplos citados hacen referencia a procesos en su mayor medida estables o invariantes en el tiempo. Por ejemplo, el seguimiento de un misil supone una trayectoria parabólica predefinida y no existirá mayores cambios en la trayectoria que se realiza por lo general en línea recta. En otros ejemplos como la medición de una fuente de voltaje directo, se pueden conocer parámetros como la precisión de los aparatos de medición y como varía los parámetros en función de lo que realiza el usuario.
6. El Filtro de Kalman demostró ser eficiente en este trabajo mientras se consideraban velocidades menores a 20 km/h (Experimentos 1-4), pero al momento de incrementar las mismas sus resultados llegaron incluso a ser peores que los de la técnica de localización sola (Experimentos 5-7), es por eso que según el esquema de los Rangos de Movilidad se jugó con el valor de varianza del proceso y se obtuvieron resultados ligeramente iguales a los calculados en los primeros experimentos (Experimento 8).
7. En la sección de resultados, en la Tabla 5.4 y Tabla 5.5, en la parte correspondiente al error de los módulos se puede observar que la técnica del ToA es ligeramente superior a la técnica del TDoA, sin embargo en una aplicación práctica es necesario resaltar que TDoA es una técnica superior por considerar el efecto de la sincronización de los relojes de las estaciones que no se han considerado para este trabajo.

7 Recomendaciones y Trabajo Futuro

1. En trabajos futuros se recomienda profundizar en las estadísticas del dispositivo móvil, que de tener una solución basada en red y con el fin de reducir costos en los terminales podrían incorporar algún dispositivo para medir la velocidad y la orientación del mismo.
2. El trabajo al nivel del simulador *MapTool* es una iniciativa que puede ayudar al mejor entendimiento de diversas técnicas de localización y mejorar el proceso de obtención de las trayectorias para su posterior análisis y estudio. Un avance

significativo sería el desarrollo de un simulador propio en el que se pueda tener un grado de libertad más amplio al momento crear los escenarios de pruebas.

3. Sin haberse considerado un esquema de celdas sectorizadas conjuntamente con antenas inteligentes, se cree que esto podría ayudar a desarrollar esquemas de localización más robustos y capaces de mejores resultados.
4. En el Filtro de Kalman se pueden utilizar e involucrar minería de datos para encontrar valores estadísticos que se ajusten inicialmente al problema y puedan mejorar con cada iteración y converjan de mejor manera al resultado deseado, todo esto con el objetivo de minimizar cálculos iniciales que podrían demorar la estimación de la posición y además de optimizar el proceso.

8 Bibliografía

1. Lo Que Usted Necesita Saber Sobre Sus Llamadas al 911 con Su Teléfono Celular. [Online]. Available: <http://www.fcc.gov/cgb/consumerfacts/spanish/E911.html> “Federal Communication Commission.”
2. R. Játiva, J. Vidal. “Principios y Evaluación del Servicio de Localización en UMTS”. Centro de Investigación Científica (CEINCI) de la Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Cataluña.
3. Benavente, Díaz y R. García. “Servicios Basados en Posicionamiento de Móviles”. Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
4. Vera. “Sistemas Celulares de tercera generación”. (2007, Diciembre). [Online]. Available: www.monografias.com
5. L. Prócel, P. Prócel. “Desarrollo de una aplicación de Servicios Basados en Localización para redes celulares de tipo Global System for Mobile (GSM) y Universal Mobile Telecommunications Systems (UMTS) usando el emulador Mobile Positioning System 6.0 proveído por la empresa Ericsson”. Tesis de grado Universidad San Francisco de Quito. Octubre 2008.
6. Consejo Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL). (2007, Diciembre 28). [online]. Available: <http://www.conatel.gov.ec/>.

7. Solera, Álvaro. “Filtro de Kalman”. Departamento de Investigación Económica. Banco Central de Costa Rica. Costa Rica. Julio 2003.
8. “El filtro de Kalman”. Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.
9. A. Bernardos. “Servicios móviles de localización”. CEDITEC. España. 2003.
10. D. Estrella, E. Albán. “Desarrollo de una aplicación de Servicios Basados en Localización para una red celular de tipo *Global System for Mobile (GSM)*”. Agosto 2008.
11. G. Stuber, J. Caffery. “*Radio location techniques*”. 1999.
12. J. Vidal, R. Játiva. “*SATURN Report D621*”. Universidad Politécnica de Cataluña. 2001
13. “Filtro de Kalman”. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Perú.
14. G. Perret. “*Kalman Tracking* para peatones basado en TDOA para Sistemas Móviles Celulares”. Instituto de Ingeniería Eléctrica - Facultad de Ingeniería de la R.O.U.
15. G. Bishop. “*An Introduction to the Kalman Filter*”. University of North Carolina at Chapel Hill. 2001.
16. KML 2.1 Tutorial. (2007, Diciembre 28). [Online]. Available: http://code.google.com/apis/kml/documentation/kml_21tutorial.html.
17. Martín, D. Rodríguez. Estructuración de la información mediante XML: un nuevo reto para la gestión documental. (2008, Diciembre 22). [Online]. Available: <http://e-archivo.uc3m.es/dspace/handle/10016/910>
18. Sistema de coordenadas. (2007, Diciembre 28). [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_coordenadas.
19. Sistema de coordenadas. (2007, Diciembre 28) [Online]. Available: http://es.encyarta.msn.com/encyclopedia_761579532/Sistema_de_coordenadas.html.
20. Coordenadas geográficas. (2007, Diciembre 28). [Online]. Available: http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_geogr%C3%A1ficas.

21. Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator. (2007, Diciembre 28). [Online]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator](http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_Coordenadas_Universal_Transversal_de_Mercator)
22. Antonio R. Franco. (1999, Noviembre 09). Características de las coordenadas UTM y descripción de este tipo de coordenadas. [Online]. Available: http://www.elgps.com/documentos/utm/coordenadas_utm.html
23. Proakis, J. G. y Manolakis, D. G. "Tratamiento digital de señales. Principios, algoritmos y aplicaciones".Hertfordshire: PRENTICE HALL International (UK) Ltd. 1998, [ISBN 84-8322-000-8](#). [Online]. Available: [http://es.wikipedia.org/wiki/Ruido de cuantificaci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Ruido_de_cuantificaci%C3%B3n).
24. Smith, J.O. (2007). "Round-off Error Variance", en *Mathematics of the Discrete Fourier Transform (DFT)*. [Online]. Available: [http://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/Round Off Error Variance.html](http://ccrma.stanford.edu/~jos/mdft/Round_Off_Error_Variance.html)