

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Informática

**“Algoritmos y técnicas de tiempo real para el incremento de la precisión posicional relativa usando receptores GPS estándar”**



---

**Doctorado en Ciencias Informáticas**

**Autor:** Ing. Juan Manuel Toloza

**Director:** Dr. Nelson Acosta

**Co-Director:** Ing. Amando De Giusti

Diciembre de 2012

---

---

---

## ***Dedicatoria***

*Esta tesis está dedicada a todas aquellas personas que estuvieron acompañando y ayudando de diferentes maneras a que sea posible realizarla, en particular a mi padre, quien desde lejos está esperando este momento desde hace ya un tiempo, a mi madre, hermano y amigos.*

*Especialmente dedicada a Marta por acompañarme desde muy cerca en el último tramo de esta etapa quién me dio fuerzas y motivos para concluirla rápidamente, y por su gran espíritu de lucha demostrando que, como decía Albert Einstein, "Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad". Su voluntad por cambiar las cosas junto a sentimientos sinceros pudo más que el resto de las cosas. Todo cambio radical es costoso y doloroso pero si se quiere se puede, y eso es lo que ella demostró con sus actos. Me hace recordar siempre que nada es imposible cuando se persigue algo y que hay que seguir adelante a pesar de los obstáculos que la vida nos pone día a día sin rendirse fácilmente, por ello mi sincera y humilde dedicatoria. Siempre estarás en mí más allá de las adversidades que nos ponga la vida. Con amor y respeto, quien te va acompañar toda la vida.*

*A todos ellos, Muchas Gracias.*

## **Agradecimientos**

*Dado que la tesis representa el final de una importante etapa en mi vida y el inicio de otra que será aun más enriquecedora, agradezco a todos aquellos quienes han colaborado, ya sea directa o indirectamente, a la elaboración de esta tesis. En especial al Dr. Nelson Acosta, director del INTIA, por facilitar los componentes necesarios para la realización del proyecto, por dirigir junto al Ing. Armando De Giusti y encausar en todo momento la realización de este proyecto. Las valiosas experiencias de ambos y los consejos brindados fueron esenciales para concluir una notable investigación.*

*A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por promover la actividad científico-académica mediante el Programa de Formación de Recursos Humanos PRH-0032.*

*A Enrique Oscar Goñi, Mauricio Poncio, Pablo Fantini y Matias Serrano por haber participado en los inicios de este proyecto aportando parte del desarrollo y de la adquisición de datos. A Coti por su paciencia y por el apoyo brindado en todo momento, tanto personal como académico, dada su gran trayectoria en el área de investigación.*

*Asimismo, quiero agradecer a todas aquellas personas que confiaron en mí y que nunca dudaron en brindar su apoyo incondicional a pesar de las distancias y situaciones particulares de cada uno.*

# Tabla de Contenido

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>22</b>
1.1.	PLANTEO DEL PROBLEMA .....	22
1.2.	OBJETIVO.....	24
1.3.	ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	24
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>ESTADO DEL ARTE.....</b>	<b>26</b>
2.1.	SENSORES .....	26
2.1.1.	<i>Sensores inteligentes</i> .....	27
2.1.2.	<i>Historia</i> .....	28
2.1.3.	<i>Sistemas de sensores</i> .....	29
2.1.4.	<i>Tipos de sensores</i> .....	30
2.2.	SEÑALES Y RUIDOS .....	31
2.2.1.	<i>Señales</i> .....	32
2.2.2.	<i>Ruidos</i> .....	32
2.2.2.1.	Tipos de ruidos .....	33
2.2.2.2.	Acondicionamiento de la señal.....	34
2.2.2.2.1.	Errores en el acondicionamiento de las señales.....	35
2.2.2.3.	Reducción de perturbaciones y ruido .....	36
2.3.	MATEMÁTICA APLICADA .....	37
2.3.1.	<i>Promedio</i> .....	37
2.3.2.	<i>Varianza</i> .....	38
2.3.3.	<i>Covarianza</i> .....	39
2.3.4.	<i>Desviación estándar</i> .....	39
2.3.5.	<i>Coficiente de correlación</i> .....	40
2.3.6.	<i>Recta de mínimos cuadrados</i> .....	41
2.3.7.	<i>Filtros</i> .....	41
2.3.7.1.	Filtros paso bajo y alto .....	41
2.3.7.2.	Filtro de Kalman.....	42
2.3.7.2.1.	Kalman estático.....	43
2.3.7.2.2.	Kalman dinámico .....	45
2.3.7.2.3.	Filtro de Kalman extendido.....	48
2.4.	SISTEMAS DE COORDENADAS.....	48
2.4.1.	<i>Coordenadas geodésicas o geográficas</i> .....	49
2.4.2.	<i>Coordenadas Terrestres</i> .....	50
2.4.3.	<i>ECEF (Earth-Centered, Earth Fixed)</i> .....	50
2.4.4.	<i>El elipsoide</i> .....	52
2.4.5.	<i>El geoide</i> .....	54
2.5.	POSICIONAMIENTO DE UN OBJETO.....	57
2.5.1.	<i>Wi-Fi / Bluetooth</i> .....	57
2.5.2.	<i>Encoders</i> .....	57
2.5.3.	<i>Láser RangeFinder</i> .....	58
2.5.4.	<i>Óptico (Fotodiodos)</i> .....	58
2.5.5.	<i>Ultrasonido</i> .....	59
2.5.6.	<i>Navegación Inercial</i> .....	60
2.5.7.	<i>Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)</i> .....	60
2.5.7.1.	Historia.....	60
2.5.7.2.	Funcionamiento .....	61
2.5.7.3.	Aplicaciones .....	64
2.5.7.4.	Vulnerabilidades de los sistemas de posicionamiento por satélite.....	64
2.5.7.5.	Interferencia involuntaria .....	65
2.5.7.6.	Interferencia intencional.....	66
2.5.7.7.	Efectos ionosféricos y otros efectos atmosféricos .....	66
2.5.7.8.	Otras vulnerabilidades.....	67
2.5.7.9.	NAVSTAR GPS (NAVigation System Timing and Ranging - Global Positioning System).....	68
2.5.7.9.1.	Fiabilidad de los datos.....	69
2.5.7.9.2.	Fuentes de error.....	70
2.5.7.9.3.	Dilución de la precisión (DOP) .....	72

2.5.7.10. GLONASS .....	75
2.5.7.11. Galileo.....	76
2.5.7.12. COMPASS/BeiDou.....	77
2.6. MEJORAS DE PRECISIÓN.....	78
2.6.1. Posicionamiento aislado.....	78
2.6.2. Posicionamiento relativo.....	78
2.6.3. Posicionamiento y sistemas de aumentación.....	78
2.6.3.1. ABAS (Aircraft Based Augmentation System).....	79
2.6.3.1.1. Sistema Monitor de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM).....	79
2.6.3.1.2. Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE).....	80
2.6.3.2. SBAS (Satellite Based Augmentation System).....	80
2.6.3.2.1. WAAS (Wide Area Augmentation System).....	83
2.6.3.2.2. CWAAS (Canadian Wide Area Augmentation System).....	85
2.6.3.2.3. SDCM (System of Differential Correction and Monitoring).....	85
2.6.3.2.4. EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service).....	85
2.6.3.2.5. WAGE (Wide Area GPS Enhancement).....	85
2.6.3.2.6. MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System).....	86
2.6.3.2.7. StarFire.....	87
2.6.3.2.8. Starfix DGPS y sistema OmniSTAR.....	88
2.6.3.2.9. QZSS (Quasi Zenith Satellite System).....	89
2.6.3.2.10. GAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation).....	89
2.6.3.2.11. SACCSA (Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica).....	90
2.6.3.2.12. SNAS (Satellite Navigation Augmentation System).....	91
2.6.3.2.13. ASAS (African Satellite Augmentation System).....	91
2.6.3.3. GBAS (Ground Based Augmentation System).....	92
2.6.3.3.1. LAAS (Local Area Augmentation System).....	93
2.6.3.4. GRAS (Ground Regional Augmentation System).....	95
2.6.3.4.1. DGPS (Differential GPS).....	95
2.6.3.4.2. LADGPS (Local Area DGPS).....	96
2.6.3.4.3. WADGPS (Wide Area DGPS).....	96
2.6.4. RTK (Real Time Kinematic).....	97
2.6.4.1. VRS (Virtual Reference Station).....	98
2.6.5. e-Dif (extended Differential).....	100
2.6.6. PPP (Precise Point Positioning).....	100
2.7. ESTADO ACTUAL Y MEJORAS DE LOS SISTEMAS GNSS.....	101
2.8. COMPARATIVA.....	103
2.9. SERVICIOS DE PRECISIÓN EN ARGENTINA.....	103
2.9.1. Corrección mediante antenas Beacon/MSK.....	103
2.9.2. Corrección satelital con satélite geoestacionario.....	104
2.9.3. Corrección interna en el receptor GPS.....	105
2.9.4. RTK.....	105
2.10. RESUMEN.....	105

### **CAPÍTULO 3 TÉCNICAS PROPUESTAS PARA EL ANÁLISIS DE LOS DATOS..... 107**

3.1. INTRODUCCIÓN.....	107
3.2. ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	107
3.3. ANÁLISIS DE SOLUCIONES EXISTENTES.....	108
3.3.1. DGPS (Differential GPS).....	108
3.3.2. AGPS (Assisted GPS).....	109
3.3.3. RTK (Real-Time Kinematic).....	109
3.3.4. e-Dif (extended Differential).....	110
3.3.5. Sistemas de aumentación.....	110
3.3.6. Multi frecuencia.....	110
3.3.7. Análisis de soluciones de precisión para Argentina.....	110
3.4. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	111
3.5. HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS, MATEMÁTICAS Y COMPUTACIONALES.....	112
3.5.1. Promedio.....	112
3.5.2. Moda.....	112
3.5.3. Filtro de Kalman.....	112
3.5.4. Filtros paso bajo/alto.....	113
3.5.5. Lógica difusa.....	113
3.6. RESUMEN.....	114

<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>MUESTRAS TOMADAS Y TÉCNICAS PROPUESTAS .....</b>	<b>115</b>
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	115
4.2.	MATERIALES UTILIZADOS.....	115
4.3.	CONSIDERACIONES GENERALES.....	116
4.4.	DATOS USADOS PARA EL PROCESAMIENTO .....	116
4.5.	ESCENARIOS PARA LA TOMA DE MUESTRAS .....	117
4.6.	CONJUNTOS DE MUESTRAS .....	119
4.6.1.	<i>Conjunto 1</i> .....	120
4.6.1.1.	Punto 1 .....	120
4.6.1.2.	Punto 2 .....	123
4.6.2.	<i>Conjunto 2</i> .....	126
4.6.2.1.	Punto 1 - Portón.....	126
4.6.2.2.	Punto 2 - 3Mts Portón .....	129
4.6.2.3.	Punto 3 - Columna.....	132
4.6.2.4.	Punto 4 - 3Mts Columna.....	136
4.6.3.	<i>Conjunto 3</i> .....	139
4.7.	SOLUCIÓN PROPUESTA Y APORTES.....	139
4.7.1.	<i>Metodología de cálculo del error</i> .....	141
4.7.2.	<i>Estimación de la posición mediante el Promedio</i> .....	147
4.7.3.	<i>Estimación de la posición mediante la Moda</i> .....	147
4.7.4.	<i>Estimación de la posición mediante el Filtro de Kalman</i> .....	148
4.7.4.1.	Usando filtro de Kalman estático .....	148
4.7.4.2.	Usando filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar .....	148
4.7.4.2.1.	Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) .....	149
4.7.4.2.2.	Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) y ponderación de la desviación mediante lógica difusa.....	150
4.7.4.2.3.	Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y sin corrección de sigma. ....	151
4.7.4.2.4.	Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo. ....	151
4.7.4.2.5.	Kalman dinámico con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.....	153
4.7.4.2.6.	Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.....	153
4.7.4.2.7.	Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa, descarte de puntos y corrección de sigma .....	154
4.8.	RESUMEN.....	154
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>MÉTRICAS DE DESEMPEÑO .....</b>	<b>155</b>
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	155
5.2.	RESULTADOS DERIVADOS DE LAS TÉCNICAS GENERALES.....	155
5.3.	RESULTADOS DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DEL PROMEDIO .....	156
5.4.	RESULTADOS DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DE LA MODA.....	159
5.5.	RESULTADOS DERIVADOS DE LA UTILIZACIÓN DE FILTRO DE KALMAN.....	162
5.5.1.	<i>Resultados con filtro de Kalman estático</i> .....	162
5.5.2.	<i>Resultados con filtro de Kalman dinámico</i> .....	165
5.5.2.1.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) .....	168
5.5.2.2.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) y ponderación de la desviación mediante lógica difusa.....	171
5.5.2.3.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y sin corrección de sigma.....	173
5.5.2.4.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.....	176
5.5.2.5.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo	179
5.5.2.6.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos. ....	182
5.5.2.7.	Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa, descarte de puntos y corrección de sigma. ....	184
5.6.	TÉCNICAS ADICIONALES PARA UNIFICAR LAS MEJORAS .....	189
5.6.1.	<i>Mejor técnica implementada en la base diferencial</i> .....	189
5.6.2.	<i>Técnica de promediar las correcciones recibidas de la base</i> .....	190
5.6.3.	<i>Técnica menor distancia al error</i> .....	190

5.7. RESUMEN.....	191
<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....</b>	<b>192</b>
6.1. CONCLUSIONES DERIVADAS DEL DESARROLLO DE LA TESIS .....	192
6.2. APORTES.....	193
6.3. EXTENSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	193
6.4. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DEL DESARROLLO DE LA TESIS .....	194
6.4.1. Artículos en revistas internacionales con referato.....	194
6.4.2. Artículos publicados en congresos.....	195
6.4.3. Trabajos presentados en el concurso nacional de innovaciones INNOVAR, 7 <sup>ma</sup> Edición. ....	196
6.4.4. Integrante de proyectos de I+D.....	197
<b>ANEXO I.....</b>	<b>198</b>
<i>Herramienta desarrollada</i> .....	198
Procedimiento de cálculo de correcciones.....	198
Parametrización de la herramienta desarrollada .....	200
Sistema base.....	201
Sistema móvil .....	205
Resultados derivados de la utilización de la herramienta desarrollada.....	206
Conclusiones derivadas del desarrollo de la herramienta que asiste al usuario.....	208
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>210</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1.	Clasificación de los sensores.....	31
Tabla 2.	Parámetros de elipsoides de referencia. ....	54
Tabla 3.	Parámetros de la Tierra según WGS-84. ....	54
Tabla 4.	Ondulación del geoide para algunas ciudades. ....	56
Tabla 5.	Fuente de errores del sistema NAVSTAR- GPS. ....	70
Tabla 6.	Señales y sus alcances en posicionamiento aislado y relativo. ....	102
Tabla 7.	Posicionamiento aislado y su precisión. ....	102
Tabla 8.	Posicionamiento relativo y su precisión. ....	102
Tabla 9.	Determinación de la dirección del error. ....	145
Tabla 10.	Reglas de inferencia del sistema difuso. ....	151
Tabla 11.	Rango de valores óptimos para el PDOP. ....	153
Tabla 12.	Rango de valores óptimos para el SNR. ....	153
Tabla 13.	Rango de valores óptimos para la diferencia de satélites trackeados. ....	153
Tabla 14.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio. ....	156
Tabla 15.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio. ....	157
Tabla 16.	Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio. ....	157
Tabla 17.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....	158
Tabla 18.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....	158
Tabla 19.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....	158
Tabla 20.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda. ....	159
Tabla 21.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda. ....	160
Tabla 22.	Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda. ....	160



Tabla 23.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....	161
Tabla 24.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....	161
Tabla 25.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....	161
Tabla 26.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático. ....	162
Tabla 27.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático. ....	163
Tabla 28.	Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático. ....	163
Tabla 29.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....	164
Tabla 30.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....	164
Tabla 31.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....	164
Tabla 32.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico. ....	165
Tabla 33.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico. ....	166
Tabla 34.	Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico. ....	166
Tabla 35.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....	167
Tabla 36.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....	167
Tabla 37.	Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....	167
Tabla 38.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.	168
Tabla 39.	Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.	169

Tabla 40.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.</i>	169
Tabla 41.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.</i>	170
Tabla 42.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.</i>	170
Tabla 43.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.</i>	170
Tabla 44.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	171
Tabla 45.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	171
Tabla 46.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	172
Tabla 47.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.</i>	172
Tabla 48.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.</i>	173
Tabla 49.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.</i>	173
Tabla 50.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	174
Tabla 51.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	174
Tabla 52.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.</i>	174
Tabla 53.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.</i>	175

Tabla 54.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....</i>	175
Tabla 55.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....</i>	176
Tabla 56.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos. ....</i>	177
Tabla 57.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos. ....</i>	177
Tabla 58.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos. ....</i>	177
Tabla 59.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....</i>	178
Tabla 60.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....</i>	178
Tabla 61.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....</i>	179
Tabla 62.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos. ....</i>	179
Tabla 63.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos. ....</i>	180
Tabla 64.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos. ....</i>	180
Tabla 65.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....</i>	181
Tabla 66.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....</i>	181
Tabla 67.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....</i>	181
Tabla 68.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos. ....</i>	182

Tabla 69.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.....</i>	182
Tabla 70.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.....</i>	183
Tabla 71.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....</i>	183
Tabla 72.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....</i>	184
Tabla 73.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2. ....</i>	184
Tabla 74.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.....</i>	185
Tabla 75.	<i>Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.....</i>	185
Tabla 76.	<i>Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.....</i>	186
Tabla 77.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2. ....</i>	186
Tabla 78.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3. ....</i>	187
Tabla 79.	<i>Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 2-GPS 3. ....</i>	187
Tabla 80.	<i>Cantidad de mejoras y errores absolutos por técnica aplicada con el 95% de las estimaciones luego del arranque en frío.....</i>	188
Tabla 81.	<i>Mejor técnica implementada en la base diferencial para cada muestra.</i>	189
Tabla 82.	<i>Error absoluto en el móvil luego de aplicar la mejor técnica de la base diferencial.....</i>	190

<i>Tabla 83. Error absoluto en el móvil luego de aplicar el promedio de las correcciones obtenidas por cada técnica. ....</i>	190
<i>Tabla 84. Error absoluto en el móvil luego de aplicar el promedio de la primera mitad de las correcciones recibidas ordenadas de menor a mayor. ....</i>	190
<i>Tabla 85. Rango de valores óptimos para el PDOP. ....</i>	203
<i>Tabla 86. Rango de valores óptimos para el SNR. ....</i>	203
<i>Tabla 87. Rango de valores óptimos para la diferencia de satélites trackeados. ....</i>	203
<i>Tabla 88. Reglas de inferencia del sistema difuso. ....</i>	204
<i>Tabla 89. Comparativa de distancias mediante diferentes métodos. ....</i>	207
<i>Tabla 90. Comparativa de distancias mediante diferentes método. ....</i>	207
<i>. ....</i>	207
<i>Tabla 91. Comparativa de distancias mediante diferentes métodos. ....</i>	208
<i>Tabla 92. Errores absolutos. ....</i>	208

## **Índice de Figuras**

<b>Figura 1.</b>	<i>Sensaciones experimentadas por el hombre.</i>	28
<b>Figura 2.</b>	<i>Valor de la variable luego de 15 iteraciones.</i>	44
<b>Figura 3.</b>	<i>Actualización de la desviación estándar.</i>	45
<b>Figura 4.</b>	<i>Flujo de datos del proceso.</i>	46
<b>Figura 5.</b>	<i>Evolución de la Covarianza.</i>	48
<b>Figura 6.</b>	<i>Latitud y Longitud.</i>	50
<b>Figura 7.</b>	<i>Sistema ECEF.</i>	51
<b>Figura 8.</b>	<i>Forma general de la Tierra.</i>	52
<b>Figura 9.</b>	<i>Forma de pera de la Tierra.</i>	52
<b>Figura 10.</b>	<i>Ejes de un elipsoide de revolución.</i>	53
<b>Figura 11.</b>	<i>Comparación entre el Geoide y el Elipsoide.</i>	55
<b>Figura 12.</b>	<i>Relación entre el Geoide y el Elipsoide.</i>	56
<b>Figura 13.</b>	<i>Circunferencia con centro en un satélite.</i>	62
<b>Figura 14.</b>	<i>Circunferencia formada por las dos esferas con centro en los dos satélites.</i>	62
<b>Figura 15.</b>	<i>Puntos de intersección de las esferas con centro en los tres satélites.</i>	62
<b>Figura 16.</b>	<i>Cuarto satélite que sincroniza los relojes.</i>	63
<b>Figura 17.</b>	<i>Intersección de las esferas de tres satélites en 2D.</i>	72
<b>Figura 18.</b>	<i>Infraestructura SBAS.</i>	82
<b>Figura 19.</b>	<i>Áreas de cobertura de los SBAS.</i>	83
<b>Figura 20.</b>	<i>Infraestructura WAAS.</i>	84
<b>Figura 21.</b>	<i>Infraestructura de ASAS.</i>	92
<b>Figura 22.</b>	<i>Infraestructura LAAS.</i>	95
<b>Figura 23.</b>	<i>Escenario de toma de datos para el conjunto 1.</i>	117
<b>Figura 24.</b>	<i>Escenario de toma de datos para el conjunto 2.</i>	118
<b>Figura 25.</b>	<i>Escenario de toma de datos para el conjunto 3.</i>	119
<b>Figura 26.</b>	<i>Punto 1 en el techo de la facultad de ciencias exactas.</i>	121
<b>Figura 27.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i>	121
<b>Figura 28.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i>	122
<b>Figura 29.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i>	123
<b>Figura 30.</b>	<i>Punto 2 en el portón de salida en cercanías del gimnasio.</i>	123

<b>Figura 31.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i> .....	124
<b>Figura 32.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i> .....	125
<b>Figura 33.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i> .....	125
<b>Figura 34.</b>	<i>Punto 1 en el portón cercano al gimnasio del campus universitario...</i>	126
<b>Figura 35.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i> .....	127
<b>Figura 36.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i> .....	127
<b>Figura 37.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i> .....	128
<b>Figura 38.</b>	<i>Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.....</i>	129
<b>Figura 39.</b>	<i>Punto 2, a 3 metros del portón de salida en cercanías del gimnasio...</i>	129
<b>Figura 40.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i> .....	130
<b>Figura 41.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i> .....	131
<b>Figura 42.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i> .....	131
<b>Figura 43.</b>	<i>Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.....</i>	132
<b>Figura 44.</b>	<i>Punto 3 - Columna de luz en cercanías del gimnasio.</i> .....	133
<b>Figura 45.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i> .....	133
<b>Figura 46.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i> .....	134
<b>Figura 47.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i> .....	135
<b>Figura 48.</b>	<i>Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.....</i>	135
<b>Figura 49.</b>	<i>Punto 4 a 3 metros de la columna de luz en cercanías del gimnasio...</i>	136
<b>Figura 50.</b>	<i>Variación de la latitud en el tiempo.</i> .....	137
<b>Figura 51.</b>	<i>Variación de la longitud en el tiempo.</i> .....	137
<b>Figura 52.</b>	<i>Variación de la altitud en el tiempo.</i> .....	138
<b>Figura 53.</b>	<i>Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.....</i>	139
<b>Figura 54.</b>	<i>Puntos estimados E1 y E2.</i> .....	142
<b>Figura 55.</b>	<i>Distancia estimada vs. distancia real.</i> .....	142
<b>Figura 56.</b>	<i>Punto corregido en la intersección de la recta con la circunferencia.</i>	145
<b>Figura 57.</b>	<i>Determinación de la dirección del error encontrado.....</i>	146
<b>Figura 58.</b>	<i>Magnitud y dirección del error.</i> .....	147
<b>Figura 59.</b>	<i>Diagrama de flujo.....</i>	200
<b>Figura 60.</b>	<i>Pantalla de configuración de parámetros sistema base.....</i>	201
<b>Figura 61.</b>	<i>Dispersión de los datos del GPS 3 (GPS Móvil).</i> .....	207

## *Índice de Ecuaciones*

<i>Ecuación 1.</i>	Promedio. ....	38
<i>Ecuación 2.</i>	Varianza.....	38
<i>Ecuación 3.</i>	Varianza desarrollada.....	38
<i>Ecuación 4.</i>	Covarianza. ....	39
<i>Ecuación 5.</i>	Desviación estándar. ....	39
<i>Ecuación 6.</i>	Coefficiente de correlación. ....	40
<i>Ecuación 7.</i>	Medida del tiempo $i$ . ....	42
<i>Ecuación 8.</i>	Mínima varianza.....	43
<i>Ecuación 9.</i>	Nueva estimación.....	43
<i>Ecuación 10.</i>	Ganancia de Kalman. ....	43
<i>Ecuación 11.</i>	Actualización de la varianza. ....	43
<i>Ecuación 12.</i>	Actualización de la ganancia de Kalman.....	44
<i>Ecuación 13.</i>	Nueva estimación.....	44
<i>Ecuación 14.</i>	Actualización de la varianza. ....	45
<i>Ecuación 15.</i>	Nueva estimación.....	45
<i>Ecuación 16.</i>	Medida del tiempo $i+1$ . ....	46
<i>Ecuación 17.</i>	Estimación para el tiempo $i+1$ . ....	46
<i>Ecuación 18.</i>	Nueva estimación.....	46
<i>Ecuación 19.</i>	Varianza actualizada.....	47
<i>Ecuación 20.</i>	Actualización de la ganancia de Kalman.....	47
<i>Ecuación 21.</i>	Nueva estimación.....	47
<i>Ecuación 22.</i>	Actualización del valor de varianza. ....	47
<i>Ecuación 23.</i>	Ecuación del elipsoide.....	53
<i>Ecuación 24.</i>	Factor de achatamiento.....	53
<i>Ecuación 25.</i>	Excentricidad de la elipse. ....	53
<i>Ecuación 26.</i>	Excentricidad de la elipse. ....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
<i>Ecuación 27.</i>	Cálculo de la posiciones del receptor. ....	72
<i>Ecuación 28.</i>	Matriz $A$ . ....	73
<i>Ecuación 29.</i>	Matriz $Q$ .....	73
<i>Ecuación 30.</i>	Elementos de la matriz $Q$ . ....	73
<i>Ecuación 31.</i>	Valor PDOP. ....	73



<b>Ecuación 32.</b>	<i>Valor TDOP.</i> .....	73
<b>Ecuación 33.</b>	<i>Valor GDOP.</i> .....	74
<b>Ecuación 34.</b>	<i>Valor HDOP.</i> .....	74
<b>Ecuación 35.</b>	<i>Valor VDOP.</i> .....	74
<b>Ecuación 36.</b>	<i>Desviación estándar para la señal C/A.</i> .....	74
<b>Ecuación 37.</b>	<i>Desviación estándar del error en el receptor para la señal C/A.</i> .....	74
<b>Ecuación 38.</b>	<i>Desviación estándar para la señal P(Y).</i> .....	74
<b>Ecuación 39.</b>	<i>Desviación estándar del error en el receptor para la señal P(Y).</i> .....	75
<b>Ecuación 40.</b>	<i>Recta que pasa por dos puntos.</i> .....	143
<b>Ecuación 41.</b>	<i>Circunferencia de radio r.</i> .....	143
<b>Ecuación 42.</b>	<i>Calculo auxiliar del divisor.</i> .....	143
<b>Ecuación 43.</b>	<i>Cálculo del coeficiente a.</i> .....	143
<b>Ecuación 44.</b>	<i>Cálculo del coeficiente b.</i> .....	144
<b>Ecuación 45.</b>	<i>Cálculo del coeficiente c.</i> .....	144
<b>Ecuación 46.</b>	<i>Cálculo de las raíces del polinomio de segundo grado por Bascara.</i> .....	144
<b>Ecuación 47.</b>	<i>Cálculo de la Longitud en base a la latitud hallada.</i> .....	144
<b>Ecuación 48.</b>	<i>Predicción de la posición.</i> .....	149

## *Lista de acrónimos*

ABAS	Aircraft-Based Augmentation System
ACAS	Airborne Collision Avoidance System
ADS	Automatic Dependent Surveillance
AGPS	Assisted GPS
AMSS	Aeronautical Mobile Satellite Service
APV	Approach with Vertical Guidance
ASAS	African Satellite Augmentation System
ATS	Air Traffic Service
CCD	Charge-Coupled Device
CRC	Cyclic Redundancy Check
CSA	Channel of Standard Accuracy
CWAAS	Canadian Wide Area Augmentation System
DGPS	Differential GPS
DOP	Dilution Of Precision
ECEF	Earth-Centered, Earth-Fixed
e-Dif	extended Differential
EDISA	EGNOS Demonstrations In South America
EGNOS	European Geostationay Navigation Overlay Service
EKF	Extended Kalman Filter
ESA	European Spatial Agency
ESTB	EGNOS System Test Bed
FANS	Future Air Navigation System
FDE	Fault Detection and Exclusion
GAGAN	GPS and GEO Augmented Navigation
GBAS	Ground-Based Augmentation System
GDOP	Geometric Dilution Of Precision
GIOVE	Galileo In-Orbit Validation Element
GIS	Geographic Information System

GLONASS	GLObal NAvigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPWS	Ground Proximity Warning System
HDOP	Horizontal Dilution Of Precision
ICAO	International Civil Aviation Organization
IGS	International GNSS Service
ISRO	Indian Space Research Organisation
ITRF	International Terrestrial Reference Frame
LAAS	Local Area Augmentation System
LADGPS	Local Area DGPS
LBS	Location Based Systems
LGF	LAAS Ground Facility
LMS	Least-Mean-Square
MSAS	Multi-Functional Satellite Augmentation System
MSK	Minimum Shift Keying
MTC	Maritime Training Consultants
MTSAT	Multifunctional Transport Satellites
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NAVSTAR	Navigation System Timing And Ranging
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
NMEA-0183	National Marine Electronics Association
NPA	Non-Precision Approach
PC	Personal Computer
PDOP	Positional Dilution Of Precision
PLC	Programable Logic Controller
PPP	Precise Point Positioning
PPS	Precise Positioning Service
PRC	Pseudo-Random Code
PRN	Pseudo-Random Noise

QZSS	Quasi-Zenith Satellite System
RAIM	Receiver Autonomous Integrity Monitoring
RIMS	Ranging and Integrity Monitoring Stations
RINEX	Receiver INdependent EXchange format
RMS	Root Mean Square
RSAS	Regional Satellite Augmentation Systems
RTCM	Real Time Correction Messages
RTK	Real Time Kinematic
SACCSA	Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica
SARP	Standards and Recommended Practices
SBAS	Satellite-Based Augmentation System
SDCM	System of Differential Correction and Monitoring
SNAS	Satellite Navigation Augmentation System
SNR	Signal to Noise Ratio
TDOP	Time Dilution of Precision
UHF	Ultra High Frequency
USB	Universal Serial Bus
UTM	Universal Transversa Mercator
VDOP	Vertical Dilution Of Precision
VHF	Very High Frequency
VRS	Virtual Reference Station
WAAS	Wide Area Augmentation System
WADGPS	Wide Area Differential GPS
WAGE	Wide Area GPS Enhancement
WGS-84	World Geodetic System
WMS	Wide-area Master Stations
WRS	Wide-area Reference Stations

## *Resumen*

El posicionamiento de un objeto sobre la corteza terrestre durante años ha sido una tarea de innumerables investigaciones y adelantos tecnológicos. Desde los mercantes que usaban los cuerpos celestiales para ubicarse en su navegación por los océanos (Rao 2010, Misra & Enge 2010), hasta los sistemas autónomos que, portando un micro-dispositivo embebido, resuelven en cuestión de segundos la posición actual sobre la faz de la tierra para poder realizar su navegación (Asdrúbal 2004). Muchas son las aplicaciones que se favorecen de esta tecnología y en general la mayoría de ellas se pueden llevar a cabo sin inconvenientes en cuanto a la precisión requerida. Algunas áreas específicas como la agricultura de precisión, la aeronavegación, la navegación marítima, los desarrollos aeroespaciales, necesitan una mayor precisión para realizar sus tareas. Existen muchas investigaciones y desarrollos de empresas, gobiernos e instituciones que afrontan a diario este desafío. Muchos de ellos con resultados exitosos y comprobables. Por otro lado, también es razonable pensar que estos desarrollos no alcanzan a la totalidad de los usuarios que los necesitan. En algunos casos las razones son económicas y en otros la región de residencia no se ve beneficiada por el servicio. Adquirir la infraestructura para montar un sistema de posicionamiento preciso, como el DGPS por ejemplo, puede requerir la inversión de millones de dólares. En otros casos puede implicar el abono de un servicio mensual. Aún así, y más allá de contar con la capacidad económica, en ciertas regiones no es posible acceder a las señales de corrección por características del terreno o por estar fuera del área de cobertura. Por ello, la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas para estas regiones es un desafío recurrente.

Este proyecto trata de reducir la brecha existente entre estos desarrollos y los usuarios finales que necesitan realizar tareas con mayor precisión posicional que la entregada originalmente por un sistema global de navegación satelital (GNSS) como es el NAVSTAR-GPS. La propuesta está basada en el desarrollo de un sistema de posicionamiento relativo de precisión dotado de receptores de bajo costo. La contribución está dada por el desarrollo de una metodología y técnicas para el tratamiento de información que proviene de los receptores.

## Capítulo 1

### Introducción

El presente trabajo hace referencia a la tecnología de sensores como un medio capaz de interconectar los fenómenos físicos con el entorno. El empleo de los sensores en la tecnología, tanto en el ámbito industrial como doméstico, se ha vuelto usual; la medición de magnitudes mecánicas, térmicas, eléctricas y químicas en sectores como industrias automatizadas, la robótica, la ingeniería experimental, el ahorro energético, el control ambiental, automóviles (Bulusu & Jha 2005), electrodomésticos, computadoras, son tareas que sin la aplicación de los sensores serían impensables (Karl & Willig 2007, Pallás Areny 2004).

De manera general, los sensores son dispositivos de entrada que proveen una salida usable en respuesta a la medición obtenida (Cordeiro & Agrawal 2011, Lipták 2005).

#### **1.1. Planteo del Problema**

Es difícil asegurar que las mediciones tomadas con cualquier sensor sean correctas. Existen una gran cantidad de factores que pueden provocar una toma de decisiones errónea basada en las mediciones realizadas. No es una tarea sencilla afirmar que tanto la medición obtenida como la decisión tomada sean correctas. Para ello se deben emplear diversas técnicas que permitan acotar el error introducido en dichos procesos. Los sensores son diseñados y construidos en base a diferentes materiales que en su conjunto realizan las operaciones deseadas. Dichos materiales en muchas ocasiones no cumplen su función de la manera esperada lo que hace variar el resultado obtenido por el mismo. Por este motivo, los sensores, en algunas ocasiones pueden brindar cierta información inexacta. Pueden ocurrir casos en los cuales los valores obtenidos varíen de manera brusca por lo cual llegar a obtener una medición estable puede ser un gran problema. Los valores pueden ser insuficientes en cuanto a la precisión necesitada o pueden afectar a la misma. Dado que en muchas ocasiones deben funcionar en ambientes hostiles (Chakrabarty & Iyengar 2005) pueden ser afectadas por ruidos, malas condiciones meteorológicas, cortes de energía, suciedad, entre muchos otros factores.

Para afrontar los problemas de fiabilidad se emplean técnicas hardware tales como la redundancia de sensores. Con ella se puede obtener de manera simultánea una medición

proveniente de más de un sensor. Asimismo, se pueden aplicar técnicas de software para procesar la información y encontrar alguna contradicción. Existen muchos otros factores que hacen del sensado un proceso complejo y difícil, principalmente al momento de afirmar su veracidad o exactitud.

Los receptores GPS son un caso particular de sensores y en la actualidad están siendo ampliamente usados en múltiples sectores con diferentes finalidades.

De manera general, un sistema de posicionamiento satelital es aquél que se basa en el uso de satélites para poder ubicar un receptor en tierra basado en técnicas de triangulación y medición de retardo de la señal.

La tecnología de navegación por satélite se usa en aplicaciones militares y civiles. La aviación ha propulsado el uso de los GNSS y varios sistemas de aumentación (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS). Estos sistemas proveen asistencia en fases de precisión de vuelo. La incorporación de un canal de comunicación con un receptor GNSS permite la transmisión de la ubicación de la aeronave o a otra aeronave y/o a la torre de control aéreo. El lanzamiento de naves espaciales utiliza también navegación por satélite en todas las fases de operación (lanzamiento en tierra, en órbita y reentrada, y aterrizaje). En la marina, GNSS ha sido usado tanto de manera comercial como para recreación. La navegación ha mejorado en todos los lugares con agua, desde el viaje oceánico hasta en ríos, especialmente con mal tiempo. En cuanto al terreno, la comunidad topográfica depende fuertemente del DGPS para alcanzar precisiones de medición en el rango de milímetros. Técnicas similares son usadas en agricultura, minería de superficies, y clasificación para control de vehículos en tiempo real y en la comunidad de transporte para obtener la ubicación de un tren. GNSS es un factor clave en sistema de transporte inteligente. En aplicaciones para vehículos, es usado para guiar, seguir, y administrar flotas. Combinando un teléfono celular o un canal de comunicaciones con este sistema, se puede rastrear vehículos y asistir al servicio de emergencia. Para sistemas de información geográfica, mapeo y agricultura donde las aplicaciones incluyen funcionalidad y mapeo automático con sensado remoto y fotogrametría. Últimamente, GIS, GPS y sensado remoto han madurado lo suficiente para ser usado en agricultura. Empresas de GIS han desarrollado aplicaciones que permiten a los productores evaluar las condiciones del campo y su relación. Se están desarrollando aplicaciones de cinemática de tiempo real (RTK) y GPS diferencial (DGPS) para agricultura de precisión. Esto incluye muestreo de suelos, seguimiento, aplicación de fertilizantes y

químicos. Otro área de aplicación es el deporte como parapente, ala delta, planeadores, etc. En el rescate, para tareas de salvamento y localización de enfermos.

El problema que presentan la mayoría de los sistemas GNSS es la precisión de la posición entregada. Si bien hay muchos sistemas creados con el fin de asistir en el aumento de la precisión, algunos son poco accesibles dado sus costos y otros a causa de la región donde se requiere su uso.

Si se desea trabajar con receptores estándar con un mínimo costo, no se puede asegurar de obtener posiciones con una precisión mayor a los 15 metros el 95% de las veces (Zandbergen & Arnold 2011). Por otro lado, y más allá de abonar un servicio o mantener una infraestructura de gran costo, en ciertas regiones no es posible contar con ellos, ya sea por las características del terreno, por el radio de alcance o por cuestiones de cobertura de las antenas de telefonía celular. Las aplicaciones de agricultura de precisión no se pueden llevar adelante con la precisión entregada por el sistema GPS estándar por ejemplo cuando necesitan posicionar maquinaria.

## **1.2. Objetivo**

El objetivo general del presente proyecto es el desarrollo de una metodología y el estudio de diferentes técnicas y algoritmos para el tratamiento de la información de receptores GPS estándar. Las técnicas y algoritmos analizados son implementados en un sistema diferencial GPS de posicionamiento relativo para mejorar la precisión de posicionamiento.

Al finalizar el proyecto se pretende tener desarrollada una herramienta de asistencia tanto *on-line* como *off-line* para obtener posiciones de mejor precisión a las entregadas por el sistema GPS originalmente. La herramienta debe implementar alguna o todas las técnicas analizadas o creadas, tal que permita mejorar la precisión posicional relativa del GPS. Además, el diseño de la herramienta se basa en la portabilidad de manera que funcione en regiones donde no se cuenta con servicios de aumentación para mejorar la precisión. Debe ser configurable y con posibilidades de trabajar en cualquier región geográfica.

## **1.3. Organización del Informe**

En el capítulo 2 se describe el estado del arte. Allí se presenta una breve reseña histórica acerca del origen y uso de los sensores en general, los sistemas de coordenadas y los



sistemas de navegación basados en satélites. Se presentan los sistemas actuales de aumentación destinados a mejorar la precisión y cuales son las opciones disponibles en Argentina. En el capítulo 3, se presentan las técnicas usadas para el análisis de los datos. En el capítulo 4, se introducen los conjuntos de datos muestreados y el análisis de ellos. Se plantean los problemas encontrados y cómo se arriba su tratamiento. En el capítulo 5, se evalúa el desempeño de las técnicas presentadas. Se analizan los resultados obtenidos luego de procesar los datos adquiridos con la herramienta desarrollada (ver Anexo I) y las técnicas implementadas en ella. Por último, en el capítulo 6, se presentan las conclusiones derivadas al finalizar la tesis. Se describen las metas logradas, los medios para alcanzarlas y los contratiempos presentados. Asimismo, se proponen trabajos futuros y posibles extensiones. Por último, la herramienta de análisis utilizada es descrita en el Anexo I.

## Capítulo 2

### Estado del Arte

#### 2.1. Sensores

En el estudio científico de los fenómenos naturales que nos rodean, una de las primeras tareas en llevar a cabo consiste en el análisis detallado de las variables físicas del fenómeno para obtener la mayor información del mismo. Para realizar este análisis, se usan sensores capaces de medir las variables físicas y transformar esa medición en información útil para su estudio. Un sensor es un dispositivo hecho para responder a una variable física de manera predecible. Los sensores pueden ser mecánicos, eléctricos, eléctrico-mecánicos, electrónicos, magnéticos, u ópticos, entre muchos otros. La llamada función de transferencia del sensor asegura una relación conocida entre la variable física y la salida del sensor.

Los sensores pueden ser de formas muy variadas, aún aquellos que miden la misma variable. Sin embargo, cualquier sensor puede ser estudiado según dos aspectos: físico y funcional. El aspecto físico se refiere a cómo es hecho el sensor o a qué forma tiene. El término sensor físico se refiere a dispositivos que sensan las variables físicas de interés, por ejemplo, un barómetro, un radar, un termómetro, etc. El aspecto funcional está referido a qué se supone que debe hacer el sensor o cuál es su abstracción. El término sensor abstracto o lógico es usado para referirse a una abstracción de la lectura tomada por un sensor en particular. Existen diferentes abstracciones posibles. La lectura del sensor puede ser denotada por un simple número o como un intervalo en un conjunto de números reales. En la mayoría de los casos, los sensores siempre están asociados a un elemento transductor que convierte las variaciones del sensor en señal eléctrica útil.

Dado que la existencia de un fenómeno implica la variación en alguno o en todos los parámetros asociados a él, la señal eléctrica obtenida presentará una cierta variación con el tiempo, directamente relacionada con la variación de la magnitud medida. Por lo tanto, en el estudio del fenómeno un cambio toma efecto desde un espacio  $(n + 1)$ -dimensional de magnitudes físicas ( $n$  magnitudes y el tiempo) a  $n$  espacios bidimensionales de magnitudes eléctricas (amplitudes y tiempos), cada uno correspondiente a una de las magnitudes físicas medidas.

La ventaja obtenida con esta transformación es que, con señales eléctricas, una completa serie de herramientas y tecnologías nos permiten su análisis y tratamiento,

algo que no siempre es posible directamente sobre las magnitudes físicas del fenómeno. Para tratar la información obtenida por los sensores, un sistema de procesamiento es necesario. Este sistema debe operar apropiadamente con los datos de cada sensor, interpretándolos y obteniendo el resultado deseado. Este sistema será más o menos complejo, dependiendo del número de sensores usados y si son del mismo o diferente tipo, lo que depende del fenómeno en estudio (Ilyas & Mahgoub 2006).

### **2.1.1. Sensores inteligentes**

El agregado de cierta lógica adicional permite introducir funcionalidad, obteniendo un sistema capaz de medir, analizar y comunicar resultados (Ilyas & Mahgoub 2005). Estos sensores son de pequeño tamaño y se conocen como sensores inteligentes. Son utilizados para proveer información acerca de parámetros medidos o para identificar estados de control y son candidatos a incrementar la inteligencia embebida. Un sensor inteligente puede comunicar mediciones directamente a un instrumento o a un sistema (Hać 2003).

Un sensor inteligente es aquel que combina la función de detección y algunas de las funciones de procesamiento de señal y comunicación. Dado que estas funciones adicionales suele realizarlas un microprocesador, cualquier combinación de sensor y microprocesador se denomina sensor inteligente. Un sensor inteligente es inevitablemente más caro que un sensor convencional. Pero si además del costo de compra se consideran el mantenimiento, fiabilidad, etc., el costo total de un sensor convencional puede ser mucho mayor. El nivel de complejidad de un sensor inteligente puede ser muy variado. Además de la detección o transducción puede incluir: acondicionamiento de señal, correcciones de cero, ganancia y linealidad, compensación ambiental (temperatura, humedad), escalado y conversión de unidades, comunicación (bidireccional) digital, autodiagnóstico, decisión e incluso activación o acción sobre el sistema donde se conecta. Así pues, los sensores inteligentes incluyen, además del sensor primario, algún algoritmo de control en memoria y capacidad de comunicación digital (Pallás Areny 2004).

El primer sensor inteligente fue un transmisor de presión introducido por Honeywell en 1983. Consistía en dos sensores de presión (diferencial y estática) y uno de temperatura (para compensación), que se multiplexaban hacia un conversor analógico-digital y un microprocesador. Este procesaba las señales y su salida se convertía de nuevo en analógica con un convertidor digital-analógico (Pallás Areny 2004).

La repercusión inmediata de los sensores inteligentes en un sistema de medida y control es que reducen la carga sobre controladores lógicos programables (PLC), PC u otros controladores digitales, además de aumentar la fiabilidad del sensor. Los sistemas de medida que combinan varios sensores para realizar funciones complejas como el reconocimiento de patrones y la extracción de características, que tradicionalmente han sido realizadas por seres humanos, se denominan también sistemas inteligentes (Pallás Areny 2004).

### 2.1.2. Historia

Un sensor es cualquier dispositivo que detecta una determinada acción externa. La palabra sensor sugiere la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos.

Los sensores existen desde siempre porque el hombre los tiene incluidos en su cuerpo y de diferentes tipos como muestra la figura 1. El hombre experimenta sensaciones como calor o frío, duro o blando, fuerte o flojo, agradable o desagradable, pesado o no. Y poco a poco le ha ido añadiendo adjetivos a estas sensaciones para cuantificarlas como frígido, fresco, tibio, templado, caliente. Es decir, que día a día ha ido necesitando el empleo de magnitudes medibles más exactas.

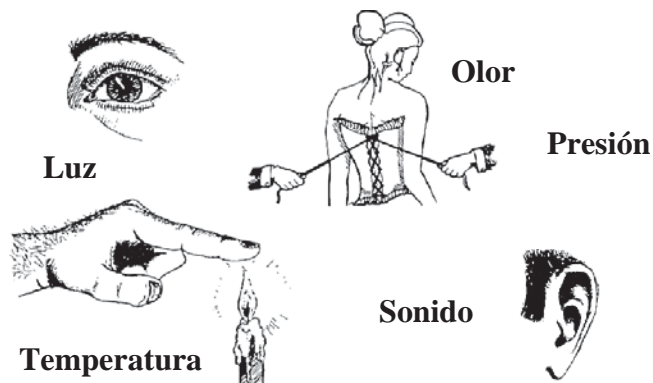


Figura 1. Sensaciones experimentadas por el hombre.

Los sensores electrónicos han ayudado no sólo a medir con mayor exactitud las magnitudes, sino a poder operar con dichas medidas. Pero no se puede hablar de los sensores sin sus acondicionadores de señal. Normalmente los sensores ofrecen una variación de señal muy pequeña y es muy importante equilibrar las características del

sensor con las del circuito que le permite medir, acondicionar, procesar y actuar con dichas medidas.

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida (Pallás Areny 2004).

### **2.1.3. Sistemas de sensores**

La evolución de los sistemas de sensores se puede describir en cinco etapas, cada una representada por un tipo diferente de sensor, a pesar de que una nueva etapa no implica la desaparición de los sensores utilizados en la anterior.

- **Sistemas de sensor simple:** un ejemplo de un sistema de sensor simple es un sistema radar. Este equipo manda una señal de radio a una frecuencia determinada y en una dirección dada, y recibe de vuelta la señal reflejada en los objetos que están en el camino del haz. De la diferencia de tiempo entre los pulsos emitidos y recibidos, el sistema calcula la distancia del objeto. Otro ejemplo de un sistema de sensor simple es el sonar usado para localizar objetos debajo del agua. Debido a la tecnología disponible, los sistemas de sensor simple fueron usados antes de la era de la microelectrónica. Con un sensor solo, la configuración del sistema y el análisis de datos eran económicos y fácil de implementar. Sin embargo, su simplicidad fue también una desventaja por el limitado rango de aplicaciones. Por ejemplo, un robot móvil autónomo necesita varios sensores (táctiles, cámaras, CCD, etc.) y por lo tanto no puede ser construido como un sistema de sensor simple. Otro inconveniente de este tipo de sistema es su robustez y la imposibilidad de su uso en aplicaciones de misión crítica. La tercera desventaja deriva del hecho que un sistema de sensor simple no puede garantizar que siempre la lectura sea la correcta.
- **Sensores replicados:** una solución a este tercer inconveniente es el uso de varios sensores, cada uno obteniendo una lectura del fenómeno de interés. Esta estrategia permite la validación de la lectura usando diferentes técnicas como la votación por mayoría, el promedio o el promedio ponderado.
- **Sensores diferentes:** cuando se desea estudiar un fenómeno complejo, tal vez sea necesario reunir diferentes tipos de información del mismo. Para ello, podemos usar distintos tipos de sensores que nos darán aspectos diferentes del fenómeno. Por ejemplo, un robot móvil autónomo está equipado con diferentes sensores

necesarios para obtener una percepción completa del ambiente. Las principales ventajas de la integración de diferentes sensores son:

- Aumentar la fiabilidad
- Mejorar la tolerancia a fallos
- Mejorar la detección y reducción de ruido

Esta última ventaja se explica si nos damos cuenta que, observando la misma señal de interés, el ruido obtenido por los diferentes sensores tiende a ser correlacionado.

- **Sensores distribuidos espacialmente:** algunas aplicaciones requieren que las observaciones de un objeto sean tomadas simultáneamente desde dos o más puntos en el espacio. Existen varios grados de difusión en los sensores: desde una superficie de área limitada hasta una región o incluso un país entero. El tipo de sensor usado puede ser cualquiera, incluso una combinación de ellos. La peculiaridad de estos sistemas es que, ahora, la información varía espacial y temporalmente, entonces el sistema de procesamiento se torna más complejo.
- **Sensores inteligentes:** si un alto número de sensores, replicados o diferentes, son usados, el volumen de información a procesar crece hasta el punto que el problema tiene una solución difícil. En este caso una posibilidad es usar sensores inteligentes en la medición de la variable física. Un sensor inteligente incluye cierta circuitería lógica para abstraer la información con un contenido semántico más grande que el obtenido con la señal eléctrica de la variable física. Por ejemplo, un sistema para detectar el paso de personas en un recinto sólo puede ofrecer un pulso eléctrico cuando una persona entra, o tiene la lógica necesaria para ofrecer un valor numérico representativo del número de persona que entró. En este caso, el sensor es inteligente, ofreciendo información más elaborada que el pulso eléctrico. La abstracción de información puede venir con una reducción de información que afecta al diseño del sistema de procesamiento, reduciendo la carga computacional y el ancho de banda necesario.

#### **2.1.4. Tipos de sensores**

El elevado número de sensores disponibles para medir las distintas magnitudes físicas hace imposible su estudio racional sin realizar una clasificación según algún criterio.

En la tabla 1 se muestran varios criterios de clasificación y se dan ejemplos de sensores de cada clase. Cualquiera de estas clasificaciones es exhaustiva, y cada una tiene interés particular para diferentes situaciones de medida.

Criterio	Clases	Ejemplos
Aporte de energía	Moduladores	Termistor
	Generadores	Termopar
Señal de salida	Analógicos	Potenciómetro
	Digitales	Codificador de posición
	Todo o nada	Célula fotoeléctrica
Modo de operación	De deflexión	Acelerómetro de deflexión
	De comparación	Servo acelerómetro
Magnitud física a medir	Posición lineal o angular	Resolvers
	Desplazamiento o deformación	Condensador diferencial
	Velocidad lineal o angular	Taco generador, encoders
	Aceleración	Galga + Masa resorte
	Fuerza y par	Galga extensiométrica
	Presión	Tubo Bourdon +
	Caudal	Anemómetro
	Temperatura	Resistencias NTC, PTC
	Presencia o proximidad	Ultrasonidos
	Táctiles	Matriz de contactos
	Intensidad lumínica	Fotodiodo, fototransistor
	Sistemas de visión artificial	Cámaras CCD
Parámetro variable	Resistivos	Galga
	Capacitivos	Dieléctrico variable
	Inductivos y electromagnéticos	LVT
	Generadores	Piroeléctricos
	Digitales	Vórtices
	Uniones p-n	Fotoeléctricos
	Ultrasonidos	Efecto Doppler

**Tabla 1.** Clasificación de los sensores.

## 2.2. Señales y ruidos

Las señales son fundamentales para poder interpretar diferentes fenómenos. Estos fenómenos pueden ser captados por sensores, los cuales muchas veces sufren de ruidos. Por su parte, los ruidos provocan que la información entregada por los sensores no siempre sea exacta. Las señales puras en general tienen un gran componente de ruido que no permite su manipulación directa sin un previo acondicionamiento.

### 2.2.1. Señales

Son variaciones a lo largo del tiempo de las entradas o salidas de un sistema. Estas señales pueden ser de distinta naturaleza, y por tanto sus unidades físicas son diversas. Hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas).

Según cómo sea la variación de estas señales, pueden ser clasificadas dentro de dos grandes grupos: señales analógicas y señales digitales o discretas.

**Señales analógicas:** Son aquellas cuya variación, tanto en amplitud como a lo largo del tiempo, es continua. Es decir, pueden tomar cualquier valor real, en cualquier instante de tiempo.

**Señales discretas:** Este tipo de señales no tiene una variación continua como las anteriores, sino que su evolución se rige por un determinado conjunto finito de valores posibles. Según dónde tome este conjunto de valores, podremos distinguir entre señales discretas en tiempo o discretas en amplitud.

**Señales discretas en tiempo:** Sólo tienen valor en instantes de tiempo predeterminados. Y aunque su amplitud puede ser cualquier valor dentro del rango de los reales, el valor de la señal entre dos instantes de tiempo consecutivos no está definido.

**Señales discretas en amplitud:** En este caso, la señal toma valor en cualquier instante de tiempo, pero estos valores de amplitud pueden encontrarse entre los definidos en el conjunto predeterminado.

En particular, el tipo más común de señal electrónica analógica es el voltaje que varía en función del tiempo. Puesto que ambos parámetros pueden considerarse como un rango continuo de valores, la señal se define como continua. Por comparación, al pasar esta señal a través de un conversor analógico/digital ambos parámetros son discretizados. Por ejemplo, una conversión realizada con 12 bits a una tasa de muestreo de 1000 muestras por segundo, hace que el voltaje tome 4096 ( $2^{12}$ ) niveles posibles y el tiempo sólo se defina en incrementos de un milisegundo. La mayoría de las señales encontradas en la naturaleza son continuas, mientras que las discretas se hallan comúnmente en los sistemas digitales.

### 2.2.2. Ruidos

Todas las corrientes o tensiones parásitas que son extrañas a la señal de interés constituyen el ruido, así llamado por interferir con la señal. Las tensiones de ruido



aparecen en el funcionamiento básico de los dispositivos electrónicos o resultan del diseño y uso inadecuados del circuito.

Por otro lado, las perturbaciones externas o interferencias son aquellas señales que afectan al sistema de medida como consecuencia del principio utilizado para medir las señales de interés. Las perturbaciones internas son aquellas señales que afectan indirectamente a la salida debido a su efecto sobre las características del sistema de medida (Pallás Areny 2004).

Los efectos del ruido conviene reducirlos al mínimo a fin de caracterizar las señales con la mayor precisión posible y permitir la amplificación de las señales más débiles. Una medida conveniente de la influencia del ruido sobre cualquier señal es la razón señal-ruido, que es el coeficiente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido en un punto cualquiera del circuito.

### **2.2.2.1. Tipos de ruidos**

- Ruido químico: Fluctuaciones de temperatura, presión, humedad, materiales fotosensibles, etc.
- Ruido térmico: Cuando se conectan en cascada varias etapas amplificadoras, en los terminales de salida aparece una tensión de ruido aleatoria, incluso en ausencia de señal de entrada. Esta tensión de salida está originada por una tensión aleatoria generada en la resistencia de entrada. Las tensiones de ruido que aparecen entre los terminales de las resistencias se atribuyen al movimiento desordenado de los electrones libres en el material de la resistencia. Los electrones libres de un conductor pueden deambular libremente en virtud de su energía térmica y en un instante dado cualquiera, pueden haber más electrones dirigiéndose hacia un terminal de la resistencia que hacia el otro. El resultado es una pequeña diferencia de potencial instantánea entre los terminales. La magnitud del potencial fluctúa rápidamente al cambiar de un instante a otro el número de electrones que se mueven en una dirección.
- Ruido de disparo (Cuántico): Proviene del movimiento de electrones o fotones en los nodos o uniones. Es aleatorio y dependiente del valor de la corriente y del ancho de banda. Es independiente de la frecuencia de trabajo
- Ruido de parpadeo o de la corriente ( $1/f$ ): No se comprende bien el origen físico. Es proporcional a la magnitud de la señal. Depende de cómo están construidos y ensamblados los detectores de fotones y las resistencias. Es más importante a bajas

frecuencias y crece con el cuadrado de la intensidad. Para anchos de banda chicos  $1/f$  es aproximadamente constante.

- Ruido ambiental: dependiente del entorno o medioambiente donde está funcionando el sistema.

#### **2.2.2.2. Acondicionamiento de la señal**

Un sistema que trata con señales está formado por componentes interconectados. Al conectar dos elementos de un sistema electrónico pueden darse dos situaciones: que se desee que la tensión o corriente de entrada de un elemento coincida con la de salida del elemento precedente; o que se desee transferir la máxima potencia de un elemento al siguiente. En estos casos, el acondicionamiento de señal es la etapa encargada de filtrar y adaptar la señal y se encarga de:

- Adaptar el rango de salida de una señal (normalmente en tensión).
- Acoplar la impedancia de salida de un componente con la impedancia de entrada.

Las operaciones sobre señales analógicas pueden clasificarse en:

- Lineales (se cumple el principio de la superposición)
- No lineales.

Para la realización física de las operaciones hay que recordar que en las señales complejas la información está no sólo en su amplitud, sino también en su fase. Si se desea que la señal conserve su forma, la operación debe ser lineal (no modificar la frecuencia) y el desfase introducido por la operación debe ser proporcional a la frecuencia. El acondicionamiento de señales digitales suele ser menos común, ya que la mayoría de los componentes que interactúan con el sistema emiten señales analógicas. Se puede considerar que las operaciones con este tipo de señales sólo se realizan por parte de un procesador. Se pueden clasificar las operaciones sobre las señales digitales entre:

- Operaciones sobre la información representada por las señales digitales
- Operaciones sobre sus parámetros físicos.

Las primeras se pueden realizar todas con un microprocesador, mientras que la mayoría de las segundas no. El uso de un microprocesador reduce el número de componentes y no tiene limitaciones de entrada o salida, en contrapartida se obtiene una menor

velocidad y mayor ocupación de memoria que si se utilizasen componentes específicos para realizar las operaciones.

#### **2.2.2.2.1. Errores en el acondicionamiento de las señales**

En señales digitales es más difícil que se introduzcan errores que en las analógicas, se puede decir que en señales digitales no se introducen errores, sino que se producen fallos. Debido a que la señal digital es discreta y sólo puede tener dos niveles de tensión (1 ó 0 lógicos) para cada bit de los que forman la palabra digital, el posible cambio de 1 a 0 o viceversa se produce por un fallo eléctrico en la mayoría de sus casos. Además, las palabras digitales suelen contener un campo (CRC) que comprueba la concordancia entre la señal original y la recibida, por lo que dicha palabra se rechaza en caso de no cumplirse la comprobación. Es por ello que los errores en señales digitales suelen ser muy escasos. En señales analógicas, podemos definir como error toda diferencia entre la salida real y la esperada. En las operaciones con señales analógicas siempre se producirán errores, debido a las limitaciones físicas intrínsecas y a los elementos con que se realizan estas operaciones. Los errores introducidos se pueden clasificar en:

- **Errores estáticos:** Errores producidos cuando la entrada es de muy baja frecuencia (menor de 0,01 Hz). Estos errores se pueden categorizar en:
  - *Errores aditivos:* Se denominan errores estáticos aditivos a aquellos que son constantes con respecto a la magnitud de entrada. También se conocen como errores de cero. Suelen expresarse como error absoluto o relativo al fondo de escala, aunque se suele preferir la primera forma (absoluto).
  - *Errores multiplicativos:* También llamados *errores de ganancia* o *factor de escala*, varían con la magnitud de entrada. Al igual que en los aditivos, suelen expresarse como error absoluto o relativo al fondo de escala, aunque en este caso se suele preferir la segunda forma de hacerlo (relativo).
  - *Derivas:* Más comúnmente conocidas como *factores ambientales*, los más importantes podrían ser la temperatura, humedad, tiempo (cronológico) y presión. La existencia de estas derivas obliga a considerar los errores de cero, ya que, aunque puedan ser anulados con una buena calibración, las condiciones climáticas del momento de calibrado pueden no repetirse. Para calcular el efecto de las derivas en

los errores se deben tener en cuenta que las derivas debidas a cada factor son independientes entre sí. Dado que cada contribución a las derivas es aleatoria, se da como método de cálculo aceptable del error total la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada una de ellas.

- **Errores dinámicos:** Son un indicativo del comportamiento de la señal frente a otras entradas. Todo sistema tiene una respuesta ante una señal de entrada, en donde se distinguen la fase transitoria y la estacionaria. Al hablar de error dinámico suele sobreentenderse en la fase estacionaria. El error dinámico depende de la forma de la entrada aplicada, aunque en el acondicionamiento de señales se consideren entradas senoidales. En el cálculo de las funciones de transferencia no se tienen en cuenta los transitorios a dichas entradas. Cuando la operación realizada es lineal, se pueden dividir los errores en aditivos, multiplicativos y posible error de linealidad. El ruido que introduce un amplificador es un buen ejemplo de error aditivo típico. Como error multiplicativo común podemos citar el que se produce con la limitación del ancho de banda.

### 2.2.2.3. Reducción de perturbaciones y ruido

Los efectos de las perturbaciones internas y externas se pueden reducir mediante una alteración del diseño o a base de añadir nuevos componentes al sistema. Un método para ello es el denominado diseño con insensibilidad intrínseca. Se trata de diseñar el sistema de forma que sea inherentemente sensible sólo a las entradas deseadas.

Otra técnica para reducir las interferencias es el filtrado. Un filtro es todo dispositivo que separa señales de acuerdo con su frecuencia. Si los espectros frecuenciales de la señal y las interferencias no se solapan, la utilización del filtro puede ser efectiva.

Una técnica habitual de compensación de perturbaciones es la utilización de entradas opuestas. Se aplica con frecuencia para compensar el efecto de las variaciones de temperatura (Pallás Areny 2004).

Una de las maneras de reducir el ruido introducido en un sistema es aumentar la Relación Señal/Ruido (SNR): El ruido generalmente es constante e independiente de la magnitud de la señal.

Formas de aumentar la relación Señal / Ruido:

- Métodos de hardware: se incorporan al instrumento filtros, cortadores, moduladores, etc. Algunos métodos:

- Conexión a tierra
  - Blindaje
  - Minimización de la longitud de los conductores
  - Amplificadores diferenciales
  - Filtrado analógico
  - Modulación
  - Amplificadores de corte
- Métodos de software: utilizan algoritmos que permiten extraer las señales de los entornos ruidosos. Algunos métodos son:
    - Promediado conjunto
    - Promediado de puntos
    - Filtrado digital. Se puede realizar por:
      - Promediado conjunto
      - Transformada de Fourier
      - Suavizado polinomial

### **2.3. Matemática aplicada**

Dado que las señales de los sensores siempre pueden estar afectadas por ruidos, es recomendable aplicar algún filtro o función matemática para detectarlo y así poder corregirlo. Aquí se presentan algunos recursos matemáticos usados para procesar las señales provenientes de los sensores.

#### **2.3.1. Promedio**

En matemática y estadística, el promedio de un conjunto finito de números es la suma de todos sus valores dividido la cantidad de elementos del conjunto. Cuando el conjunto es una muestra aleatoria recibe el nombre de media muestral siendo uno de los principales estadísticos muestrales.

Expresado de forma más intuitiva, el promedio es la cantidad total de la variable distribuida en partes iguales entre cada observación.

También, el promedio puede ser denominado como centro de gravedad de una distribución, el cual no está necesariamente en la mitad.

Una de las limitaciones del promedio es que se ve afectada por valores extremos; valores muy altos tienden a aumentarlo mientras que valores muy bajos tienden a reducirlo, lo que implica que puede dejar de ser representativo de la población.

Dados los  $n$  números  $a_1, a_2, \dots, a_n$ , el promedio se define simplemente como muestra la ecuación 1:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{a_1 + \dots + a_n}{n}$$

*Ecuación 1. Promedio.*

### 2.3.2. Varianza

En teoría de probabilidad, la varianza de una variable aleatoria es una medida de su dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su promedio. La unidad de medida es diferente a la unidad de la varianza. Por ejemplo, si la variable mide una distancia en metros, la varianza se expresa en metros al cuadrado. La desviación estándar, la raíz cuadrada de la varianza, es una medida de dispersión alternativa expresada en las mismas unidades.

La varianza puede verse muy influida por valores atípicos y se desaconseja su uso cuando las distribuciones de las variables aleatorias tienen colas pesadas. Se recomienda el uso de otras medidas de dispersión más robustas.

Dada una variable aleatoria  $x$  que tiene como media  $\mu = E(X)$ , se define la varianza  $Var(X)$  como muestra la ecuación 2:

$$Var(X) = E[(X - \mu)^2]$$

*Ecuación 2. Varianza.*

Desarrollando la ecuación anterior, se obtiene la definición mostrada en la ecuación 3:

$$\begin{aligned} Var(X) &= E[(X - \mu)^2] \\ Var(X) &= E[(X^2 - 2X\mu + \mu^2)] \\ Var(X) &= E(X^2) - 2\mu E(X) + \mu^2 \\ Var(X) &= E(X^2) - 2\mu^2 + \mu^2 \\ Var(X) &= E(X^2) - \mu^2 \end{aligned}$$

*Ecuación 3. Varianza desarrollada.*

Como ocurre con la distribución de Cauchy, si una distribución no tiene esperanza, tampoco tiene varianza. Existen otras distribuciones que, aun teniendo esperanza, carecen de varianza. Un ejemplo de ellas es la de Pareto cuando su índice  $k$  satisface  $1 < k \leq 2$ .

### 2.3.3. Covarianza

Es una técnica estadística que busca comparar los resultados obtenidos en diferentes grupos de una variable cuantitativa. La covarianza entre dos variables es un indicador del nivel de relación entre ambos grupos. La formulación clásica, se simboliza por la letra griega sigma ( $\sigma_{xy}$ ) cuando ha sido calculada en la población. Si se obtiene sobre una muestra, se designa por la letra "Sxy".

La formula suele aparecer expresada como se ve en la ecuación 4:

$$\hat{S}_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}$$

*Ecuación 4. Covarianza.*

La expresión se resuelve promediando el producto de las puntuaciones diferenciales por su tamaño muestral ( $n$  pares de puntuaciones,  $n-1$  en su forma insesgada).

Una covarianza positiva significa que existe una relación lineal positiva entre las dos variables. Es decir, las puntuaciones bajas de la primera variable (X) se asocian con las puntuaciones bajas de la segunda variable (Y), mientras las puntuaciones altas de X se asocian con los valores altos de la variable Y.

Una covarianza de negativa significa que existe una relación lineal inversa perfecta (negativa) entre las dos variables. Lo que significa que las puntuaciones bajas en X se asocian con los valores altos en Y, mientras las puntuaciones altas en X se asocian con los valores bajos en Y.

Una covarianza 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas.

### 2.3.4. Desviación estándar

Se define como la raíz cuadrada de la varianza. Esta medida informa acerca de la medida de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética. Para conocer un conjunto de datos no es suficiente la media sino se necesita conocer la desviación que presentan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución. Es una medida de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. La ecuación 5 refleja su definición.

$$\sigma = \sqrt{s^2}$$

*Ecuación 5. Desviación estándar.*

### 2.3.5. Coeficiente de correlación

Es un índice que mide la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación es independiente de la escala de medida de las variables. Básicamente, esta información se refiere a dos características de la relación lineal: la dirección o sentido y la cercanía o fuerza.

Es importante notar que el uso del coeficiente de correlación sólo tiene sentido si la relación bivariada a analizar es del tipo lineal. Muchas veces el coeficiente de correlación se define - de manera más general - como un instrumento estadístico que mide el grado de asociación lineal entre dos variables.

El coeficiente de correlación entre dos variables aleatorias X e Y es el cociente mostrado en la ecuación 6:

$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

*Ecuación 6. Coeficiente de correlación.*

donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza de (X,Y) y  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  las desviaciones típicas de las distribuciones marginales.

El signo de  $r$  indica la dirección de la relación lineal (al igual que la covarianza muestral): valores positivos indican una relación directa y valores negativos una relación inversa entre las variables involucradas.

Por otro lado, el valor absoluto del coeficiente de correlación indica la fuerza de la relación lineal. Un coeficiente de correlación muy cercano a uno en valor absoluto indica que la relación entre las variables es muy fuerte, mientras que si es muy cercano a cero, indica que la relación es muy débil. Entonces el valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1, +1]:

Si  $r = 1$ , existe una correlación positiva perfecta. Esto indica una dependencia total entre las dos variables denominada relación directa: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en igual proporción.

Si  $0 < r < 1$ , existe una correlación positiva.

Si  $r = 0$ , no existe relación lineal. Pero esto no necesariamente implica que las variables son independientes: pueden existir todavía relaciones no lineales entre las dos variables.

Si  $-1 < r < 0$ , existe una correlación negativa.



Si  $r = -1$ , existe una correlación negativa perfecta. El índice determina una dependencia total entre las dos variables llamada relación inversa: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en igual proporción.

### 2.3.6. Recta de mínimos cuadrados

Dado un conjunto de pares, ternas, etc., se intenta encontrar la función que mejor se aproxime a los datos, de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático. Es una técnica de análisis numérico encuadrada dentro de la optimización matemática.

Intenta minimizar la suma de cuadrados de las diferencias ordenadas entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos. Específicamente, se llama mínimos cuadrados promedio (LMS) cuando el número de datos medidos es 1 y se usa el método de descenso por gradiente para minimizar el residuo cuadrado. Se puede demostrar que LMS minimiza el residuo cuadrado esperado, con el mínimo de operaciones (por iteración), pero requiere un gran número de iteraciones para converger. Un requisito implícito para que funcione el método de mínimos cuadrados es que los errores de cada medida estén distribuidos de forma aleatoria. Es importante que los datos muestreados estén bien escogidos para que permitan visibilidad en las variables que han de ser resueltas.

La técnica de mínimos cuadrados se usa comúnmente en el ajuste de curvas. La recta resultante presenta dos características importantes:

1. Es nula la suma de las desviaciones verticales de los puntos a partir de la recta de ajuste.
2. Es mínima la suma de los cuadrados de dichas desviaciones. Ninguna otra recta daría una suma menor de las desviaciones elevadas al cuadrado

### 2.3.7. Filtros

De manera general los filtros permiten discriminar uno o varios elementos que fluyen a través de él. Hay diferentes tipos de filtros: electrónico, fotográfico, hidráulico, de acuario, de cigarro, de agua, de aceite, de combustible, etc. En las ciencias se encuentran los filtros matemáticos además de los ópticos.

#### 2.3.7.1. Filtros paso bajo y alto

Los filtros paso alto y bajo son de gran uso en aplicaciones electrónicas. La tarea de estos filtros tiene que ver con dificultar el paso a cierto rango de valores, dependiendo si

son altos o bajos. Estos filtros pueden ser utilizados para permitir descartar mediciones con mucho ruido o error que influyan sobre un cierto resultado final.

### 2.3.7.2. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado de un proceso en cada momento del tiempo ( $t$ ) con base en la información disponible en el momento  $t-1$ , y actualizar, con la información adicional disponible en el momento  $t$ , dichas estimaciones.

Dado las siguientes definiciones:

$z_i$  : Medida tomada en el tiempo  $i$ .

$v_i$  : Error de la medición  $i$ .

$\sigma_i^2$  : Varianza del error de la medición  $i$ .

$\hat{x}$  : Estimación del valor de la variable.

$p_i^2$  : Varianza del error de la estimación del instante  $i$ .

$e$  : Error de la estimación.

$K$  : Ganancia de Kalman.

$\bar{x}_{i/i-1}$  : Valor de un instante  $i$  calculado a priori.

$\bar{x}_{i/i}$  : Valor de un instante  $i$  calculado a posteriori.

$Q$  : Varianza del error de la predicción.

Basándose en medidas con un error no conocido y que tiene una relación lineal con la variable a estimar (ecuación 7), puede usarse el filtro de Kalman para obtener una buena estimación.

$$z_i = hx + v$$

*Ecuación 7. Medida del tiempo  $i$ .*

El filtro se basa en minimizar la suma de los cuadrados de los errores y así lograr la mínima varianza en el error de la estimación (ecuación 8).

$$J = \sum \left( z_i - \hat{x} \right)^2$$

*Ecuación 8. Mínima varianza.*

Para eso se debe derivar e igualar a cero la ecuación anterior.

Hay que tener en cuenta que los errores  $v_i$  tienen una varianza conocida  $\sigma_i^2$  y la media esperada es cero ( $E(v)=0$ ). Es decir, que se tiene una distribución Normal o Gaussiana, como la del ruido blanco.

### 2.3.7.2.1. Kalman estático

Ahora veamos como estimar el valor de una variable estática en el tiempo (por ejemplo, si queremos estimar el verdadero valor de una resistencia).

$\hat{x}_0$  tiene que ser conocido (dado por el fabricante por ejemplo), o es igual a la primer medida obtenida ( $z_0$  en este caso), también debe conocerse la varianza del error de la estimación.

Teniendo una estimación en cualquier tiempo  $i$  (u obtenida luego de  $i$  mediciones), podemos calcular una nueva estimación  $i+1$  con menor error a partir de una nueva medición. Esto se hace aplicando la ecuación 9:

$$\hat{x}_{i+1} = \hat{x}_i + K_{i+1} (z_{i+1} - h \hat{x}_i)$$

*Ecuación 9. Nueva estimación.*

donde, la ganancia de Kalman es calculada según la ecuación 10

$$K_{i+1} = \frac{h p_i^2}{h^2 p_i^2 + \sigma_{i+1}^2}$$

*Ecuación 10. Ganancia de Kalman.*

Para poder seguir agregando medidas también se debe actualizar el valor de  $p$  como se muestra en la ecuación 11:

$$p_{i+1}^2 = (1 - h K_{i+1}) p_i^2$$

*Ecuación 11. Actualización de la varianza.*

A continuación se presenta un ejemplo para su mejor comprensión.

Suponemos una resistencia de la cual tenemos la información del fabricante que su valor es 100 *ohm* con un error de 2 *ohm*. Es decir que como datos iniciales, sin ninguna medición tenemos:

$$\hat{x}_0 = 100$$

$$p_0^2 = 4$$

Luego, teniendo como elemento de medición un tester con una varianza de error de 1 *ohm* (es decir,  $\sigma_r^2 = 1$ ), podemos comenzar a tomar medidas y calcular nuevas estimaciones que tendrán mayor precisión. Entonces, las actualizaciones de los valores (véase ecuaciones 12 y 13) luego de una medición  $z_1$  serían:

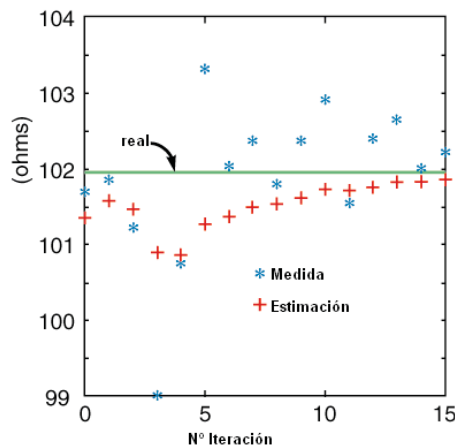
$$K_1 = \frac{hp_0^2}{h_2p_0^2 + \sigma_r^2} = \frac{1*4}{1*4+1} = \frac{4}{5}$$

*Ecuación 12. Actualización de la ganancia de Kalman.*

$$\hat{x}_1 = \hat{x}_0 + K_1(z_1 - h\hat{x}_0) = 100 + \frac{4}{5}(z_1 - 1*100)$$

*Ecuación 13. Nueva estimación.*

La figura 2 muestra como se suaviza la curva de los valores estimados y como se acerca al valor real luego de 15 iteraciones.



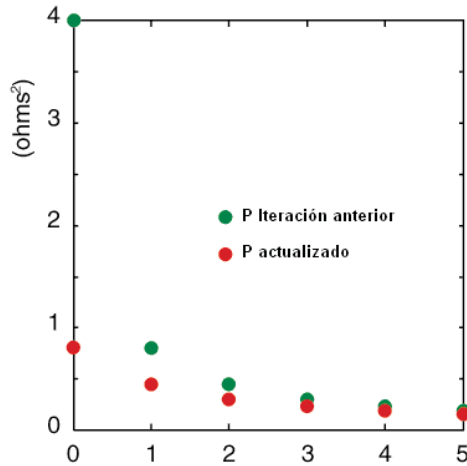
*Figura 2. Valor de la variable luego de 15 iteraciones.*

En la ecuación 14 se puede observar la actualización de la desviación estándar luego de incorporar la primera medida.

$$p_1^2 = (1 - K_0 h) p_0^2 = \left(1 - \frac{4}{5} * 1\right) * 4 = \frac{4}{5}$$

*Ecuación 14. Actualización de la varianza.*

La figura 3 muestra cómo la desviación estándar del error tiende a anularse luego de 5 iteraciones.



*Figura 3. Actualización de la desviación estándar.*

### 2.3.7.2.2. Kalman dinámico

Se llama Kalman dinámico a aquel sistema en el que el valor de nuestra variable  $x$  a estimar tiene un valor que cambia a través del tiempo ( $x_{i+1} \neq x_i$ ) pero estos estados tienen alguna relación conocida entre el instante  $i$  e  $i+1$ .

Por ejemplo, si medimos posición de un objeto se puede predecir que la posición siguiente será  $x_{i+1} = x_i + \Delta t * v_i$ , donde  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido y  $v_i$  la velocidad en el instante  $i$ . La posición puede ser obtenida por un GPS por ejemplo y la velocidad con un elemento adicional de medición como lo es un acelerómetro.

Ahora la ecuación 15 representa la nueva estimación:

$$\hat{x}_{i+1} = a \hat{x}_i + b u_i + q$$

*Ecuación 15. Nueva estimación.*

siendo  $q$  el error con una dispersión  $Q$ , y la ecuación 16 refleja la medición en el momento siguiente ( $i+1$ ).

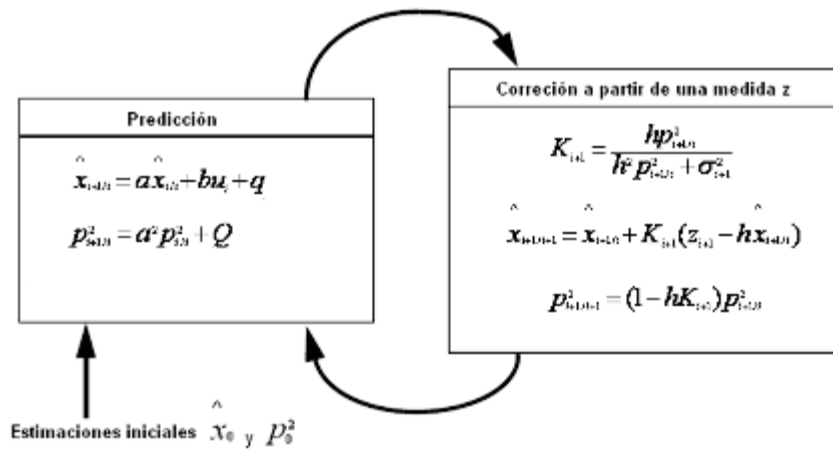
$$z_{i+1} = hx_{i+1} + v$$

*Ecuación 16. Medida del tiempo i+1.*

El nuevo proceso no consta sólo en tomar medidas y corregir con ellas, sino que antes hay que predecir el próximo valor y luego, con la medida del instante siguiente y la predicción realizar la corrección.

Dada una medición inicial  $z_0$ , consideramos  $z_0 = \hat{x}_0$  y  $P_0^2 = \sigma_0^2$ .

En la figura 4 se puede observar como es el flujo de datos del proceso.



*Figura 4. Flujo de datos del proceso.*

Continuando con el ejemplo anterior de la resistencia ahora podemos suponer que a través del tiempo el valor de la resistencia varía (ecuación 17), no conocemos cómo pero sabemos que la varianza del cambio es de 1/4. Es decir que, si suponemos que en un año tenemos el mismo valor que el año anterior tenemos un error con varianza 1/4 .

$$\hat{x}_{i+1/i} = \hat{x}_{i/i} + q$$

*Ecuación 17. Estimación para el tiempo i+1.*

Partiendo de  $\hat{x}_1$  calculado en el caso anterior junto con su correspondiente  $P_1^2$  podemos predecir el valor (ecuación 18) dentro de un año junto con su varianza (ecuación 19):

$$\hat{x}_{2/1} = \hat{x}_{1/1}$$

*Ecuación 18. Nueva estimación.*

$$p_{2/1}^2 = a^2 p_{1/1}^2 + Q = 1 * \frac{4}{5} + \frac{1}{4} = 1,05$$

**Ecuación 19.** Varianza actualizada.

Cuando se obtiene la nueva medida al pasar el año, se corrige esta estimación junto con la varianza de su error, obteniendo la nueva ganancia de Kalman como se ve en la ecuación 20:

$$K_2 = \frac{h p_{2/1}^2}{h_2 p_{2/1}^2 + \sigma_r^2} = \frac{1 * 1,05}{1 * 1,05 + 1} = 0,5121$$

**Ecuación 20.** Actualización de la ganancia de Kalman.

La ecuación 21 muestra la nueva estimación.

$$\hat{x}_{2/2} = \hat{x}_{2/1} + K_2 (z_2 - h \hat{x}_{2/1})$$

**Ecuación 21.** Nueva estimación.

La ecuación 22 denota cómo es la actualización de la varianza luego de obtenida la ganancia del filtro.

$$p_{2/2}^2 = (1 - h K_2) p_{2/1}^2 = (1 - 1 * 0,5121) * 1,05 = 0,5122$$

**Ecuación 22.** Actualización del valor de varianza.

Si este proceso se continúa a lo largo del tiempo, notando que la predicción nos aumenta el error de la estimación y luego con la medición lo disminuimos, se puede ver que el sistema se estabiliza y se obtienen:

$$p_{i+1/i}^2 = 0,65$$

$$p_{i+1/i+1}^2 = 0,4$$

La figura 5 muestra como se comporta la covarianza a través del tiempo.

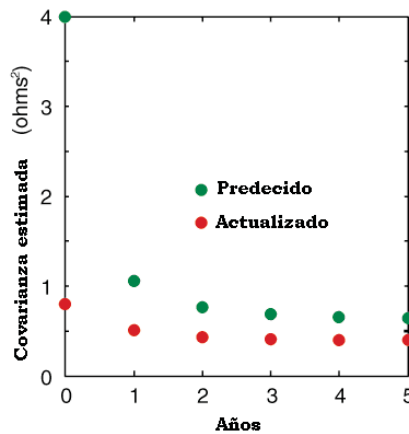


Figura 5. Evolución de la Covarianza.

Vale aclarar que tanto en el filtro estático como en el dinámico pueden tenerse en cuenta más de una variable.

#### 2.3.7.2.3. Filtro de Kalman extendido

En caso de que el sistema dinámico sea no lineal, es posible usar una modificación del algoritmo llamada "filtro de Kalman extendido" EKF, la cual linealiza el sistema en torno al  $\hat{x}(t)$  identificado realmente, para calcular la ganancia y la dirección de corrección adecuada. En este caso, en vez de haber matrices hay funciones  $f(x,u,w)$  y  $h(x,v)$  que entregan la transición de estado y la observación (la salida contaminada) respectivamente.

### 2.4. Sistemas de coordenadas

Un sistema de coordenadas permite ubicar un objeto en un espacio finito y puede ser referenciado por su posición relativa a los ejes. Cuando hablamos de posicionamiento en la corteza terrestre, podemos usar dos esquemas conceptuales:

1. Sistema de coordenadas geográficas: posicionando los ángulos que respecto del centro de la tierra se desvía el punto hacia norte-sur o este-oeste y
2. otro esquema (seguido por varios sistemas como el Mercator, el UTM y la cónica de Lambert) que se corresponden con posicionamientos mediante la proyección en una superficie plana de la superficie de la corteza terrestre.



### 2.4.1. Coordenadas geodésicas o geográficas

El sistema de coordenadas geográficas es un sistema de referencia que utiliza las dos coordenadas angulares, latitud (Norte y Sur) y longitud (Este y Oeste) y sirve para determinar los ángulos laterales de la superficie terrestre. La definición de un sistema de coordenadas geográficas incluye un datum, meridiano principal y unidad angular. Estas coordenadas se suelen expresar en grados sexagesimales:

1. La Latitud: es el ángulo formado entre la normal del punto en la superficie y el plano del Ecuador (figura 6 Izquierda) medida a lo largo del meridiano en el cual se encuentra. Las líneas de latitud se llaman paralelos y son círculos paralelos al ecuador en la superficie de la Tierra. El Ecuador se toma como línea de base, y le corresponde la Latitud de  $0^\circ$ . Todos los puntos que estén ubicados en el mismo paralelo, les corresponden la misma latitud. Todos aquellos que se encuentren al Sur del Ecuador, reciben la denominación Sur (S), con signo negativo; y aquellos que se encuentren al Norte del Ecuador, reciben la denominación Norte (N), con signo positivo. Por lo tanto, la Latitud varía siempre entre  $-90^\circ$  y  $+90^\circ$ . Los polos Norte y Sur tienen latitud  $90^\circ$  N y  $90^\circ$  S respectivamente. La distancia en kilómetros a la que equivale un grado depende de la latitud, a medida que la latitud aumenta disminuyen los kilómetros por grado.
2. La Longitud: es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich (figura 6 Derecha). El Meridiano de Greenwich se toma como la línea de base, y le corresponde la Longitud de  $0^\circ$ . Las líneas de longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos. Todos los puntos ubicados sobre el mismo meridiano, tienen la misma longitud. Aquellos puntos que se encuentren al Oriente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Este (E); y todos los puntos ubicados al Occidente del Meridiano de Greenwich, reciben la denominación Oeste (W). La Longitud varía desde los  $-180^\circ$  a los  $+180^\circ$ , mientras que los polos Norte y Sur no tienen Longitud.

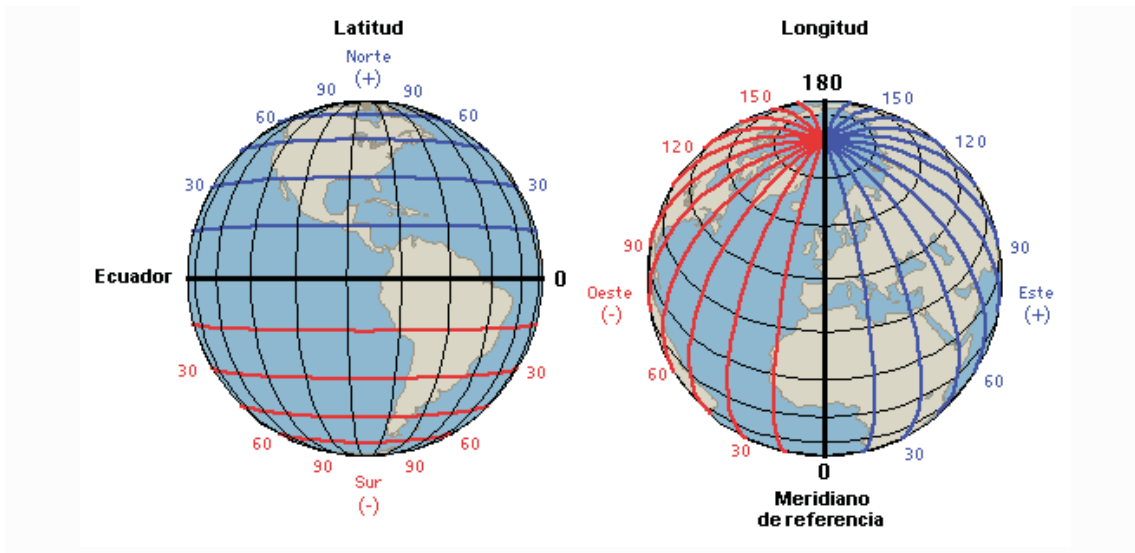


Figura 6. Latitud y Longitud.

Conociendo estos dos ángulos, es posible ubicar cualquier punto en la superficie terrestre. Basta con tomar el Ecuador, y a partir del Meridiano de Greenwich tomar un arco igual a la longitud. Sobre el extremo del arco dibujaremos el meridiano del lugar, sobre éste tomamos un arco que será igual a la latitud, así estaremos marcando un punto que corresponde a las coordenadas que conocemos.

### 2.4.2. Coordenadas Terrestres

Ubicar un punto en el espacio significa saber su posición, siendo entendida como la separación que existe entre el punto dado y los puntos o ejes de referencia predeterminados. Entonces, surge la necesidad de asignar dichas referencias de manera formal, lo que define un sistema de referencia. Hay muchas maneras diferentes de definir las referencias, principalmente en función del uso que se le dará, y es por esa razón que hay diferentes sistemas de referencia.

### 2.4.3. ECEF (Earth-Centered, Earth Fixed)

Es un sistema de coordenadas cartesianas como muestra la figura 7. Representa posiciones como coordenadas X, Y, Z. El punto (0,0,0) se define como el centro de masa de la tierra. Es muy utilizado en los sistemas de navegación satelital. Las características principales del sistema ECEF son:

- Utiliza coordenadas tridimensionales en los ejes X, Y, Z habitualmente expresadas en metros.
- Su centro es el centro de masa de la Tierra.

- El eje Z coincide con el eje de rotación medio (convencional) de la Tierra. El eje de rotación terrestre tiene pequeñas variaciones a lo largo del tiempo con respecto a la superficie de la Tierra (el polo norte geográfico se mueve).
- El eje X viene dado por la intersección entre el Meridiano de Greenwich y el plano que pasa por el centro de masas de la Tierra y es ortogonal al eje Z.
- El eje Y está definido por la dirección que es perpendicular a los dos ejes anteriores y su sentido es tal que:  $X \times Y = Z$ , es decir, Z es el producto vectorial de X e Y, y el sistema está orientado a derechas. La figura 7 representa el sistema ECEF.

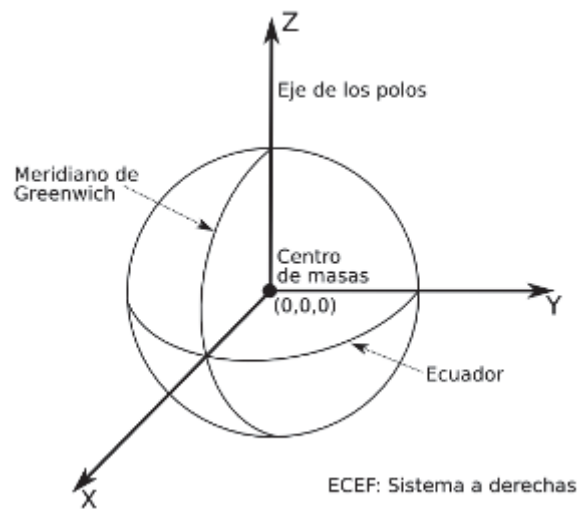


Figura 7. Sistema ECEF.

Debido a que estos parámetros pueden cambiar con el tiempo, los marcos de referencia habitualmente vienen asociados a su año de definición. Por ejemplo, el ITRF (International Terrestrial Reference Frame) tiene las versiones ITRF94, ITRF96, ITRF97, ITRF2000, ITRF2005 e ITRF2008.

Es conveniente ver a la Tierra como una esfera para hacer cálculos sencillos y aproximados pero tiene forma de elipsoide. Sin embargo, en la realidad la forma de la Tierra (figura 8) es más compleja: ligeramente achatada en los polos y abultada en el Ecuador, con el hemisferio sur un poco más voluminoso que el norte, y con la rugosidad propia que le da el relieve del terreno.

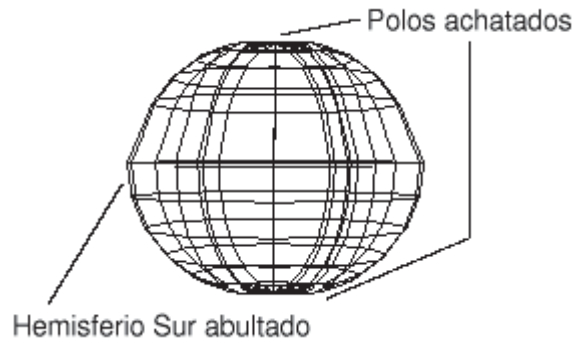


Figura 8. Forma general de la Tierra.

Algunas observaciones realizadas han mostrado que la Tierra se asemejaría a una pera, como muestra la figura 9.

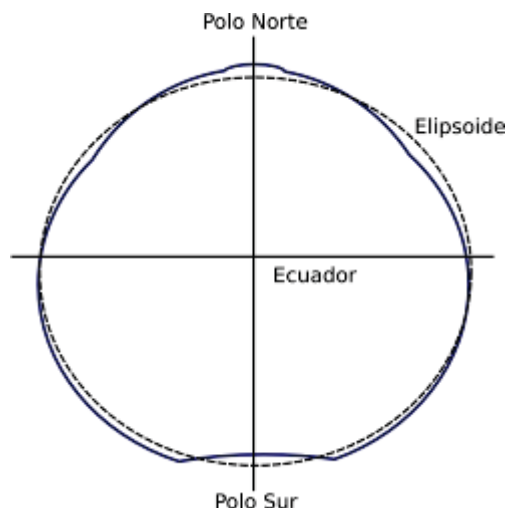


Figura 9. Forma de pera de la Tierra.

#### 2.4.4. El elipsoide

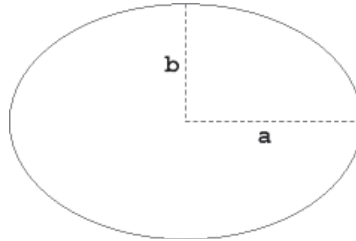
Pensar la forma de la Tierra como si fuera un elipsoide, sería más práctico, sin considerar las ondulaciones propias de la topografía. Esto se debe a que el elipsoide es una figura matemática fácil de usar que es muy parecida a la forma de la Tierra cuando se están trabajando con las coordenadas en el plano: Latitud y Longitud.

Existen diferentes modelos de elipsoides utilizados en geodesia, denominados elipsoides de referencia. Las diferencias entre éstos vienen dadas por los valores asignados a sus parámetros más importantes:

- Semieje ecuatorial ( $a$ ) o Semieje mayor: Longitud del semieje correspondiente al ecuador, desde el centro de masas de la Tierra hasta cualquier punto del ecuador. (Urrutia 2006)

- Semieje polar ( $b$ ) o Semieje menor: Longitud del semieje desde el centro de masas de la Tierra hasta uno de los polos. Alrededor de este eje se realiza la rotación de la elipse base.

La relación entre el eje ecuatorial y el polar se presenta en la figura 10.



**Figura 10.** Ejes de un elipsoide de revolución.

Es habitual describir matemáticamente a una elipse mediante la ecuación 23:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

**Ecuación 23.** Ecuación del elipsoide.

- Factor de achatamiento ( $f$ ): Este factor representa qué tan diferentes son los semiejes entre sí. Su expresión se ve en la ecuación 24:

$$f = 1 - \frac{b}{a}$$

**Ecuación 24.** Factor de achatamiento.

Mientras más cerca de cero se encuentre  $f$ , más parecido a una esfera es el elipsoide. Una manera equivalente de indicar  $f$  es mediante la excentricidad de la elipse transversal (ecuación 25):

$$e^2 = 1 - \frac{b^2}{a^2}$$

**Ecuación 25.** Excentricidad de la elipse.

Los valores de estos parámetros para algunos elipsoides de referencia importantes se presentan en la tabla 2.

Nombre	a (m)	b (m)	1/ f
<i>Australian National</i>	6378160.000	6356774.719	298.250000
<i>Bessel 1841</i>	6377397.155	6356078.963	299.152813
<i>Clarke 1866</i>	6378206.400	6356583.800	294.978698
<i>Clarke 1880</i>	6378249.145	6356514.870	293.465000
<i>Everest 1956</i>	6377301.243	6356100.228	300.801700
<i>Fischer 1968</i>	6378150.000	6356768.337	298.300000
<i>GRS 1980</i>	6378137.000	6356752.314	298.257222
<i>International 1924 (Hayford)</i>	6378388.000	6356911.946	297.000000
<i>SGS 85</i>	6378136.000	6356751.302	298.257000
<i>South American 1969</i>	6378160.000	6356774.719	298.250000
<i>WGS 72</i>	6378135.000	6356750.520	298.260000
<i>WGS 84</i>	6378137.000	6356752.314	298.257224

**Tabla 2.** Parámetros de elipsoides de referencia.

En la actualidad, uno de los elipsoides de referencia más utilizados es el descrito en el sistema WGS-84 (World Geodetic System), desarrollado por el Departamento de Defensa de los EEUU, y que tiene como origen el centro de la Tierra. Su popularidad se debe a que es el utilizado por el sistema global de navegación por satélite NAVSTAR-GPS.

El elipsoide WGS-84 define los parámetros para la Tierra indicados en la tabla 3.

Nombre	Símbolo	Valor	Nombre
<i>Semieje mayor de la elipse</i>	a	6378,137000 km	<i>Semieje mayor de la elipse</i>
<i>Semieje menor de la elipse</i>	b	6356,752314 km	<i>Semieje menor de la elipse</i>
<i>Factor de achatamiento</i>	$f = \frac{a-b}{a}$	1/298,257223563	<i>Factor de achatamiento</i>
<i>Velocidad angular de la Tierra</i>	$\omega_c$	$7292115 \cdot 10^{-11}$ rad/s	<i>Velocidad angular de la Tierra</i>

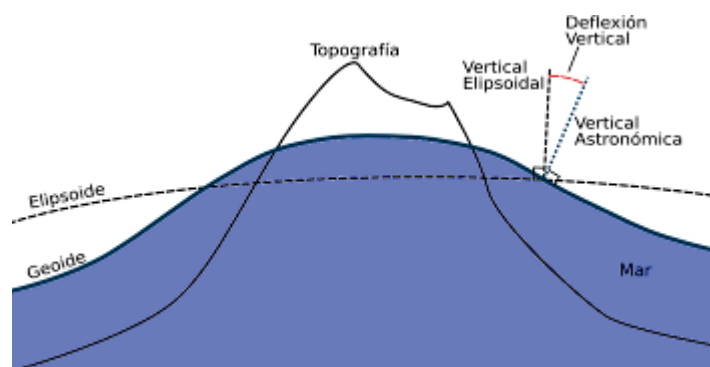
**Tabla 3.** Parámetros de la Tierra según WGS-84.

### 2.4.5. El geoide

Aún siendo una figura matemática sencilla, el elipsoide, no es adecuado cuando se desea medir altitudes. Dado que la mayor parte de la Tierra está cubierta por mares y océanos, la superficie de referencia para medir altitudes es el nivel medio del mar. Además, este nivel medio es una mejor aproximación a la forma real de la Tierra vista

desde el espacio que depende de las irregularidades en el campo gravitatorio de la Tierra, que alteran su posición. El agua de los océanos busca estar en equilibrio, y por ello tiende a seguir una superficie gravitatoria equipotencial. Por ello, se presenta el Geoide que se define como: La superficie equipotencial del campo gravitatorio de la Tierra que mejor se ajusta al nivel medio global del mar. Una de las consecuencias de esta definición es que el geoide es siempre perpendicular al vector de gravedad local en cada punto.

La figura 11 muestra una comparación entre el geoide y el elipsoide:



*Figura 11. Comparación entre el Geoide y el Elipsoide.*

Es fácil asociar el geoide al nivel medio del mar en las zonas oceánicas. Por otra parte, sobre los continentes lo que se hace es tomar medidas cuidadosas para extender el concepto a las zonas secas, lo que permite utilizar una referencia de alturas común y coherente.

Medir el geoide a nivel mundial es una tarea difícil, pues la corteza terrestre no es homogénea y por lo tanto su densidad no es uniforme, lo que altera la fuerza de gravedad en un punto dado. Asimismo, grandes masas de rocas (como cordilleras, montañas y volcanes) pueden alterar también el vector de gravedad local.

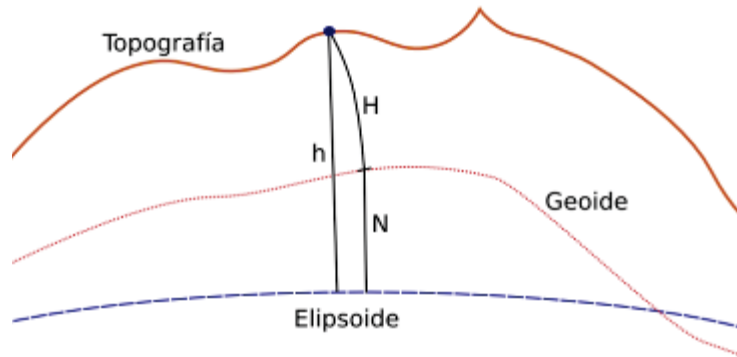
Si bien el geoide es una superficie compleja, es posible aproximarse a la expresión del potencial gravitatorio de la Tierra (de donde el geoide se deriva) mediante un desarrollo en serie en esféricos armónicos

Por otro lado, es posible relacionar matemáticamente al geoide y el elipsoide mediante la ecuación 26:

$$h = H + N$$

*Ecuación 26. Altura elipsoidal.*

Donde  $h$  es la altura elipsoidal (Freedden 2010) de un punto con respecto al elipsoide,  $N$  es la altura del geoide respecto al elipsoide y  $H$  es la altura del punto con respecto al geoide. La figura 12 muestra esta relación.



**Figura 12.** Relación entre el Geoide y el Elipsoide.

Tanto  $h$  como  $N$  son perpendiculares al elipsoide de referencia, mientras que  $H$  es la altura medida a lo largo de la línea de plomada (perpendicular al geoide).

Mediante esta relación, y con la ayuda de las series en esféricos armónicos mencionadas previamente, es posible escribir programas que aproximen los valores del geoide. Un ejemplo de ello es el proporcionado por la NGA donde se relaciona el geoide con el elipsoide WGS-84.

La tabla 4 presenta los valores de  $N$  (ondulación del geoide) para algunas ciudades del mundo.

Ciudad	N (m)
Barcelona	48,61
Berlín	39,79
Buenos Aires	14,34
Lahore	-43,60
Londres	47,37
Madrid	53,44
Quito	26,13
Seattle	-19,38
Singapur	7,03
Tel Aviv	17,30

**Tabla 4.** Ondulación del geoide para algunas ciudades.



Por lo tanto, las ecuaciones de navegación satelital pueden ser formuladas solamente después de tener establecido un sistema de coordenadas de referencia válido para ambos, satélite y receptor. Generalmente, los satélites y los receptores son individualizados por los vectores de posición y velocidad en un sistema de coordenadas cartesiano. Es necesario distinguir entre sistemas de coordenadas, sistemas de referencia y marcos de referencia.

## **2.5. Posicionamiento de un objeto**

Diferentes son las técnicas y metodologías para ubicar un objeto en un ambiente. El posicionamiento puede ser local o global, las técnicas empleadas en general son las mismas pero varían los sensores utilizados y la infraestructura. A continuación se enumeran algunas de las más utilizadas a criterio del autor.

### **2.5.1. Wi-Fi / Bluetooth**

Las redes inalámbricas de corto y mediano alcance son muy comunes en infinidad de lugares. Son usadas para transmitir datos de un nodo a otro y cualquier dispositivo es capaz de conectarse y compartir datos. La señal viaja a una determinada velocidad y sufre una pérdida de propagación, que es la cantidad de señal necesaria para llegar de un extremo a otro, es decir, la cantidad de señal que se pierde al atravesar un espacio. Las señales electromagnéticas se propagan por el medio a la velocidad de la luz. Incluso tienen la capacidad y habilidad de poder traspasar paredes, techos, puertas o casi cualquier obstáculo. Además, pueden colarse por los pequeños agujeros gracias al fenómeno conocido como difracción. En cualquier caso, unos obstáculos los pasa más fácilmente que otros. El hacer un cálculo teórico del alcance de una señal, considerando todos los posibles obstáculos, resulta complicado. Por lo tanto, lo mejor es llevar el cálculo al espacio sin obstáculos.

Conociendo la fuerza de la señal y por medio de triangulación se puede localizar un objeto (receptor o emisor Wi-Fi / Bluetooth) de manera local en un ambiente (Chen & Kobayashi 2002).

### **2.5.2. Encoders**

La medida de posiciones lineales y angulares ha sido hasta el momento un campo con abundantes desarrollos comerciales de sensores con salida digital. Ofrecen una señal codificada correspondiente a la posición de un elemento móvil, regla o disco, con

respecto a una referencia interna. Poseen varias pistas con zonas diferenciadas y están agrupadas de tal forma que el sistema de lectura obtiene directamente el número codificado que da su posición. Cada pista representa un bit de la salida, siendo la pista más interior la correspondiente al bit de mayor peso. Los más usados son los ópticos, tienen inmunidad frente a las interrupciones e interferencias electromagnéticas.

Las aplicaciones de los codificadores de posición son relativas a la medida y control de posiciones lineales y angulares de alta resolución. Se emplean así en robótica, grúas, válvulas hidráulicas, mesas de dibujo automáticas (plotters), máquinas-herramienta, posicionamiento de cabezales de lectura en discos magnéticos y de fuentes de radiación en radioterapia, radar, orientación de telescopios, etc. Son indicados en aplicaciones donde el elemento móvil permanece inactivo durante periodos de tiempo prolongados, también cuando se desea ahorrar energía ya que sólo hace falta alimentarlos cuando se desea información.

### **2.5.3. Láser RangeFinder**

Es un dispositivo que utiliza el rayo láser para determinar la distancia a un objeto. La forma más común que opera es mediante el principio de tiempo de vuelo mandando un pulso láser en un haz estrecho hacia el objeto de medición y midiendo el tiempo que le tomó al pulso ser reflejado por el objeto. Debido a la alta velocidad de la luz, esta técnica no es apropiada para mediciones submétricas de alta precisión, donde la triangulación y otras técnicas son usadas.

### **2.5.4. Óptico (Fotodiodos)**

El más simple fotodiodo es una unión p-n polarizada inversamente. Cuando la luz no incide sobre el dispositivo sólo una pequeña cantidad de corriente fluye (corriente de oscuridad). Cuando la luz incide, se generan portadores y fluye una mayor corriente eléctrica. Un fotodiodo típico trabaja en la región del infrarrojo cercano. Son dispositivos de alta impedancia y operan a bajas corrientes (corriente de oscuridad de 10  $\mu\text{A}$  y hasta 100  $\mu\text{A}$  con iluminación). Estos dispositivos presentan una respuesta lineal que se incrementa con la iluminación, y generalmente presentan una muy rápida respuesta en el tiempo.

Los fotodiodos se emplean no sólo en comunicaciones ópticas y fotómetros, sino también para control de iluminación y brillo, control remoto por infrarrojos, monitorización de llamas de gas y de petróleo (radiación ultravioleta centrada en los

310 nm), enfoque automático y control de exposición en cámaras. Combinados con una fuente de luz se utilizan en codificadores de posición, medidas de distancia, espesor, transparencia y posición, como detectores de proximidad y de presencia. Los sensores de color se emplean para inspección y control de calidad. Las agrupaciones de sensores se aplican al reconocimiento de formas, manipulación de papel, lectoras de tarjetas codificadas y codificadores de posición.

### **2.5.5. Ultrasonido**

Los ultrasonidos son una radiación mecánica de frecuencia superior a las audibles (unos 20 Khz). Toda radiación, al incidir sobre un objeto, en parte se refleja, en parte se transmite y en parte es absorbida. Si además, hay un movimiento relativo entre la fuente de radiación y el reflector, se produce un cambio en la frecuencia de la radiación (efecto Doppler). El poder de penetración de las radiaciones permite que muchas de estas aplicaciones sean totalmente no invasivas. Las medidas invasivas son de interés cuando el medio es explosivo, radiactivo, etc. y cuando se desea evitar su contaminación. Cuando en un punto de un medio elástico se produce una deformación, la misma se propaga a los puntos próximos. La velocidad con que se propaga la perturbación de unos a otros puntos depende del medio pero no de la frecuencia.

Las aplicaciones de los ultrasonidos a la medida de magnitudes físicas están normalmente relacionadas con su velocidad, su tiempo de propagación y, en algunos casos, con la atenuación o interrupción del haz propagado. Una de las aplicaciones más extendidas son los caudalímetros ultrasónicos. La mayoría emplean cerámicas piezoeléctricas o polímeros como generadores y receptores. En aplicaciones basadas en el tiempo de propagación, se mide el tiempo que tarda en recibirse el eco debido a un objeto presente en el camino de propagación de la radiación. El objeto puede ser líquido, sólido, granular o polvo, y con cualesquiera propiedades ópticas y eléctricas. La única restricción es que el objeto y el medio en que se propaguen los ultrasonidos deben tener una impedancia acústica muy diferente, para que la mayor parte de la radiación se refleje. Si se desea tener un gran alcance y reducir las interferencias es importante que el haz emitido sea estrecho. El ruido es menor a alta frecuencia, pero la atenuación de la radiación también aumenta con la frecuencia.

Los detectores de proximidad basados en ultrasonidos se emplean para distancias de 0.25 a 13 metros. Son susceptibles al ruido acústico y al viento. La resolución y exactitud es menor que en detectores ópticos, pero son más robustos, compactos, fiables

y baratos. Se emplean para enfoques automáticos en cámaras fotográficas y de video, para evitar colisiones entre vehículos guiados automáticamente y para medir distancias y grosor en robots.

### **2.5.6. Navegación Inercial**

La idea principal de la navegación inercial (también conocida como navegación Newtoniana) proviene de la física: “La segunda integral de la aceleración es la posición”. Teniendo sensores que pueden medir los tres componentes de aceleración en el tiempo, y los valores iniciales de la posición y velocidad, la aproximación podría ser relativamente buena.

### **2.5.7. Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)**

De manera general un sistema de posicionamiento satelital es aquél que utiliza satélites para ubicar un receptor en tierra basado en técnicas de triangulación y medición de retardo de la señal (Gleason & Gebre-Egziabher 2009). Los satélites de los GNSS transmiten señales mediante las cuales los receptores pueden obtener dos tipos de medidas. Las medidas de pseudo distancia con las cuales los receptores pueden calcular su posición con una precisión de metros. Por otro lado, las medidas de fase de la portadora con las cuales la precisión de la posición puede ser de centímetros.

#### **2.5.7.1. Historia**

En 1957, cuando la Unión Soviética lanzó el SPUTNIK I con el propósito de que navegara en forma satelital, se inició la evolución tecnológica espacial. Este hecho generó una sucesión de adelantos técnicos y funcionales que se basaron fundamentalmente en la propiedad de que un satélite artificial tuviera un radio de cobertura sobre el planeta. Por este motivo, los satélites son elementos adecuados para efectuar comunicaciones y tienen muchas aplicaciones en el campo civil y militar.

Para proveer a los sistemas de navegación de sus flotas, las observaciones de posiciones actualizadas y precisas, la Armada estadounidense aplicó esta tecnología. Así surgió el sistema TRANSIT, que quedó operativo en 1964, y hacia 1967 estuvo disponible, además, para uso comercial.

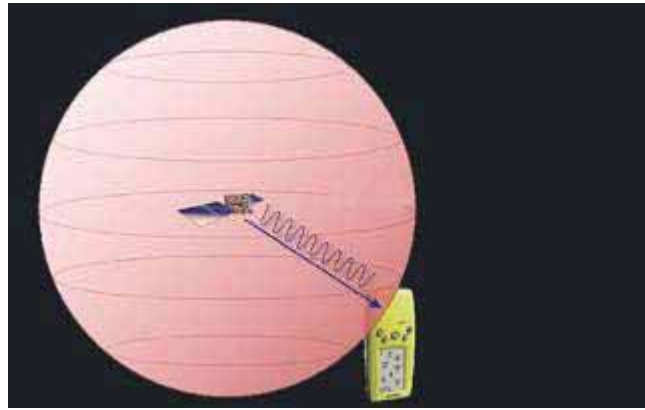
En ese momento, las actualizaciones de posición se encontraban disponibles cada 40 minutos y el observador debía permanecer casi estático para poder obtener una información válida y adecuada. Posteriormente, en esa misma década y gracias al desarrollo de los relojes atómicos, se diseñó una constelación de satélites, portando cada

uno de ellos, cuatro de estos relojes y estando todos sincronizados con base en una referencia de tiempo determinada. Según la bibliografía indagada, de los cuatro relojes dos son de cesio y dos de rubidio (Love 1994). El error acumulado de estos relojes suele ser de 1 nanosegundo cada 3 horas. Este error transmitido hasta los receptores GPS en Tierra daría lugar a un error en la medida de la distancia de 30 cm. Para evitar que esto ocurra los cuatro relojes atómicos de los satélites son controlados desde la estación de control en Tierra y comparados con el reloj maestro de referencia, que es una combinación del tiempo proporcionado por 10 relojes atómicos muy precisos. (Olmedillas 2012)

En 1973, se combinaron los programas de la Armada y de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos y surgió lo que se conoció como Navigation Technology Program, posteriormente renombrado como NAVSTAR-GPS.

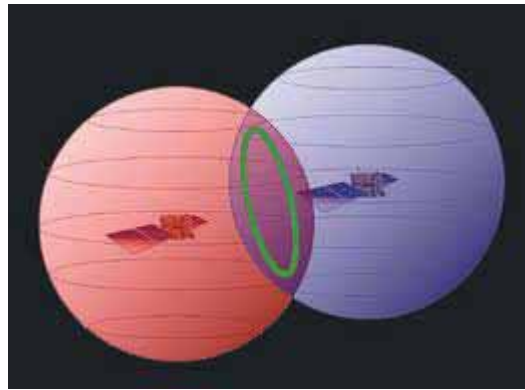
### **2.5.7.2. Funcionamiento**

La radionavegación por satélite se basa en el cálculo de una posición sobre la superficie terrestre midiendo las distancias a los satélites (Xu 2007). El estado y ubicación de los satélites es conocido por el receptor basado en las efemérides, parámetros que son transmitidos por ellos mismos. El receptor funciona midiendo su distancia a los satélites, y usa esa información para calcular su posición. Esta distancia se mide calculando el tiempo que la señal tarda en llegar al receptor. Conocido ese tiempo basado en el hecho de que la señal viaja a la velocidad de la luz, se puede calcular la distancia entre el receptor y el satélite. La posición del satélite se transmite en un mensaje de datos que se superpone con un código que genera el receptor y que sirve como referencia de la sincronización. Cada satélite indica que el receptor se encuentra en un punto en la superficie de la esfera, con centro en el propio satélite y de radio la distancia total hasta el receptor (figura 13).



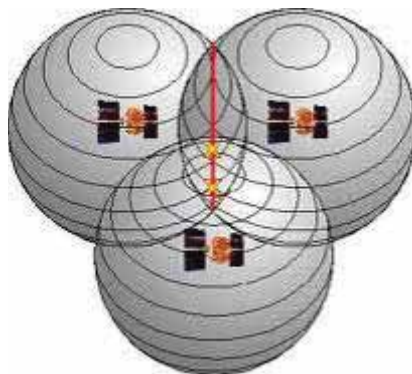
**Figura 13.** Circunferencia con centro en un satélite.

Obteniendo información de dos satélites se asume que el receptor se encuentra sobre la circunferencia que resulta cuando se intersectan las dos esferas, como muestra la figura 14.



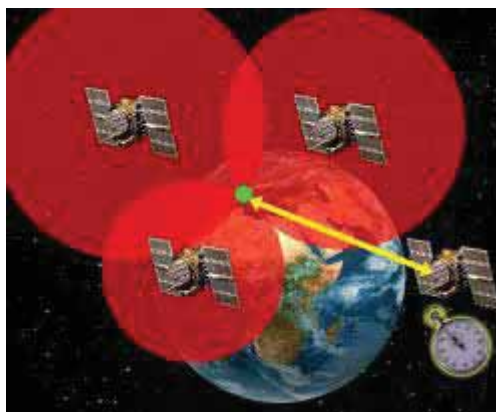
**Figura 14.** Circunferencia formada por las dos esferas con centro en los dos satélites.

Si se adquiere la misma información de un tercer satélite se nota que la nueva esfera sólo corta la circunferencia anterior en dos puntos como se observa en la figura 15 representados ambos por las cruces amarillas. Uno de ellos se puede descartar porque ofrece una posición absurda. De esta manera se obtendría una posición en 3-D. (Grewal *et al.* 2007)



**Figura 15.** Puntos de intersección de las esferas con centro en los tres satélites.

Sin embargo, dado que el reloj que incorporan los receptores no está sincronizado con el reloj atómico de los satélites, los dos puntos determinados no son precisos. Teniendo información de un cuarto satélite, se elimina el inconveniente de la falta de sincronización entre los relojes de los receptores y de los satélites. Por lo tanto, en este momento el receptor puede determinar una posición 3-D (latitud, longitud y altitud) como muestra la figura 16.



*Figura 16. Cuarto satélite que sincroniza los relojes.*

Al no estar sincronizados los relojes entre el receptor y los satélites, la intersección de las cuatro esferas con centro en estos satélites es un pequeño volumen en vez de ser un punto (Maini & Agrawal 2010). La corrección consiste en ajustar la hora del receptor de tal forma que este volumen se transforme en un punto.

Los receptores de navegación por satélite reducen los errores usando combinaciones de señales de múltiples satélites y correlaciones múltiples, utilizando técnicas como filtros de Kalman para combinar los datos parciales, afectados por ruido y en constante cambio (Kalman 1960), en una sola estimación de posición, tiempo y velocidad.

La precisión de las mediciones de distancia determina la exactitud de la ubicación final. La precisión de la posición depende de la exactitud de la información de tiempo. Sólo los cronómetros atómicos proveen la precisión requerida, del orden de nanosegundos ( $10^{-9}$  s). Para ello el satélite utiliza cuatro relojes atómicos para estar sincronizado con todos los satélites en la constelación. Estos cronómetros constituyen un elemento tecnológico fundamental a bordo de los satélites que conforman las constelaciones GNSS y pueden contribuir a definir patrones de tiempo internacionales.

En el diseño de la constelación de satélites se hace hincapié en la selección del número de estos y a sus órbitas, para que siempre estén visibles una cantidad suficiente desde cualquier lugar del mundo y así asegurar la disponibilidad de la señal y la precisión.

### **2.5.7.3. Aplicaciones**

La tecnología de navegación por satélite es usada ampliamente en aplicaciones militares y civiles. La aviación ha propulsado el uso de los GNSS y varios sistemas de aumentación (WAAS, EGNOS, GAGAN, MSAS). Estos sistemas proveen asistencia en fases de precisión de vuelo. El lanzamiento de naves espaciales utiliza también navegación por satélite en todas las fases de operación (lanzamiento en tierra, en órbita y reentrada, y aterrizaje). En la marina, GNSS ha sido usado tanto de manera comercial como para recreación. La navegación ha mejorado en todos los lugares con agua, desde el viaje oceánico hasta en los ríos, especialmente con mal tiempo. En cuanto al terreno, la comunidad topográfica depende fuertemente del DGPS para alcanzar precisiones de medición en el rango decímetros, para una estación DGPS fija, y de milímetros para posicionamiento relativo con procesamiento complejo. Técnicas similares son usadas en agricultura, minería de superficies, y clasificación para control de vehículos en tiempo real y en la comunidad de transporte para obtener la ubicación de algún servicio de transporte de pasajeros. GNSS es un factor clave en sistema de transporte inteligente. En aplicaciones para vehículos es usado para guiar, seguir, y administrar flotas. Combinando un teléfono celular o un canal de comunicaciones con este sistema, permite rastrear vehículos y asistir al servicio de emergencia. Usado también para sistemas de información geográfica, mapeo y agricultura donde las aplicaciones incluyen funcionalidad y mapeo automático con sensado remoto y fotogrametría. Últimamente, GIS, GPS y sensado remoto han madurado lo suficiente para ser usado en agricultura. Empresas de GIS han desarrollado aplicaciones que permiten a los productores evaluar las condiciones del campo y su relación. Se están desarrollando aplicaciones de cinemática de tiempo real (RTK) y GPS diferencial (DGPS) para agricultura de precisión. Esto incluye muestreo de suelos, seguimiento, aplicación de fertilizantes y químicos. Otra área de aplicación donde se ha empezado a usar es en el deporte, por ejemplo parapente, ala delta, planeadores, etc. En el rescate, para tareas de salvamento y localización de enfermos. (Maini & Agrawal 2010)

### **2.5.7.4. Vulnerabilidades de los sistemas de posicionamiento por satélite**

La posibilidad de ser interferida la señal, es la vulnerabilidad más notable de los GNSS. Existen varias fuentes interferencia, tanto dentro de la banda como fuera de ésta, particularmente por enlaces de microondas terrestres punto a punto permitidos por



varios estados (1559 – 1610 MHz). Estos enlaces se irán eliminando gradualmente entre los años 2005 y 2015. Las señales de los sistemas GNSS son vulnerables debido a la potencia relativamente baja de la señal recibida, pues provienen de satélites y cada señal cubre una fracción significativamente grande de la superficie terrestre.

En aviación, las normas y métodos recomendados (SARPS) de la OACI para los GNSS exigen un nivel de rendimiento específico en presencia de niveles de interferencia definidos por la máscara de interferencia del receptor. La interferencia de niveles superiores a la máscara puede causar pérdida de servicio pero no se permite que tal interferencia resulte en información peligrosa o que induzca a error.

#### **2.5.7.5. Interferencia involuntaria**

Las consecuencias operacionales de una interferencia involuntaria, varían con el medio y no se consideran una amenaza importante siempre y cuando los estados ejerzan el control y protección adecuados del espectro electromagnético, tanto para las atribuciones de frecuencias existentes como para las nuevas. La introducción de nuevas señales GNSS en nuevas frecuencias asegurará que la interferencia no intencional no provoque la pérdida completa del servicio, aunque experimente cierto deterioro en su rendimiento.

La experiencia con la instalación del GNSS ha permitido identificar varias fuentes de interferencia involuntaria. Se ha determinado que la mayor parte de los casos de interferencia de GNSS notificados proviene de los sistemas de abordó. Los dispositivos electrónicos portátiles también pueden causar interferencia a los GNSS y a otros sistemas de navegación.

Actualmente, las fuentes terrestres de interferencia incluyen las comunicaciones VHF móviles y fijas, enlaces de radio punto a punto en la banda de frecuencias GNSS, armónicas de estaciones de televisión, ciertos sistemas de radar, sistemas de comunicaciones móviles por satélite y sistemas militares. Las ciudades grandes con fuentes considerables de interferencia de radiofrecuencias (RF), los sitios industriales, etc., son más propensos a la interferencia involuntaria que las regiones remotas, donde esta interferencia es muy poco factible. La probabilidad de esa interferencia depende de la reglamentación estatal del espectro, de la administración de frecuencias y de su cumplimiento en cada estado o región.

### **2.5.7.6. Interferencia intencional**

Las señales de los GNSS pueden bloquearse con transmisores de baja potencia debido justamente a su poca potencia. Aunque no se han registrado casos de bloqueo intencional dirigido a aeronaves civiles, la obstrucción intencional de la señal debe considerarse y evaluarse como una amenaza. La magnitud del impacto potencial puede aumentar conforme el GNSS tenga más aplicaciones y se dependa más de este sistema.

El *spoofing* (la interferencia por simulación de señales) es la corrupción intencional de señales de navegación para que la aeronave desvíe su trayectoria de vuelo. La simulación de señales de GNSS por satélite es tecnológicamente mucho más compleja que la simulación de radioayuda. Aunque la interferencia por simulación de señales teóricamente puede inducir a una aeronave determinada a errores de navegación, es muy probable que se detecte con procedimientos normales. Los sistemas de advertencia de proximidad del terreno (GPWS) y anticolidión de a bordo (ACAS) dan protección adicional contra colisiones con el terreno y con otras aeronaves. En vista de la dificultad de interferir por simulación con los GNSS, no se consideran necesarias medidas operacionales singulares para mitigarla.

### **2.5.7.7. Efectos ionosféricos y otros efectos atmosféricos**

Las precipitaciones fuertes atenúan, en una pequeña fracción de decibeles, las señales de satélite GNSS. Los efectos troposféricos se tratan mediante el diseño del sistema y no representan un aspecto de vulnerabilidad. Hay dos fenómenos ionosféricos que sí deben considerarse:

- Cambios ionosféricos rápidos y grandes. Cerca del ecuador geomagnético se observan frecuentemente cambios rápidos y grandes en la ionosfera, pero su efecto no es lo suficientemente grande como para afectar las operaciones en ruta ni las de aproximaciones que no son de precisión. Deben tenerse en cuenta en el diseño del sistema dado que se pueden mitigar con el uso de sistemas de aumentación por satélite (SBAS), basados en tierra (GBAS) y los basados en aeronave (ABAS).
- El centelleo ionosférico. En las latitudes medias es insignificante pero en las regiones ecuatoriales, y en menor grado en las altas latitudes, puede causar la pérdida temporal de las señales de uno o más satélites. La experiencia operacional en las regiones ecuatoriales ha demostrado que la probabilidad de pérdida del servicio GNSS actual es poca debido al número relativamente

grande de satélites a la vista. El centelleo puede interrumpir la recepción de las radiodifusiones de los satélites de órbita geoestacionaria del SBAS, pero es poco probable que provoque la pérdida completa del servicio GNSS.

#### **2.5.7.8. Otras vulnerabilidades**

También es necesario considerar las vulnerabilidades de los segmentos terrestre y espacial del GNSS. Existe el riesgo de tener un número insuficiente de satélites en una constelación dada debido a la falta de recursos para mantenerla, fallos en los lanzamientos o de fallos en el satélite. Un fallo del segmento de control de la constelación o un error humano pueden llegar a causar la falla de múltiples satélites de una constelación.

Otro riesgo es la interrupción del servicio o su degradación durante una situación de estado de emergencia nacional. Los países que proveen señales para la navegación por satélite pueden negar su disponibilidad, es lo que se denomina disponibilidad selectiva. El propietario de un sistema de navegación por satélite tiene la capacidad de degradar o eliminar servicios basados en los satélites de la navegación sobre cualquier territorio que desee. Así, si la navegación por satélite se convierte en un servicio esencial, los países sin sus propios sistemas de navegación por satélite se convertirán en clientes de los estados que provean estos servicios.

En el caso del tráfico aéreo si la denegación de señal es regional, se bloquearían todas las señales civiles de GNSS y el espacio aéreo afectado estaría cerrado al tránsito aéreo civil.

Otra situación menos probable sería la degradación o denegación de las señales de los satélites principales o de los satélites de aumento en toda el área de cobertura.

En la evaluación de los riesgos operacionales relacionados con las vulnerabilidades del GNSS hay que considerar dos aspectos principales:

- La probabilidad de interrupción del GNSS.
- El efecto de la interrupción.

Al considerar estos aspectos en función del espacio aéreo, los proveedores de servicios de navegación aérea pueden determinar si se necesita mitigarlos y, de ser así, a qué nivel. Se requiere mitigación para las interrupciones que tengan efectos importantes y probabilidades de ocurrir de moderadas a altas.

Las nuevas señales y constelaciones principales de satélites reducirán considerablemente la vulnerabilidad del GNSS. La utilización de señales más fuertes y

las frecuencias diversas planeadas para el GPS, el GLONASS y Galileo eliminarán efectivamente el riesgo de interferencia involuntaria, pues es muy poco probable que una fuente de tal interferencia afecte simultáneamente a más de una frecuencia.

Más satélites eliminarán el riesgo de interrupciones completas del GNSS debidas al centelleo y la multiplicidad de frecuencias mitigará el efecto de los cambios ionosféricos. Los futuros satélites geoestacionarios mitigarán el efecto de la ionosfera en el SBAS usando satélites cuyas líneas visuales estén separadas cuando menos a 45°.

Las señales más robustas y las nuevas frecuencias del GNSS hacen más difícil interferir intencionalmente con todos los servicios GNSS. Más constelaciones principales de satélites reducen el riesgo de falla del sistema, de errores operacionales o de interrupciones de servicio. También pueden seguir proporcionando servicio mundial en el caso que el proveedor de un elemento de GNSS modifique o deniegue el servicio.

La administración y una fuerte financiación del sistema son esenciales para la operación continua de los servicios GNSS y para mitigar las vulnerabilidades del sistema mencionadas, excepto la posible interrupción global del servicio debida a una emergencia nacional. Un medio efectivo de mitigar la vulnerabilidad de interrupción global es que los proveedores de servicios adopten una política de denegación regional en caso de emergencia nacional.

#### **2.5.7.9. NAVSTAR GPS (NAVigation System Timing and Ranging - Global Positioning System)**

Es un Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) que permite determinar la posición de un objeto, una persona, un vehículo o una aeronave, con una precisión hasta de centímetros usando DGPS (GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros.

El sistema fue desarrollado e instalado, y actualmente operado, por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, aunque su invención se atribuye a los gobiernos francés y belga.

Los satélites NAVSTAR se comenzaron a lanzar en 1978 y fueron divididos en tres bloques. El principio de funcionamiento del sistema GPS está basado en la tecnología de satélites. La técnica usada principalmente es la de medir rangos de distancia entre el receptor y los satélites.

El sistema GPS tiene múltiples utilidades y su arquitectura se divide en tres segmentos: el segmento espacial, el de control y el de usuario (Clarke 1998). El primero se

compone de 24 satélites a más de 20 mil kms de distancia de la tierra, divididos en 6 planos orbitales y el período de cada satélite es de alrededor de 12 horas. En el segundo segmento se encuentran las estaciones terrestres distribuidas por el planeta que controlan que los satélites no desvíen su trayectoria. Por último, en el segmento de usuario, se encuentran los receptores GPS que en general utilizan dos frecuencias: L1 a 1575,42 Mhz y L2 a 1227,60 Mhz (Feldmann *et al.* 2009). Existen receptores mono y multifrecuencia.

La precisión en el plano horizontal es de alrededor de 15 metros el 95% de las lecturas. Algunos receptores tienen más tendencia a seleccionar los satélites por debajo de los 45° de elevación con respecto al horizonte a fin de mejorar la precisión horizontal a costa de degradar la precisión vertical (Correia 2002). A veces es más preciso pero depende de una variedad de factores que van desde el desvío o retraso de la señal provocado por la atmósfera, el rebote de la señal, baja precisión de los relojes y ruidos en el receptor. En el plano vertical la precisión se reduce al 50% con respecto al horizontal (Featherstone 2004).

Cuando se desea determinar la posición, el receptor que se utiliza para ello localiza automáticamente como mínimo tres satélites de la red, de los que recibe unas señales indicando la posición y el reloj de cada uno de ellos. Con base en estas señales, el dispositivo sincroniza el reloj del GPS y calcula el retraso de las señales; es decir, la distancia al satélite. Por triangulación calcula la posición en que éste se encuentra. La triangulación en el caso del GPS, a diferencia del caso 2-D que consiste en averiguar el ángulo respecto de puntos conocidos, se basa en determinar la distancia de cada satélite respecto al punto de medición. Conocidas las distancias, se determina fácilmente la propia posición relativa respecto a los cuatro satélites. Conociendo además las coordenadas o posición de cada uno de ellos por la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta o coordenada real del punto de medición. También se consigue una exactitud extrema en el reloj del GPS, similar a la de los relojes atómicos que llevan a bordo cada uno de los satélites.

#### ***2.5.7.9.1. Fiabilidad de los datos***

Debido al carácter militar del sistema GPS, el Departamento de Defensa de los EE.UU. se reservaba la posibilidad de incluir un cierto grado de error aleatorio, que podía variar de los 15 a los 100 metros. La llamada disponibilidad selectiva (S/A) fue eliminada el 2 de mayo de 2000. Aunque actualmente no aplique tal error inducido, la precisión

intrínseca del sistema GPS depende del número de satélites visibles en un momento y posición determinados. Con un elevado número de satélites captados (7, 8 o 9 satélites), y si éstos tienen una geometría adecuada (están correctamente dispersos), pueden obtenerse precisiones inferiores a 2,5 metros en el 95% del tiempo. Si se activa el sistema DGPS llamado SBAS (WAAS-EGNOS-MSAS), la precisión mejora siendo inferior a un metro en el 97% de los casos. Estos sistemas SBAS no aplican en Sudamérica, ya que esta parte del mundo no cuenta con este tipo de satélites geostacionarios (Rao 2010). Aún recibiendo datos de satélites geostacionarios, no es posible mejorar la precisión por la falta de estaciones terrestres que en esta región no hay instaladas.

### 2.5.7.9.2. Fuentes de error

La falta de precisión en el sistema GPS se debe principalmente a la distorsión de la señal en la ionosfera, lo que introduce retrasos de propagación que hacen que el satélite parezca estar más lejos que lo que realmente está. El GPS normalmente tiene una precisión de 15 metros, aunque según la electrónica la señal puede ser buena hasta 3 metros de precisión. De los 12 metros restantes, 5 se deben a la distorsión ionosférica. Otros 3 o 4 metros son producidos por errores en la información de efemérides de los satélites, la cual es usada para calcular las posiciones de los satélites, y por las derivas de los relojes atómicos internos del satélite.

La posición calculada por un receptor GPS requiere el instante actual, la posición del satélite y el retraso medido de la señal recibida. La precisión es dependiente de la posición y del retraso de la señal. Los errores en las electrónicas son una de las varias razones que perjudican la precisión. En la tabla 5 se presentan las fuentes de error y su efecto correspondiente.

Fuente	Efecto (metros)
Arribo de la señal C/A	± 3
Arribo de la señal P(Y)	± 0.3
Ionosfera	± 5
Efemérides	± 2.5
Reloj Satelital	± 2
Distorsión multipath	± 1
Troposfera	± 0.5
Errores numéricos	± 1

**Tabla 5.** Fuente de errores del sistema NAVSTAR- GPS.

**Arribo de la señal C/A y P(Y)** : Para medir el retraso, el receptor compara la secuencia de bits recibida desde el satélite con una versión generada internamente. Mediante la comparación de la salida y la llegada de las transiciones de los bits, la electrónica más moderna puede medir el desplazamiento de la señal hasta un uno por ciento del ancho del pulso del bit con lo cual la resolución es de 10 nanosegundos aproximadamente para el código C/A. Dado que la señal GPS se propaga a la velocidad de la luz, esto representa un error de 3 metros. En cambio, si se usa el código P(Y) que permite obtener mayor precisión, asumiendo el mismo uno por ciento del ancho del pulso de precisión, esta señal tiene una precisión de 30 centímetros.

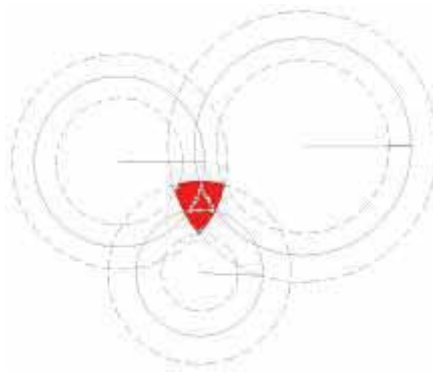
**Ionosfera y troposfera:** La señal de GPS viaja a través de partículas cargadas por la ionosfera y luego atraviesa vapor de agua en la troposfera en donde pierde algo de velocidad, creando un efecto similar al error de precisión en los relojes. Se puede mitigar prediciendo cuál sería el error en un día promedio, lo cual es muy difícil. Esto se puede ser útil, pero las condiciones atmosféricas no siempre se ajustan al promedio. Otra forma de manejarse con estos errores provocados por la atmósfera (sólo para la ionosfera) es tomar dos señales de los satélites y comparar su velocidad relativa. Este sistema se llama de “doble frecuencia” y es posible solamente en GPS muy avanzados o de uso militar. La troposfera no es un medio dispersivo para las frecuencias del GPS. Los efectos de la troposfera sobre la transmisión de señales GPS son independientes de la frecuencia de trabajo. (Xu 2007)

**Efemérides:** Una efemérides es una tabla de valores donde se almacenan las posiciones de los objetos astronómicos en el cielo. Esta información cambia frecuentemente y es actualizada por las estaciones de seguimiento de la tierra. Los parámetros orbitales de los satélites se van actualizando a medida que su movimiento se ve alterado por la atracción del sol y la luna, la diferencia de gravedad entre distintas zonas de la corteza terrestre, viento solar, etc. Las efemérides transmitidas, son calculadas por el sistema oficial de control de GPS en base al rastreo de todos los satélites, y resultan de la extrapolación de las órbitas ajustadas para que los usuarios puedan disponer de las posiciones de los satélites en tiempo real. La precisión de estas efemérides es de algunos metros. Las efemérides precisas son calculadas por el Servicio GNSS Internacional (IGS) y son accesibles posteriormente por Internet con una demora del orden de 1 día.

Estas órbitas tienen una precisión de pocos centímetros y resultan del ajuste de un arco observado y no de una predicción.

**Distorsión multipath:** Este error es muy difícil de detectar y en ocasiones es imposible de evitar. Es causado por la reflexión de las señales en superficies próximas al receptor y pueden interferir o producir errores en las señales que llegan directamente desde los satélites al receptor.

**Reloj Satelital:** Al no estar sincronizados los relojes entre el receptor y los satélites, la intersección de las cuatro esferas con centro en estos satélites es un pequeño volumen en vez de ser un punto. Esto se debe a que ya no se tiene un radio exacto. En 2-D con tres satélites en vez de cuatro (como sería necesario para 3-D) se representaría como muestra la figura 17:



*Figura 17. Intersección de las esferas de tres satélites en 2D.*

### **2.5.7.9.3. Dilución de la precisión (DOP)**

Además de los errores, se calcula la dilución de precisión (DOP) como un índice de desempeño del sistema de posicionamiento en cuanto la precisión brindada. Los factores DOP son funciones de los elementos diagonales de la matriz de covarianza de los parámetros, expresados en un mundial o un marco geodésico local.

Se tienen en cuenta los vectores desde el receptor al satélite  $i$ :

$$\left( \frac{(x_i - x)}{R_i}, \frac{(y_i - y)}{R_i}, \frac{(z_i - z)}{R_i} \right)$$

Donde el valor de  $R_i$  está dado por la ecuación 27.

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$$

*Ecuación 27. Cálculo de la posiciones del receptor.*



$x$ ,  $y$  y  $z$  indican la posición del receptor y  $x_i$ ,  $y_i$  y  $z_i$  indican la posición del satélite  
 i. Formular la matriz,  $A$ , como muestra la ecuación 28:

$$A = \begin{bmatrix} \frac{(x_1 - x)(y_1 - y)(z_1 - z)}{R_1 R_1 R_1} c \\ \frac{(x_2 - x)(y_2 - y)(z_2 - z)}{R_2 R_2 R_2} c \\ \frac{(x_3 - x)(y_3 - y)(z_3 - z)}{R_3 R_3 R_3} c \\ \frac{(x_4 - x)(y_4 - y)(z_4 - z)}{R_4 R_4 R_4} c \end{bmatrix}$$

*Ecuación 28. Matriz A.*

Los tres primeros elementos de cada fila de  $A$  son los componentes  $x$ ,  $y$ ,  $z$  del vector distancia del receptor al satélite que se indica. Los elementos de la cuarta columna son  $c$ , que denota la velocidad de la luz. Se formula la matriz  $Q$  como se observa en la ecuación 29:

$$Q = (A^T A)^{-1}$$

*Ecuación 29. Matriz Q.*

Los elementos de  $Q$  son designados como se ve en la ecuación 30:

$$Q = \begin{bmatrix} d_x^2 d_{xy}^2 d_{xz}^2 d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 d_y^2 d_{yz}^2 d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 d_{yz}^2 d_z^2 d_{zt}^2 \\ d_{xt}^2 d_{yt}^2 d_{zt}^2 d_t^2 \end{bmatrix}$$

*Ecuación 30. Elementos de la matriz Q.*

Los elementos de  $Q$  son términos estrictamente geométricos. Luego, PDOP, TDOP y GDOP están dados por las ecuaciones 31, 32 y 33 respectivamente:

$$PDOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$$

*Ecuación 31. Valor PDOP.*

$$TDOP = \sqrt{d_t^2}$$

*Ecuación 32. Valor TDOP.*

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2}$$

*Ecuación 33. Valor GDOP.*

También se calcula la dilución horizontal de precisión como muestra la ecuación 34.

$$HDOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$$

*Ecuación 34. Valor HDOP.*

y la dilución vertical de precisión (ecuación 35)

$$VDOP = \sqrt{d_z^2}$$

*Ecuación 35. Valor VDOP.*

Con la información de la tabla 5 mostrada anteriormente se puede obtener la desviación estándar del error. Esta desviación se calcula tomando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los componentes de errores individuales como se ve en la ecuación 36.

$$\sigma_R = \sqrt{3^2 + 5^2 + 2.5^2 + 2^2 + 1^2 + 0.5^2} m = 6,7 m$$

*Ecuación 36. Desviación estándar para la señal C/A.*

Además, con los datos de las diluciones de precisión, la desviación estándar del error en la posición del receptor se estima  $\sigma_{rc}$  como se observa en la ecuación 37, usando la dilución de la precisión posicional:

$$\sigma_{rc} = \sqrt{PDOP^2 * \sigma_R^2 + \sigma_{num}^2} = \sqrt{PDOP^2 * 6.7^2 + 1^2} m$$

*Ecuación 37. Desviación estándar del error en el receptor para la señal C/A.*

Ahora, la ecuación 38 muestra la desviación si se trabaja con el código de precisión P(Y):

$$\sigma_R = \sqrt{0.3^2 + 5^2 + 2.5^2 + 2^2 + 1^2 + 0.5^2} m = 6 m$$

*Ecuación 38. Desviación estándar para la señal P(Y).*

En este caso la desviación estándar del error en la posición del receptor se estima  $\sigma_{rc}$  según muestra la ecuación 39:

$$\sigma_{rc} = \sqrt{PDOP^2 * \sigma_R^2 + \sigma_{num}^2} = \sqrt{PDOP^2 * 6^2 + 1^2} m$$

*Ecuación 39. Desviación estándar del error en el receptor para la señal P(Y).*

### 2.5.7.10. GLONASS

Con fin puramente militar, fue implementado a partir del año 1970. Fue la respuesta de la URSS al comienzo de la implementación por parte de USA del sistema NAVSTAR GPS, ya que esto mantenía un equilibrio en las posibilidades militares de ambas potencias. Es un sistema parecido al GPS en muchos aspectos. La constelación de satélites GLONASS se encuentra completa con 24 satélites alrededor de la tierra conocida como SAT desde fines de 1995 (López 2002). Está a cargo del Ministerio de Defensa de la Federación Rusa. Los satélites fueron lanzados desde Baikonur en Kazajstán.

Los 24 satélites (21 activos y 3 de repuesto) situados en tres planos orbitales con 8 satélites cada uno y siguiendo una órbita inclinada de 64,8° con un radio de 25.510 kilómetros. La constelación de GLONASS se mueve en órbita alrededor de la tierra con una altitud de 19.100 kilómetros (algo más bajo que el GPS) y tarda aproximadamente 11 horas y 15 minutos en completar una órbita.

La constelación no fue terminada hasta diciembre de 1995 y comenzó a ser operativo el 18 de enero de 1996. Ese mismo año la Federación Rusa ofreció el canal de exactitud normalizada (CSA) del GLONASS para apoyar las necesidades de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI).

GLONASS utilizó inicialmente el sistema geodésico ruso PZ-90 que era sensiblemente diferente del sistema WGS 84; y como los parámetros de transformación entre los dos sistemas de referencia no se conoce con precisión, era necesario prestar atención a los sistemas a los que se refiere. En septiembre de 2007, el sistema fue adaptado y actualizado. Llamado PZ-90.02, está de acuerdo con el sistema de referencia ITRF2000, que se ajusta como WGS 84.

En el 2004, 11 satélites se encontraban en pleno funcionamiento y 19 a fines del 2007. Son necesarios 18 satélites para dar servicio a todo el territorio ruso y 24 para poder estar disponible el sistema en todo el mundo.

En 2007, Rusia anunció que a partir de ese año se eliminan todas las restricciones de precisión en el uso de GLONASS, permitiendo así un uso comercial ilimitado. Hasta ahora las restricciones de precisión para usos civiles eran de 30 metros.

La aparición en el mercado de receptores que permiten recibir señales pertenecientes a los dos sistemas GLONASS y GPS (con sistemas de referencia diferentes) hace interesante las posibilidades de GLONASS en la medición como apoyo al GPS norteamericano.

### **2.5.7.11. Galileo**

Desarrollado por la Unión Europea, es un sistema global de navegación por satélite (GNSS), con el objetivo de evitar la dependencia de los sistemas GPS y GLONASS. Será de uso civil y se espera poner en marcha en 2014. y debido a la crisis económica europea, estará activo en varios años más.

Inicialmente iba a estar disponible en el 2008, aunque el proyecto acumula ya tres años de retraso por disensiones entre los países participantes.

Se espera que mejore la cobertura en las áreas de latitudes altas como es todo el caso del norte de Europa. Será más exacto que el GPS, con una precisión de alrededor de 1 metro, comparado con los 15 metros de la tecnología GPS.

El 28 de diciembre de 2005 se lanzó el satélite de pruebas Giove-A (Galileo in-orbit validation element), primero de este sistema de localización por satélite, desde el cosmódromo de Baikonur, en Kazajstán. El segundo de los satélites de prueba, (Giove-B) debería haberse lanzado en abril de 2006, pero por problemas con el ordenador a bordo, el lanzamiento fue retrasado hasta el 25 de abril de 2008.

El 21 de octubre de 2011 se lanzaron los dos primeros satélites del programa.

Además de prestar servicios de autonomía en radionavegación y ubicación en el espacio, será interoperable con los sistemas GPS y GLONASS. El usuario podrá calcular su posición con un receptor que utilizará satélites de distintas constelaciones. Al ofrecer dos frecuencias en su versión estándar, Galileo brindará ubicación en el espacio en tiempo real con una precisión del orden de metros.

A diferencia de los que forman la malla GPS, estarán en órbitas ligeramente más inclinadas hacia los polos. De este modo sus datos serán más exactos en las regiones cercanas a los polos, donde los satélites estadounidenses pierden precisión.

Asimismo, garantizará la disponibilidad continua del servicio, excepto en circunstancias extremas, e informará a los usuarios en segundos en caso del fallo de un satélite. Esto lo

hace conveniente para aplicaciones donde la seguridad es crucial, tal como las aplicaciones ferroviarias, la conducción de automóviles o el control del tráfico aéreo. El uso combinado de Galileo y otros sistemas GNSS ofrecerá un gran nivel de prestaciones para todas las comunidades de usuarios del mundo entero.

Una preocupación importante de los actuales usuarios de la radionavegación por satélite es la fiabilidad y vulnerabilidad de la señal. En los últimos años, se han producido varios casos de interrupción del servicio por causas tales como interferencia accidental, fallos de los satélites, denegación o degradación de la señal. En este contexto, Galileo realizará una importante contribución a la reducción de estos problemas al proveer en forma independiente la transmisión de señales suplementarias de radionavegación en diferentes bandas de frecuencia. En total, utilizará 10 radiofrecuencias, de la siguiente manera:

- 4 frecuencias en el rango de 1164-1215 MHz (E5A-E5B)
- 3 frecuencias en el rango de 1260-1300 MHz (E6),
- 3 frecuencias en el rango de 1559-1591 MHz (L1).

#### **2.5.7.12. COMPASS/BeiDou**

BeiDou es un proyecto desarrollado por la República Popular de China para obtener un sistema de navegación por satélite. "BeiDou" es el nombre chino para la constelación de la Osa Mayor. La primera generación, BeiDou-1, ya está operativa desde el 2000 y es un sistema de posicionamiento por satélite local dando servicio a China y a sus países vecinos. La segunda generación, también llamada COMPASS o BeiDou-2, será un sistema de posicionamiento global con un funcionamiento similar al del GPS.

Ofrecerá dos tipos de servicios: el primero será abierto y podrá dar una posición con un margen de 10 metros de distancia. El segundo, será autorizado sólo para determinados clientes y ofrecerá servicios más precisos y con mayores medidas de seguridad.

A diferencia de los sistemas GPS, GLONASS, y Galileo, que utilizan satélites en órbitas altas y ofrecen servicio global, la primera generación, BeiDou-1 usa satélites en órbita geostacionaria que están más altos que los anteriores. Esto implica que el sistema no requiera una gran constelación de satélites, pero limita su cobertura sobre la tierra a la visible por los satélites, China en este caso. Otra gran diferencia de BeiDou-1 es que calcula las coordenadas únicamente con dos satélites y una estación en tierra. Esto implica la necesidad de enviar una señal desde el dispositivo remoto, cosa que no es necesaria con GPS o GLONASS.

Se prevé que COMPASS, la segunda generación, cuente con entre 12 y 14 satélites entre 2011 y 2015. Para 2020, deberá contar con 30 satélites para estar operativo plenamente. Al 2011 hay 8 en órbita.

## **2.6. Mejoras de precisión**

Muchos científicos y empresas trabajan día a día para mejorar la precisión que ofrecen los sistemas de navegación por satélite. Los proyectos son variados y de diferentes organismos. Las mejoras en general están dadas por dos factores: económico y disponibilidad. En muchas regiones, más allá de afrontar un elevado costo para la mejora de la precisión, es imposible obtener buenos resultados dada la distribución del terreno o la cercanía a estaciones de referencia. Esto hace que los desafíos por reducir el error de los sistemas de navegación por satélite sigan en aumento.

### **2.6.1. Posicionamiento aislado**

Cuando se habla de posicionamiento aislado se imagina un receptor que recibe datos del sistema satelital, los procesa y como resultado entrega una posición. Este tipo de posicionamiento sin mejoras tiene un elevado error donde todos los puntos resultantes están dentro de los 15 metros el 95% de las mediciones.

### **2.6.2. Posicionamiento relativo**

En este caso se tienen dos receptores que de manera simultánea reciben datos del sistema satelital. Aquí los errores son comunes a ambos, fundamento que sirve de base para las correcciones diferenciales. La posición relativa es mucho más precisa que la aislada.

### **2.6.3. Posicionamiento y sistemas de aumentación**

Algunos de los requisitos operacionales para los que las constelaciones GPS y GLONASS no se elaboraron, se enuncian a continuación:

- Exactitud: Diferencia entre la posición estimada y la real.
- Integridad: Confianza sobre la información total proporcionada.
- Continuidad: Funcionamiento sin interrupciones no programadas.
- Disponibilidad: Es la parte del tiempo durante la cual el sistema presenta simultáneamente la exactitud, integridad y continuidad requeridas.

Para garantizar que los GNSS actuales cumplan con estos requisitos en todas las fases de vuelo (desde el despegue, en ruta, hasta un aterrizaje de precisión), para el GPS y GLONASS se requiere de diversos grados de aumentación.

Se han diseñado y normalizado para superar las limitaciones inherentes a los GPS tres sistemas de aumentación: el sistema basado en aeronave (Aircraft Based Augmentation System – ABAS), el basado en tierra (Ground Based Augmentation System - GBAS), y el basado en satélite (Satellite Based Augmentation System –SBAS). Para aplicaciones en tiempo real, las correcciones de los parámetros de cada satélite de las constelaciones GNSS existentes (GPS y GLONASS) deberán ser transmitidas a los usuarios a través de equipos de radio VHF (GBAS) o si se requiere una amplia cobertura a través de satélites geoestacionarios que emitan pseudo códigos con información de corrección (SBAS).

### **2.6.3.1. ABAS (Aircraft Based Augmentation System)**

Para que los sistemas GPS y GLONASS cumplan con la performance exigida por la Aviación Civil en las distintas fases de vuelo, se obliga a los usuarios a usar los receptores GPS conjuntamente con sistemas de aumentación que le otorguen la performance requerida.

Entre los sistemas que otorgan esta aumentación a los receptores GPS tenemos: Los sistemas de Monitoreo de Integridad Autónoma (RAIM) y el Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE), ambos proporcionan la integridad requerida para utilizar el GPS como medio único suplementario y principal de navegación durante la salida, en ruta, la llegada y para aproximaciones de precisión y no-precisión.

#### *2.6.3.1.1. Sistema Monitor de Integridad Autónoma del Receptor (RAIM)*

El sistema RAIM detecta la falla de la señal de un satélite del GPS comparando la información sobre posición y tiempo obtenida de diversas combinaciones de cuatro satélites en un conjunto de por lo menos cinco satélites visibles. De esta manera, puede detectarse un satélite defectuoso y dar una advertencia al piloto. Puesto que el sistema RAIM no incorpora la capacidad de cancelar la señal de un satélite defectuoso, no debe seguir usándose la navegación GPS cuando el RAIM detecta un satélite defectuoso. El sistema FDE es el que efectúa la cancelación de un satélite defectuoso.

#### 2.6.3.1.2. Sistema de Identificación y Exclusión de Fallas (FDE)

El sistema FDE es una técnica para excluir al satélite defectuoso y así permitir que se siga navegando con el GPS, siempre y cuando existan suficientes satélites disponibles. La mayoría de los nuevos receptores incorporan funcionalidad FDE.

#### 2.6.3.2. SBAS (Satellite Based Augmentation System)

Comprende todos los sistemas de aumentación basados en satélites, los principales son el WAAS (EE.UU), EGNOS (Europa) y MSAS (Japón). Se encuentran en proceso de desarrollo GAGAN (India); y en proyecto SNAS (China) y SACCSA (Latinoamérica). Son sistemas de corrección de las señales que los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) que transmiten al receptor GPS del usuario. Los sistemas SBAS mejoran el posicionamiento horizontal y vertical del receptor y dan información sobre la calidad de las señales. Inicialmente desarrollados para dar una precisión mayor a la navegación aérea, pero cada vez se está generalizando más en otro tipo de actividades que requieren de un uso sensible de la señal GPS.

Actualmente, están desarrollados o en fase de implementación los siguientes sistemas SBAS:

- WAAS (Wide Area Augmentation System), gestionado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
- CWAAS (Canadian Wide Area Augmentation System), gestionado por el gobierno Canadiense.
- SDCM (System of Differential Correction and Monitoring) operado por Rusia.
- EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service), administrado por la Agencia Espacial Europea.
- WAGE (Wide Area GPS Enhancement), que transmite más precisión en los datos de efemérides y reloj de los satélites destinado a uso militar.
- MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System), operado por Japón.
- StarFire, gestionado por la empresa John Deere.
- Starfix DGPS y OmniSTAR, operado por Fugro.
- QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), propuesto por Japón.
- GAGAN (GPS and GEO Augmented Navigation), planeado por la India.
- SACCSA (Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica).
- SNAS (Satellite Navigation Augmentation System), propuesto por China



- ASAS (African Satellite Augmentation System), propuesto por África.

Los objetivos de los sistemas SBAS son:

- Incrementar la exactitud de los sistemas GNSS para cumplir con los requisitos de un medio único de navegación para aproximaciones de precisión. Sin aumentación de ningún tipo, el NAVSTAR GPS o GLONASS pueden ser utilizados únicamente para aproximaciones de no-precisión (NPA).
- Incrementar la disponibilidad dado que en el presente, la disponibilidad del sistema GPS varía entre el 95% y 98%. Como consecuencia, se requiere la confirmación de la disponibilidad de los satélites a lo largo de la ruta del GPS previa a cada vuelo en el que se desee utilizar GPS como medio de navegación primario. Esto es debido a que, previamente al SBAS, era necesario dedicar un satélite en línea de visión para la única función de supervisión de la integridad.

La mayoría de los sistemas SBAS tiene una arquitectura conformada por una red de estaciones terrestres de referencia distribuidas por una amplia zona geográfica (países o continentes enteros) que supervisan las constelaciones de satélites de GNSS. Las estaciones retransmiten los datos a una instalación de procesamiento central que evalúa la validez de las señales y calcula correcciones a los datos de efemérides y reloj radiodifundidos de cada satélite a la vista. Para cada satélite GPS o GLONASS vigilado, el SBAS estima los errores en los parámetros, y a su vez estas correcciones son transmitidas al avión por medio de satélites geoestacionarios. Luego el receptor a bordo ajusta la información recibida directamente de los satélites GPS con las correcciones recibidas de los satélites geoestacionarios, para así navegar con más precisión y seguridad.

Los mensajes de integridad y correcciones para cada fuente telemétrica GPS o GLONASS vigilada se transmiten en la frecuencia GPS L1 de los satélites geoestacionarios SBAS, situados en puntos orbitales fijos sobre el ecuador terrestre. Los mensajes SBAS aseguran la integridad, mejoran la disponibilidad y proporcionan la actuación necesaria para aproximaciones con guiado vertical APV.

El SBAS utiliza mediciones de distancia en dos frecuencias para calcular el retardo de la medición de distancia introducido por la ionosfera y radiodifunde las correcciones aplicables en puntos de la cuadrícula ionosférica predeterminados. El receptor SBAS

del usuario interpola entre los puntos de la cuadrícula para calcular la corrección ionosférica a lo largo de su línea de alcance óptico a cada satélite.

Además de correcciones de reloj, efemérides e ionosféricas, el SBAS evalúa y transmite parámetros que limitan la incertidumbre en las correcciones. Combinando estos cálculos de incertidumbre en las correcciones con cálculos de las incertidumbres en su propia exactitud de mediciones de pseudo distancia, el receptor SBAS de usuario modela un error para su solución de navegación propia.

Es importante distinguir entre las zonas de cobertura y las zonas de servicio SBAS. La zona de cobertura se define por las huellas en tierra de las señales de los satélites geostacionarios. Las zonas de servicio para un SBAS determinado se establecen por el estado dentro de la zona de cobertura SBAS. El estado es el responsable de designar los tipos de operaciones que pueden apoyarse dentro de una zona de servicio determinada. En la figura 18 se puede observar su infraestructura.

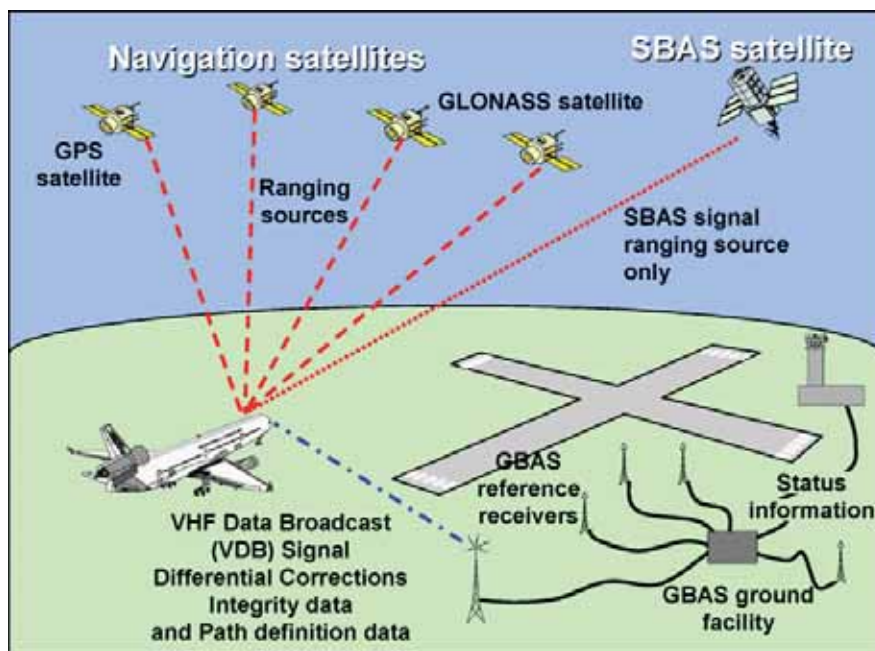


Figura 18. Infraestructura SBAS.<sup>1</sup>

Entre las ventajas del SBAS se encuentran:

- Provee una guía tridimensional para aproximaciones de precisión a las aeronaves dentro del área de servicio. Este método de operación del SBAS mejora significativamente los instrumentos bidimensionales de navegación existentes que no pueden proveer referencias verticales precisas a los pilotos.

<sup>1</sup> [http://ieeexplore.ieee.org/ieee\\_pilot/articles/96jproc12/jproc-TMurphy-2006101/article.html](http://ieeexplore.ieee.org/ieee_pilot/articles/96jproc12/jproc-TMurphy-2006101/article.html)

- Provee gran precisión (hasta 5 metros vertical y hasta 2 metros horizontal) y disponibilidad (radiodifunde señales similares al GPS por varios satélites geostacionarios) para aproximaciones de Categoría I, además de integridad (alto nivel de redundancia en el sistema y notificación de fallos en 6 segundos) para la seguridad del sistema GPS y apoyo a las operaciones de vuelo.
- Reduce las posibilidades de accidentes contra tierra durante vuelos controlados y aproximaciones.
- Elimina los costos asociados en el mantenimiento de los instrumentos de navegación más antiguos con base terrestre.
- Reduce el número de piezas de equipos a bordo de la aeronave y requiere sólo un receptor montado en la cabina y una antena.
- Permite reducir los estándares que gobiernan la separación entre aeronaves en vuelo, alojando un mayor número de ellas en un espacio dado, sin aumentar los riesgos.
- Ahorros de combustible haciendo posible vuelos más directos y aproximaciones más seguras.

En la figura 19 se muestran algunos de los sistemas SBAS y sus áreas de cobertura.



Figura 19. Áreas de cobertura de los SBAS.<sup>2</sup>

#### 2.6.3.2.1. WAAS (*Wide Area Augmentation System*)

Desarrollado por Estados Unidos, está ideado como un complemento para la red GPS para proporcionar una mayor precisión y seguridad en las señales, permitiendo una precisión en la posición menor a dos metros.

El sistema consta de 59 estaciones de vigilancia, llamadas estaciones de referencia de área amplia o WRS (*Wide-area Reference Stations*), 2 estaciones maestras o WMS (*Wide-area Master Stations*), 6 antenas para la retransmisión de datos GES (*Ground*

<sup>2</sup> <http://www.francis-fustier.fr/Glossaire/glossaire.html>



#### **2.6.3.2.2. CWAAS (*Canadian Wide Area Augmentation System*)**

El sistema canadiense es básicamente un plan de extender la cobertura del WAAS americano a Canadá. Aunque los satélites geostacionarios WAAS pueden ser recibidos en la mayoría en Canadá, se necesitan sitios adicionales con estaciones de referencia terrestre para validar la correctitud de los datos fuera de Estados Unidos. Se evaluó repartir sobre Canadá al menos 11 de tales sitios. Las estaciones de referencia canadienses son vinculadas con el sistema WAAS estadounidense.

#### **2.6.3.2.3. SDCM (*System of Differential Correction and Monitoring*)**

El sistema ruso tiene por finalidad elaborar y transferir en tiempo real información de ajuste de los sistemas GLONASS, GPS y Galileo (integridad de los datos, zona amplia y datos de corrección local) con destino a clientes civiles. Se prevé que el SDCM basado en señales GLONASS y GPS permitirá aumentar la exactitud en la determinación de la posición (en comparación con la del nivel básico) en cualquier lugar de Rusia.

#### **2.6.3.2.4. EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*)**

Desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA), la Comisión Europea (institución de la Unión Europea) y Eurocontrol. Ideado como un complemento para las redes GPS y GLONASS para proporcionar una mayor precisión y seguridad en las señales, permitiendo una precisión inferior a dos metros. Consiste en una red de tres satélites geostacionarios y en una red de estaciones terrestres encargadas de monitorizar los errores en las señales de GPS y actualizar los mensajes de corrección enviados por EGNOS.

El sistema empezó a emitir en julio de 2005 mostrando unas prestaciones excelentes en términos de precisión y disponibilidad.

El sistema EGNOS es completamente compatible con el sistema WAAS de Estados Unidos.

#### **2.6.3.2.5. WAGE (*Wide Area GPS Enhancement*)**

Es un método para incrementar la precisión horizontal del código P(Y) encriptado del GPS agregando datos de corrección de rango adicional al mensaje de navegación que difunden los satélites. Esta actualización diaria de cada mensaje de navegación satelital contiene el rango de correcciones para todos los satélites de la constelación. Por lo

tanto, el rango más apropiado de información de corrección debería estar disponible para cada satélite, resultando en un aumento de la precisión horizontal.

WAGE sólo está disponible para el servicio de posicionamiento preciso (PPS Precise Positioning Service) o receptores de código P(Y). Requiere al menos 12,5 minutos para obtener los datos WAGE más recientes. Luego, el proceso de usar los datos de corrección es automático y transparente para el operador. El receptor siempre está prendido y continuamente recolecta datos WAGE. Además, siempre usa los datos WAGE más recientes disponibles para calcular la posición.

La información de especificaciones para el receptor GPS avanzado de defensa, el cual reemplazó al PLGR, muestra una precisión WAGE mejor a 4,82 metros el 95% de las veces en el plano horizontal. La precisión del PPS ha mejorado mas allá de la especificación WAGE y las mejoras de precisión del WAGE son ahora despreciables. Receptores modernos y relojes atómicos en un chip también superarán a WAGE.

#### ***2.6.3.2.6. MSAS (Multi-functional Satellite Augmentation System)***

En paralelo con el sistema WAAS de Estados Unidos y el EGNOS de Europa, Japón ha desarrollado un sistema basado en un satélite geoestacionario de transporte multifuncional (MTSAT), el cual tiene también una función meteorológica (además de la aeronáutica). El MTSAT-1 fue lanzado en el año 2000, y subsecuentes lanzamientos son programados cada cinco años. Este sistema soporta DGPS y permite mejorar la precisión de la señal del sistema GPS. Este sistema esta operativo en Asia, principalmente en Japón.

Aunque el sistema de software del MSAS está basado en el WAAS presenta diferentes capacidades que los sistemas WAAS y que el EGNOS, porque incluye dos modos de comunicación, voz y datos. Esta capacidad de comunicación será usada para brindar Vigilancia Automática Dependiente (ADS). Específicamente, MSAS está basado en el concepto FANS de la OACI, incluyendo GNSS para navegación y Servicio Satelital Móvil Aeronáutico (AMSS) para dos modos voz/datos con ADS.

La aplicación aeronáutica consiste de dos funciones: servicio móvil aeronáutico por satélite (SMAS) y sistema de aumentación basado en satélite (SBAS) del GNSS para proporcionar a las aeronaves información sobre aumentación GPS por enlace ascendente a partir de las instalaciones terrestres.

Después de haber fallado el lanzamiento del MTSAT-1 (el primer MTSAT), Japón adquirió otro satélite, MTSAT-1R, que se lanzó a principios de 2004. El segundo

MTSAT, MTSAT-2, se lanzó en 2005. Una vez finalizada la certificación, el MSAS entraría en servicio y sería operacional utilizando únicamente el MTSAT-1R. El doble funcionamiento del MTSAT-1R y el MSAT-2 entró en servicio en el año 2006.

#### ***2.6.3.2.7. StarFire***

Es un WADGPS (Wide Area Differential GPS) desarrollado por los grupos NavCom y Precision Farming de John Deere. Difunde información de corrección adicional por satélite de frecuencias de banda L alrededor del mundo permitiendo a un receptor equipado con StarFire obtener posiciones precisas muy por debajo de un metro, con una precisión típica durante un periodo de 24 horas debajo de los 4,5 centímetros. Es similar a WAAS pero mucho más exacto debido a las numerosas técnicas que mejoran el procesamiento en el receptor.

StarFire usa un receptor avanzado para corregir internamente los efectos de la ionosfera. Captura la señal P(Y) que es difundida en dos frecuencias, L1 y L2 y compara los efectos de la ionosfera en el tiempo de propagación de las dos. Usando esta información, los efectos de la ionosfera pueden ser calculados con un alto grado de precisión, por lo que puede compensar las variaciones de retraso en la propagación. La segunda señal P(Y) está encriptada y no puede ser usada directamente por receptores civiles, pero StarFire no usa la información contenida en la señal sino que sólo compara la fase de las dos señales. Esto es costoso en términos electrónicos ya que requiere un sintonizador secundario y una excelente estabilidad en la señal para que sea útil, lo cual hace que esta solución no sea ampliamente usada.

Difunde esta información a 300 baudios una vez por segundo y las correcciones generalmente son válidas por 20 minutos.

Se desarrollaron dos versiones de StarFire. La primera conocida como SF1 en 1998, ofrecía precisión absoluta de 1-sigma alrededor del metro. Su error era de 15 a 30 cm, para posiciones absolutas y de centímetros para posiciones relativas. Para lo que se necesitaba no era suficiente. El SF2 fue presentado en 2004, mejoraba notablemente la precisión con 1-sigma de precisión absoluta de alrededor de 4,5 cm. Generalmente podía posicionar un punto geográfico dentro de los 5 cm y tener una precisión de 10 cm el 95% de las veces. La precisión relativa fue mejorada hasta alrededor de 2,5cm.

Los receptores StarFire también reciben señales WAAS, ignorando su información de corrección ionosférica y usando su información de efemérides y ajuste de reloj para

proveer una precisión de alrededor de los 50 cm. En comparación, los GPS estándar ofrecen una precisión de alrededor de 15 metros y usando WAAS se mejora a 3 metros. En cuanto a las estaciones de referencia, en principios utilizaba 7 desplegadas por todo Estados Unidos. Las correcciones generadas por estas estaciones son enviadas a dos estaciones de procesamiento redundante. Todas las estaciones están conectadas vía Internet. Luego se agregaron algunas redes adicionales en Sudamérica, Australia y Europa. A medida que fue creciendo el uso del sistema la decisión fue vincular varias redes de área local en una global. Hoy en día, usa 25 estaciones alrededor del mundo. John Deere también tiene el sistema DGPS de tiempo real cinemático. StarFire RTK consiste de pequeños receptores GPS montados en un trípode que usan la señal StarFire para lograr sus propios cálculos DGPS relativos a un punto, normalmente a la esquina de un campo. RTK ofrece precisión absoluta de alrededor de los 2 cm, y relativa en los milímetros. Este tipo de precisión es usada para equipamiento totalmente automatizado en sistemas de navegación autónoma.

#### ***2.6.3.2.8. Starfix DGPS y sistema OmniSTAR***

El sistema OMNISTAR fue desarrollado en 1990 para proveer correcciones GPS diferencial seguras para aplicaciones de tiempo real de alta precisión (Ott 1996). Al momento, hay dos sistemas OMNISTAR que cubren Estados Unidos, Australia y Nueva Zelanda. Entrega las correcciones por medio de satélites geostacionarios, proporcionando así una cobertura total en las áreas de servicios completos. Es único ya que las correcciones de la red son usadas en la solución del sistema de usuario para generar las correcciones RTCM (Real Time Correction Messages). La unidad OMNISTAR provee correcciones RTCM a un motor GPS de usuarios como si la estación base estuviera a un kilómetro de la posición del usuario presente.

Las raíces del sistema comenzaron cuando las correcciones GPS diferenciales eran difundidas por los satélites geostacionarios StarFix. Las correcciones proveían una solución de la posición independiente para compararla con el sistema StarFix. En ese momento, una solución de posición estaba disponible únicamente del sistema GPS durante dos horas al día. Las comparaciones independientes GPS de posiciones estaban disponibles por medio del sistema StarFix. Irónicamente, el sistema GPS hizo que StarFix sea un producto de posicionamiento en tiempo real y a su vez lo dejó obsoleto en 1995. Este fue el tiempo en el cual el sistema GPS fue declarado operacional y era capaz de proveer posicionamiento 24 horas al día.



El equipo necesario para usar este sistema consiste en un receptor GPS y un receptor de la señal del satélite que provee correcciones. Por otro lado, un software que aplica la corrección a las observaciones locales. En general es un poco menos preciso que BEACON. La conexión no depende de la distancia a la estación de referencia ya que la señal es recibida desde satélites geoestacionarios

#### **2.6.3.2.9. QZSS (*Quasi Zenith Satellite System*)**

Está pensado para proporcionar un sistema de posicionamiento preciso y comunicaciones multimedia a dispositivos móviles. Aumentará tanto la precisión en el posicionamiento de GPS, como su disponibilidad y fiabilidad.

Es un sistema de corrección de señales de navegación global por satélite, propuesto para uso complementario del GPS en Japón. Su nombre proviene del hecho de que la mayor parte del tiempo, al menos un satélite del sistema se posicionará en torno al zenith.

Consiste en tres satélites situados en órbita muy elíptica. Tienen una elevación mayor de 70° durante la mayor parte del día, y de 60° durante todo el día. También está previsto que sea compatible con Galileo y NAVSTAR-GPS. En el segmento de tierra, están previstas 9 estaciones de seguimiento.

Los satélites se denominan QZS-1, QZS-2 y QZS-3. El desarrollo de QZS-1 comenzó, oficialmente, en noviembre de 2006. La revisión preliminar del diseño se completó en agosto de 2007. QZS-1 fue lanzado en 2009. QZS-2 y QZS-3 serán lanzados en años posteriores.

#### **2.6.3.2.10. GAGAN (*GPS and GEO Augmented Navigation*)**

Se ha diseñado para satisfacer los SARPS de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) y que permita relacionarse con WAAS, EGNOS y MSAS.

Desarrollado por la Agencia India del Espacio (ISRO), está ideado como un complemento de la red GPS para proporcionar una mayor precisión y seguridad en las señales de posicionamiento y navegación por satélite.

El fin es satisfacer los requisitos de precisión y seguridad en la navegación por satélite de las compañías aéreas y los proveedores de servicios de tráfico aéreo (ATS) en el espacio aéreo de la India, incluyendo el espacio del océano Índico, así como amplias partes de la Región Asia/Pacífico.

### ***2.6.3.2.11. SACCSA (Sistema de Aumentación para el Caribe, Centro y Sudamérica)***

Pretende analizar la viabilidad técnica, financiera e institucional de implantación de un sistema SBAS/GNSS en las regiones del Caribe y América del Sur. El proyecto incluye una definición técnica de un Sistema de Aumentación Basado en Satélites (SBAS) adaptado a las especiales circunstancias de las regiones mencionadas (ionosfera, geografía, etc.)

El proyecto comenzó en el año 2003 en una primera fase con el nombre de EDISA (EGNOS Demonstrations In South America), la cual perseguía una serie de ensayos y demostraciones de la señal SBAS del sistema europeo EGNOS, extendida a las regiones del Caribe, Centroamérica y Sudamérica.

Para ello, se desplegó una infraestructura de ensayos basada en la implantación de la señal EGNOS en la Región CAR (Caribe) y en la zona noroeste de la Región SAM (Sudamérica), para lo cual se instalaron tres Estaciones de Referencia y de Supervisión de Integridad (RIMS) en Colombia (Bogotá), Cuba (La Habana) y COCESNA – Honduras (Tegucigalpa). Estas estaciones se conectaron con Madrid a través del satélite Hispasat y de ahí al ESTB (EGNOS System Test Bed). Una vez desplegada la infraestructura, se realizaron tomas de datos en estático durante un periodo de 2,5 meses y se llevaron a cabo ensayos en vuelo.

Los datos resultantes mostraron preliminarmente que era viable radiar una señal EGNOS en las Regiones CAR/SAM sobre la base del despliegue de una infraestructura terrena de estaciones RIMS, pudiendo llegar a conseguir unas actuaciones en torno a capacidad APV I.

Basado en los resultados obtenidos en la primera fase del proyecto y teniendo en cuenta el desarrollo evolutivo de los GNSS, se planificó la realización de una segunda fase cuyo objetivo era “estudiar, desarrollar y planificar los aspectos técnicos, financieros, operacionales e institucionales, de alternativas posibles para implantar un sistema pre-operacional SBAS para las Regiones CAR/SAM”.

Al concluir esta fase, se dispondría de los elementos de juicio necesarios para que las entidades regionales de la OACI tomen la decisión sobre el mejor modelo del sistema de aumentación SBAS (EGNOS extendido, WAAS extendido, EGNOS-WAAS, o un sistema propio) a implantar en estas regiones, y de este modo poder proceder con los concursos internacionales necesarios para la realización de dicha implantación. Esta

Fase II del proyecto se le denominó SACCSA (Solución de Aumentación para el Caribe, Centro y Sur América).

A mediados del 2005, se definió que ni el sistema EGNOS europeo ni el WAAS estadounidense podían ser factiblemente extendidos hacia las regiones del Caribe, Centro y Sudamérica, por lo que el SACCSA se enfocó estratégicamente a convertirse en un sistema SBAS propio, autónomo de estas regiones, pero interoperable con los demás sistemas SBAS existentes y en desarrollo.

Por ello, en esta fase, se constatará la viabilidad de que las Regiones CCAR/SAM (Centro, Caribe y Sudamérica) dispongan de un sistema SBAS propio que permita cubrir sus necesidades y las de sus usuarios teniendo en cuenta la evolución de los Sistemas Globales de Navegación por Satélites (GNSS). Dicho sistema (SACCSA) se definirá de acuerdo a las características propias de estas regiones, basado en la estrategia y pautas regionales adoptados por la OACI, adaptando su configuración a la distribución del espacio aéreo y densidad del tránsito aéreo.

Asimismo, se establecerán las bases para la gestión y operación del mismo, proponiendo los órganos internacionales que podrían ser creados para llevar adelante dichas acciones.

#### ***2.6.3.2.12. SNAS (Satellite Navigation Augmentation System)***

China sigue adelante con su propia versión del sistema de aumentación basado en satélite conocido con el nombre de SNAS. Aunque la información de su sistema está incompleta, al menos 11 sitios de referencia han sido instalados en Beijing y sus alrededores en la fase 1 del programa. Los receptores, fabricados por Novatel Inc. de Canadá, han sido entregados para la segunda fase. Este sistema al igual que el europeo (EGNOS) y estadounidense (WAAS), consiste en una red de estaciones terrestres de GPS diferencial que usan principalmente la constelación de satélites geoestacionarios Inmarsat-3 como medio de transmisión de las correcciones diferenciales a los usuarios.

#### ***2.6.3.2.13. ASAS (African Satellite Augmentation System)***

La red africana de aumentación (figura 21) será similar a la estadounidense y el servicio será el mismo que el europeo, prestará apoyo al control de tráfico marítimo (MTC), al control de tráfico terrestre (LTC) para implementaciones en caminos y autopistas, y para el control de tráfico aéreo (ATC) y gerenciamiento, brindado mayor seguridad en

vidas y bienes. Esta propuesta viene a ser la primera en lo que respecta a RSAS (Regional Satellite Augmentation Systems) en el hemisferio sur.

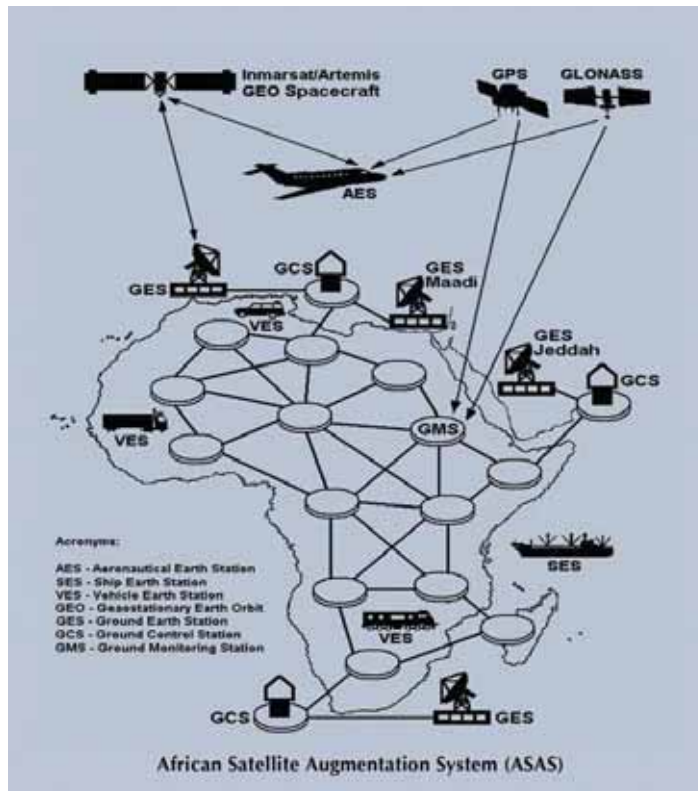


Figura 21. Infraestructura de ASAS.<sup>4</sup>

### 2.6.3.3. GBAS (Ground Based Augmentation System)

Comprende todos los sistemas de aumentación basados en estaciones terrestres, pero no dependen de satélites geoestacionarios, debido a que el GBAS no está diseñado para dar servicio sobre amplias regiones geográficas.

Es la arquitectura DPGS estandarizada por la OACI para soportar las aproximaciones de precisión y aterrizajes. Actualmente, la comunidad internacional de la aviación civil está desarrollando requisitos de prestaciones aplicables a GBAS para soportar operaciones de aterrizaje de CAT II/III. Es un sistema de aumentación usado para aproximaciones de precisión y operaciones de aterrizaje que requieren un alto grado de integridad. El principio operacional es similar al LADGPS. Correcciones computadas localmente son transmitidas por VHF a la aeronave. La calidad de las correcciones transmitidas es evaluada mediante test estadísticos en las observaciones de pseudo rango y las correcciones diferenciales derivadas. Ambos servicios, correcciones diferenciales e integridad, son enviados a todas las aeronaves que se encuentren en el área de cobertura

<sup>4</sup> <http://www.docstoc.com/docs/74412516/The-development-of-an-African-satellite-augmentation-system>

a una distancia máxima de 23 millas náuticas. Una implementación de GBAS Estadounidense es LAAS (Local Area Augmentation System)

También puede proporcionar correcciones a la señal telemétrica de los satélites geostacionarios del SBAS. Una estación terrena GBAS es instalada próxima a un aeropuerto con un conocimiento muy preciso de su posición. El GBAS vigila las señales GPS o GLONASS en un aeródromo y transmite correcciones diferenciales de pseudo distancia, mensajes de integridad locales y datos de aproximación (esto lo diferencia ampliamente del DGPS convencional) directamente al receptor de abordaje mediante una radiodifusión de datos VHF.

#### **2.6.3.3.1. LAAS (Local Area Augmentation System)**

Este sistema de aumentación basado en estaciones terrestres se enfoca principalmente en brindar servicio a aeropuertos con un radio de 20 a 30 millas para mejorar la precisión, controlar diferentes operaciones y vigilar el movimiento en el sector del aeropuerto (Park *et al.* 2008). LAAS está compuesto tanto por estaciones terrestres como estaciones en el avión. La sección terrestre (LGF - LAAS Ground Facility) incluye 4 receptores de referencia, procesadores terrestres LAAS, y un transmisor para difusión de los datos VHF. La sección terrestre está complementada con LAAS de aviación instalada en la aeronave. Por lo tanto, las partes que componen el LAAS son:

- **Estaciones de referencia de área local:** Las estaciones de referencia del LAAS son instaladas en localizaciones precisas en los aeropuertos. Reciben y recolectan la información de posición de GPS. La información GPS es luego enviada a la estación de proceso central.
- **Estación de proceso central de área local:** La estación de proceso central recibe la información de las estaciones de referencia y las compara con posiciones conocidas calculadas en forma precisa determinando el error del sistema GPS.
- **Transmisor de datos de área local:** Son transmisores de datos VHF que operan en la banda aeronáutica desde 118 Mhz hasta 136 Mhz, también pueden operar en banda C; ellos reciben la información de corrección de la estación de proceso del LAAS y la transmiten omnidireccionalmente. Si no hay obstáculos que impidan a las aeronaves recibir las correcciones se podrán desarrollar las aproximaciones de precisión para todas las cabeceras de pista en el área de cobertura.

- **Pseudolites de área local:** Pseudolite o Pseudo-satélite trabaja con el principio del GPS diferencial (DGPS), esta estación es emplazada en tierra y transmite señales GPS al igual que los satélites GPS actuales siendo usado por las aeronaves que se encuentren en la cobertura para calcular su posición GPS, garantizando la disponibilidad del sistema en todo momento. La arquitectura del sistema LAAS puede ser caracterizada por el uso o no de los Pseudolites. Los Pseudolites pueden ser usados para brindar una medida adicional del pseudo rango aumentando así la disponibilidad y asegurando la continuidad de los aterrizajes. Los Pseudolites pueden también incluir capacidades de enlace de datos eliminando la necesidad de un enlace de datos separado.

El éxito de los sistemas LAAS radica en que soportan aproximación de precisión y posibilitan que se realice vigilancia de superficie (ADS). El LAAS debe complementar a los sistemas SBAS descritos anteriormente. Por ejemplo, deberán ser instalados en aeropuertos donde los sistemas SBAS tengan mayores exigencias o limitaciones tales como: zonas polares, lugares donde las señales de los satélites sean difícilmente recibidas por los receptores. Sus aplicaciones se pueden dar en aeropuertos ubicados en zonas remotas como son las islas donde sólo una estación de referencia sensa las señales GPS, o en una extensa área de red SBAS muy amplia y dispersa. El LAAS puede también ser usado en aeropuertos donde la demanda del tráfico justifique su disponibilidad, y en lugares donde es esencial la alta calidad de los sistemas de navegación pero que no pueden ser suministrados por los sistemas convencionales. Tal es el caso de los aeropuertos situados en valles y que están rodeados por áreas extremadamente montañosas. La figura 22 muestra la infraestructura del sistema LAAS.

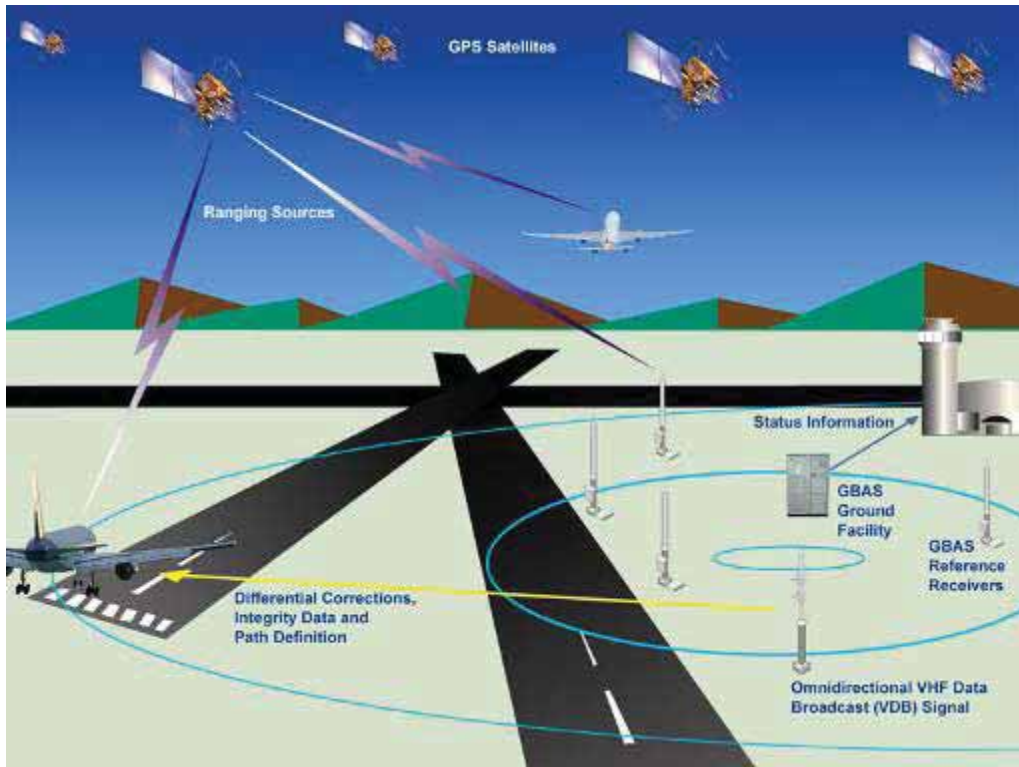


Figura 22. Infraestructura LAAS.<sup>5</sup>

#### 2.6.3.4. GRAS (Ground Regional Augmentation System)

Tiene como base al GBAS y consiste en una serie de estaciones GBAS desplegadas en un área extensa (incluso continental) interconectadas entre sí por sistemas de telecomunicaciones, permitiendo contar con una aumentación SBAS de carácter regional. Australia es el país más avanzado en estos momentos en el desarrollo e implementación de este tipo de sistemas.

##### 2.6.3.4.1. DGPS (Differential GPS)

El DGPS corrige los errores del sistema comparando la posición medida con una posición GPS conocida de elevada precisión brindada por una estación de referencia terrestre. Esta misma estación calcula la diferencia y la difunde a los usuarios. Algunas de estas correcciones sirven sólo para un área cercana a la estación de referencia. Para que las correcciones se puedan utilizar se podrían desplegar muchas estaciones de referencia y transmitir un considerable volumen de datos.

Se basa en el posicionamiento relativo y permite obtener una precisión de 1 a 2 metros. Es una técnica que ayuda a mejorar la precisión e integridad del posicionamiento GPS

<sup>5</sup>

[http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/laas/](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/laas/)

mediante el uso de una o más estaciones de referencia. Estas estaciones están equipadas con un receptor GPS en una ubicación conocida. DGPS puede dividirse en dos categorías: DGPS de área local (LADGPS) para áreas pequeñas tal como una región o país y DGPS de área amplia (WADGPS) para áreas más amplias como un continente o todo el mundo.

#### **2.6.3.4.2. LADGPS (Local Area DGPS)**

En este sistema cada estación de referencia realiza mediciones pseudo rango a todos los satélites visibles. El sistema compara la observación pseudo rango con un rango geométrico computado. Este rango geométrico computado es la distancia desde la ubicación conocida precisa de la estación a un satélite del cual las coordenadas son derivadas de las efemérides difundidas. Una corrección escalar a cada satélite en vista es computada como la diferencia entre los rangos observados y computados. Para sistemas regionales los sitios de referencia posiblemente difundan directamente los mensajes de corrección y el tipo de corrección a los usuarios. Entonces los usuarios pueden aplicar un algoritmo de posicionamiento si más de cuatro satélites están en vista, y dado que los errores residuales serán más pequeños, en general se podrá obtener mejor precisión. La decorrelación temporal de las fuentes de error dominante afectan la validez de las correcciones y debe ser considerada; por tal motivo un tipo de corrección pseudo rango se puede transmitir para permitir al usuario compensar el tipo de error pseudo rango. La principal desventaja de este sistema es el alcance limitado en el cual las correcciones son válidas debido a la rápida decorrelación de los errores a medida que se incrementa la distancia entre el receptor y la estación de referencia.

#### **2.6.3.4.3. WADGPS (Wide Area DGPS)**

De manera general son soluciones usadas para obtener precisión en el sistema GPS sobre áreas extensas. Normalmente los WADGPS usan una red estaciones terrestres que comparan su ubicación precisa conocida con ubicaciones obtenidas de las señales satelitales. Cualquier diferencia encontrada puede ser usada para generar una corrección que es difundida desde los satélites.

En abril de 2004, entró en funcionamiento el sistema EGNOS, un sistema de apoyo al Galileo para mejorar la precisión de las localizaciones. En otras regiones del mundo hay otros sistemas similares compatibles con EGNOS: WAAS de Estados Unidos, MSAS



de Japón y el GAGAN de la India. WAAS, EGNOS, GAGAN y MSAS son implementaciones específicas de WADGPS.

#### **2.6.4. RTK (Real Time Kinematic)**

Es una técnica usada para la topografía, el guiado automático agrícola y la navegación marina basada en el uso de medidas de señales portadoras de navegadores con señales GPS, GLONASS y/o de Galileo, donde una sola estación de referencia proporciona correcciones en tiempo real, obteniendo una exactitud submétrica. Usa la señal portadora y no los mensajes contenidos en la misma. La dificultad para implementar un sistema RTK radica en alinear correctamente las señales. En la práctica, los sistemas de RTK utilizan un sólo receptor como estación base con una posición conocida de manera precisa y un número determinado de unidades móviles. La estación base retransmite, a través de algún canal de comunicación (VHF o UHF, red celular) (Dardari 2012), la fase del portador que hace mediciones, y las unidades móviles comparan sus propias medidas de fase con las que está recibiendo desde la estación base.

RTK está basado en la técnica de posicionamiento cinemático en tiempo real que observa la fase de la onda portadora. Puede proveer en tiempo real posiciones tridimensionales con una precisión de centímetros. La clave de la tecnología RTK es el procesamiento y transmisión de datos.

Trimble lanzó el primer sistema RTK comercial en 1993 y desde entonces 4 generaciones de sistemas RTK fueron producidos.

RTK es una de las tecnologías de navegación y posicionamiento GNSS más precisas, con la cual los usuarios pueden obtener en tiempo real una precisión de centímetros en posiciones relativas.

El posicionamiento RTK tiene algunas limitaciones en cuanto a costo y precisión. Por ejemplo, se necesita un conjunto adicional de receptores GPS para la estación de referencia propia del móvil, además de gastar tiempo y energía para su puesta en marcha. Por otro lado, la precisión está restringida por la distancia entre la estación de referencia y el móvil. Por lo cual surge un nuevo método de posicionamiento conocido como VRS. El equipo necesario para usar este sistema consiste en un GPS, un emisor y un receptor de la señal de la estación de referencia; un software que calcule en tiempo real la posición del móvil respecto de la base (conocida). El problema que tiene este sistema es que con la distancia no se cancelan los errores, es imperioso que haya

conexión entre emisor y receptor y ésta no se pierda, de lo contrario habrá que inicializar nuevamente.

#### **2.6.4.1. VRS (Virtual Reference Station)**

Es una tecnología de posicionamiento con estaciones multi referencia, también conocida como red RTK. El principio está basado en una red de estaciones permanentes, que a solicitud del usuario, genera observaciones virtuales en una estación imaginaria situada en la zona de trabajo. Estas observaciones virtuales podrán ser procesadas por el propio usuario, y obtener resultados en sus móviles como si dispusiera de un sistema RTK.

Su funcionamiento se puede describir en 3 etapas:

1. En tres o más estaciones de referencia lejos de su área de cobertura, las estaciones móviles primero realizan un posicionamiento pseudo rango, y determinan las coordenadas generales en su vecindad.
2. Se envían las coordenadas al centro de procesamiento de datos de la red de estaciones de referencia, al mismo tiempo las mediciones de fase portadora también han comenzado y las correcciones de desviación de varias estaciones fueron calculadas por la estación de referencia, para dibujar aproximadamente el número correcto de coordenadas, y entonces configurar una estación de referencia virtual.
3. Se usa una estación diferencial eliminar y debilitar la desviación producida por la ionosfera, las desviaciones de la troposfera, tanto como los efectos multipath, etc., en la estación móvil. De esta manera, se mejora la precisión en el posicionamiento.

VRS surge como una técnica para aumentar la precisión en tiempo real a bajo costo. Teniendo una red de cobertura con estaciones es posible proveer posicionamiento preciso a cualquiera en el área, sólo con recibir los datos de corrección del LBS, sin necesidad de asignar una por una las estaciones al móvil. Los datos se bajan de una estación de referencia no existente (virtual). Los datos virtuales son computados en una unidad de procesamiento central. El uso y concepto VRS ha sido propuesto e investigado por varios grupos de investigación.

Las técnicas de DGPS mediante las cuales se usa una estación con coordenadas bien conocidas como una estación de referencia, son la clave de un posicionamiento submétrico. Usan observaciones de códigos de frecuencia simple. Una mayor precisión

puede obtenerse con observación de fase portadora de doble frecuencia y fijando sus ambigüedades doblemente diferenciales para corregir sus valores enteros. Esta técnica es comúnmente conocida como RTK. Ambas técnicas se degradan al incrementar la distancia entre el móvil y la estación de referencia debido a la influencia de la refracción ionosférica, troposférica y a pequeños grados de error de orbitas. Además, si se quiere obtener un posicionamiento preciso del orden submétrico el mismo está limitado a las distancias entre receptores a unos cientos de kilómetros y a nivel centímetro los sistemas RTK están restringidos a distancias del orden de los 10 km.

Con el propósito de proveer un servicio de posicionamiento diferencial en un área grande, muchas estaciones de referencia deben ser configuradas. En contraste con el DGPS, estas estaciones de referencia no deben ser consideradas como independientes teniendo en cuenta que cada estación cubre una parte específica del área. Sin embargo, las observaciones de una red de estaciones deberían ser preprocesadas con el fin de generar modelos con la influencia de la distancia. Basado en los parámetros del modelo y la posición aproximada del usuario, correcciones individuales de la estación de referencia virtual (VRS) pueden ser predecidas las cuales permiten un posicionamiento diferencial.

Con la red RTK los errores diferenciales causados por la refracción ionosférica y troposférica, y los errores de órbita son estimados precisamente basados en observaciones de fase portadora de doble frecuencia de una red local o regional de estaciones de referencia. Los parámetros del modelo de corrección son determinados para predecir los errores diferenciales para la línea base entre la estación de referencia principal y la posición del usuario. Aplicando estas correcciones a las observaciones de código y fase portadora de la estación de referencia principal, las mediciones VRS son generadas para el posicionamiento RTK del receptor perteneciente al móvil.

Actualmente, no existe un formato estandarizado de datos para la difusión de los parámetros del modelo de corrección. Además, no hay un acuerdo en cuanto a la parametrización de los modelos de corrección. Por lo tanto, la forma más común de red RTK hoy en día usa mediciones VRS para retransmitir a los usuarios.

Usar la red RTK también trae desventajas. Primero, se requieren enlaces de comunicación bidireccionales, ya que los usuarios tienen que transmitir sus posiciones aproximadas al centro de procesamiento el cual retorna a los usuarios las observaciones de las correcciones de un VRS particular. Segundo, el software de procesamiento base dentro del receptor móvil no es capaz de darse cuenta que procesa los datos de

referencia virtual. Considera los datos como que se originaron de una estación de referencia simple ubicada muy cerca de la posición del móvil y por ello en algunos casos posiblemente no sea la decisión más óptima en el procesamiento.

### **2.6.5. e-Dif (extended Differential)**

Este sistema genera correcciones autónomas respecto a una coordenada de referencia arbitraria y las extrapola en el tiempo (GPS World 2002). Dichas correcciones se modelan en el tiempo y se aplican a la posición GPS con el objeto de mantener una posición relativa consistente. Es un posicionamiento relativo muy consistente y su precisión es de alrededor de 1 metro. El objetivo del sistema es estudiar los residuos del proceso de inicialización para aislar los errores sistemáticos más importantes que introducen las ecuaciones correspondientes a cada satélite. Es aplicable durante un tiempo reducido de 40 minutos aproximadamente ya que luego cambia el error sistemático, caso en el cual se debe volver a calcular un nuevo error. El producto está dirigido principalmente a clientes en las regiones de América del Sur, África y Australia donde las correcciones diferenciales están disponibles solamente mediante un abono de suscripción.

La deriva es de 90 cm en aproximadamente 40 minutos. Las ventajas respecto a DGPS es que no utiliza servicios DGPS pagos y no tiene las limitaciones de los servicios DGPS en cuanto al acceso a su señal correctora y se puede utilizar en todo el planeta

### **2.6.6. PPP (Precise Point Positioning)**

La tecnología de posicionamiento de punto preciso (PPP) es una mejora sobre los sistemas ya existentes. Esta novedosa técnica de procesamiento de datos GPS combina resultados del receptor con información de ubicación y tiempo precisa proveniente de los satélites y los relojes. Este método ofrece información de procesamiento que es precisa a nivel de centímetros o mejor. El fenómeno físico que afecta estas mediciones tiene que ser modelado de manera precisa. Estos incluyen el suministro de información puntual y libre de errores relacionados con la ubicación y comportamiento de los recursos de la tierra. Puede procesar datos de posiciones recolectados de estaciones en movimiento, estáticas o mixtas. Información de relojes precisos y de las órbitas de los satélites son suministrados por el servicio de GNSS internacional (IGS) en conjunto con su red de seguimiento global y centros de análisis. La información de ubicación dada por el IGS incluye algo de latencia lo que significa que hay una brecha de tiempo entre

el instante que la información es requerida y en el que es proveída. Sin embargo, los esfuerzos se centran en reducir la latencia demandada por sistemas de ubicación de alta precisión. Hay muchos servicios PPP en línea. Natural Resources Canada ofrece observaciones precisas a través de Internet. El usuario sólo requiere un archivo RINEX de alta calidad que contiene datos GPS de una duración adecuada para garantizar una evaluación acorde de las diferencias de la fase portadora. Al probar el sistema PPP Canadiense en línea se ha revelado que puede ofrecer resultados precisos de manera automática (Bisnath 2009).

## **2.7. Estado actual y mejoras de los sistemas GNSS**

Los diferentes sistemas y dispositivos trabajan en torno a diversas señales. Las señales que se transmiten son: L1 a 1575,42 Mhz y L2 a 1227,60 Mhz. Dentro de cada señal se codifican los siguientes códigos: C/A en L1 de libre disponibilidad, P(Y) en L1 y L2 con el código encriptado.

Algunas de las mejoras que se prevén en las señales son (Perdomo 2012):

- Incorporación de una señal L2C (hoy hay sólo 7 satélites operativos) no encriptada a partir de los satélites del Bloque IIR-M, conjuntamente con una señal militar tanto para L1, como para L2.
- Incorporación de una señal L5 de libre disponibilidad a partir de los satélites del Bloque II-F. Mientras la vida útil de los IIR-M es de 10 años, se espera que la de estos sea de 12.
- En estudio una nueva señal L1C (Bloque III) la cual sería compatible con la de Galileo. El lanzamiento de los satélites correspondientes a este bloque, se planea para 2014.
- Una de las pretensiones de la NASA es la incorporación de retrorreflectores láser, de manera de poder hacer un seguimiento orbital, independiente de las transmisiones clásicas de GPS (radio transmisiones). Esto permitirá separar errores orbitales, de errores en las efemérides. Esta es una característica de los satélites GLONASS y lo será de Galileo.
- Modelado ionosférico con la combinación de L1-L2C a partir de receptores sencillos que no necesitarán técnicas particulares para recuperar la L2.
- Mejor performance con señales débiles, no porque sea más fuerte la señal sino por una mejor estructura de la misma lo que permite ser seguida en peores condiciones.

- Nueva frecuencia L5 a 1176 Mhz. Es 4 veces más potente que L2C y tiene una estructura mejorada lo que facilita su recepción en cualquier situación. Esta tercera frecuencia disponible facilitará la eliminación del efecto de la ionosfera en las señales GPS.

La tabla 6 presenta un resumen de las señales observables y cuales son sus alcances en posicionamiento aislado y relativo (Perdomo 2012).

Modo	Observable	Precisión de la medida	Exactitud del resultado
Posición aislada	C/A	1 a 3 m	3 a 10 m
Posición aislada	fases	2 mm	3 a 10 m
Posición relativa	C/A	1 a 3 m	1 a 3 m
Posición relativa	fases	2 mm	centímetros
L1			hasta 20/30 km
L1 + L2			distancias mayores

**Tabla 6.** Señales y sus alcances en posicionamiento aislado y relativo.

La tabla 7 presenta la precisión en el posicionamiento aislado según el receptor usado y las señales que captura (Perdomo 2012).

Receptor	Nro. de Equipos	Observables	Precisión ( $\sigma$ )
Geodésico	1	C/A P* L1/L2	5 m (H), 10 m (V)
Submétrico	1	C/A, L1	5 m (H), 10 m (V)
Navegador	1	C/A	5 m (H), 10 m (V)

**Tabla 7.** Posicionamiento aislado y su precisión.

La tabla 8 presenta la precisión en el posicionamiento relativo según el receptor usado y las señales que captura (Perdomo 2012).

Receptor	Nro. de Equipos	Observables	Precisión ( $\sigma$ )
Geodésico	2	C/A P* L1/L2	1cm + 1 ppm
Geodésico	2	C/A, L1	1cm + 1 ppm*
Submétrico	2	C/A, L1	50 cm
Navegador	2	C/A	2-3 m

\* Hasta 20 km.

**Tabla 8.** Posicionamiento relativo y su precisión.

## **2.8. Comparativa**

Beacon y Omnistar se pagan (Beacon es un poco más precisa, sobre todo cerca de las antenas, Omnistar es más fácil de acceder). VRS es excelente, pero requiere de una organización que la sustente. RTK es muy precisa, puede ser operada por un productor o varios, requiere operadores eficientes. Autocorrección (e-Dif), es autónoma, requiere algunos cuidados operativos, pero dejaría automáticamente de funcionar en caso de una degradación intencional del sistema. DGPS, el servicio y los receptores pueden ser costosos y algunas zonas no están cubiertas, salvo en regiones donde hay señal de los SBAS.

## **2.9. Servicios de precisión en Argentina**

En Argentina, existe la posibilidad de acceder a posicionamiento preciso a través de algunos servicios disponibles. En general existen tres formas de mejorar la precisión:

### **2.9.1. Corrección mediante antenas Beacon/MSK**

Son estaciones terrestres instaladas por la firma D&E que realizan las correcciones mediante radio transmisión en la banda de los 200 Mhz a los 500 Mhz. La empresa difunde a través de 3 antenas que cubren 12 provincias del norte y centro de Argentina, dos de ellas en Bolivar (Bs. As.) y San Carlos Sur (Santa Fe) cubren un radio de acción de 450 km y la restante se encuentra en Las Lajitas (Salta) cubriendo un radio aproximado de 350 km. Se paga anualmente alrededor de 300 dólares o 900 dólares de por vida. La precisión lograda depende la distancia a la cual se encuentre la base referencial que emite las correcciones.

D&E también ofrece un piloto automático basado en sistema de control electro hidráulico para tractores, pulverizadoras y cosechadoras. Receptor Trimble FmX con pantalla de 12.1 pulgadas, color de alta resolución y sensible al tacto. Este sistema se destaca por contar con 2 receptores duales (GPS + GLONASS) que garantizan la precisión y confiabilidad de trabajo, además de permitir realizar distintas tareas independientes y simultáneas. Sistema de compensación con tecnología T3 que aumenta la precisión de guiado incluso en terrenos movidos y con grandes pendientes. Disponible en 3 opciones de corrección diferencial (DGPS On Path, Omnistar XP y RTK) según la necesidad o nivel de precisión requerido. Opcionalmente el FmX puede comandar aplicaciones de siembra, fertilización o pulverización, ya sea en dosis fija o en dosis variable por ambientes.

Por otro lado, existen receptores de la señal MSK que se pueden activar mediante el pago de \$600 al año y por equipo, o \$1.300 por tres años. En la actualidad hay en funcionamiento unos 100 equipos con esta señal DGPS en nuestro país.

### **2.9.2. Corrección satelital con satélite geostacionario**

DGPS también esta disponible por medio de OMNISTAR y Racal a un costo de 1500 dólares más impuestos por año. (Srinivasan 2006)

El sistema OMNISTAR estableció 5 bases de monitoreo satelital en Sudamérica, Punta Arenas (Chile), Valencia (Venezuela), Guayaquil (Ecuador), Recife y Río de Janeiro (Brasil). Las 5 estaciones de monitoreo satelital, reciben y envían la señal corregida a una base central en Barcelona España, que verifica las correcciones y las retransmite al satélite geostacionario que se encuentra a la altura de Brasil sobre el Atlántico, el cual envía a los demás la señal corregida. El usuario recibe conjuntamente las señales de GPS y DGPS y las utiliza en tiempo real. Cobertura en todo Sudamérica desde enero de 1998. La precisión alcanzada en este caso es menor a los 2 metros.

Los usuarios pueden acceder a esta tecnología de señal DGPS a través de la adquisición del receptor OMNISTAR, que tiene un costo aproximado de \$ 4.000, más un derecho de recepción que rondará en los \$2.000 por año por cada receptor.

Actualmente, la firma CASE tiene un producto llamado AFS que ya viene con el receptor de señal BEACON u OMNISTAR, es decir, que puede acceder a cualquiera de las dos señales descritas anteriormente. Ya existe otra señal similar disponible, llamada Racal también con satélite geostacionario con alcance a todo el cono sur, a la que se puede acceder mediante activaciones anuales, resultando una alternativa para los que posean receptor doble DGPS-BEACON/DGPS SATELITAL y tengan que salir del área de cobertura BEACON.

Además, Geosistemas es el encargado y representante de la señal DGPS vía satélite de OMNISTAR en Argentina.

Desde agosto de 1997, se ha hecho realidad la posibilidad de utilizar receptores GPS para agricultura en cualquier punto del territorio Argentino. La firma FUGRO OMNISTAR, ha instalado un satélite que transmite correcciones diferenciales con precisión del orden del metro a todos los usuarios Sudamericanos y cubre el 100% del territorio. Únicamente con receptores de correcciones vía satélite, se hace posible la aplicación de posicionamiento DGPS en las tareas de agricultura en Argentina. La ventaja de usar un mismo equipo en todo lugar de Sudamérica, tiene el agregado que la



recepción de correcciones proviene de la misma forma que la del posicionamiento GPS (ambas por satélites).

### **2.9.3. Corrección interna en el receptor GPS**

El sistema e-Dif realiza una corrección interna que determina y minimiza el error ionosférico en el receptor. No genera ni transmite por radio una corrección típica RTCM, pero permite obtener posiciones validas diferenciales con excelentes resultados en guía de maquinaria. Es un sistema gratuito y la precisión se puede mejorar a 1 metro.

### **2.9.4. RTK**

Los servicios de suscripción son a menudo operados por distribuidores de equipos de agricultura de precisión, tales como los distribuidores de Trimble que han creado estaciones base simples o múltiples dentro del área de la red. Las redes RTK están extendiéndose por todo el mundo a paso rápido por lo que la cobertura RTK está mejorando continuamente. La precisión se mejora a centímetros.

Concesionarios certificados John Deere están construyendo una red de bases fijas en todo el país para que todos los usuarios de maquinaria agrícola puedan trabajar con la mayor precisión disponible. El objetivo es sumar más hectáreas con la misma precisión, y llevar los beneficios de la señal más precisa del mercado a más usuarios. Cada usuario de piloto automático AutoTrac puede aprovechar el poder de 1 pulgada de precisión con el menor costo inicial. El receptor StarFire 3000 es la última novedad en receptores de posición y es perfectamente compatible con todos los niveles de precisión (SF1, SF2 y RTK) y con todos los sistemas de guiado John Deere. Desde el sistema de asistencia manual Parallel Tracking al sistema de guiado totalmente integrado AutoTrac.

No es necesario el mantenimiento de base propia o el traslado de equipos de un campo a otro. Todo usuario que se encuentre dentro de las 113.500 hectáreas de cobertura de alguna de las bases de la red RTK John Deere, puede suscribirse al pago de un abono para operar con señal RTK.

La red RTK John Deere ya cubre más de 15 millones de hectáreas en Argentina.

## **2.10. Resumen**

Se hizo un recorrido descriptivo de las tecnologías que se estudiaron en pos de poder proponer algunas técnicas para el tratamiento de errores del sistema GPS. Se mostraron todos los actores involucrados en el posicionamiento de un objeto, desde los sensores

hasta los sistemas de coordenadas. Se analizaron cuales son los problemas que tienen los sistemas globales de navegación por satélite en cuanto a la precisión entregada, así como también las mejoras que existen en la actualidad, los servicios y empresas que hay en Argentina que permiten acceder a posiciones de precisión mejorada. Se presentaron recursos matemáticos, estadísticos y computacionales, como herramientas posibles para tratar los problemas encontrados.

## Capítulo 3

# Técnicas propuestas para el análisis de los datos

### 3.1. Introducción

En este capítulo se analiza cual es el problema que presentan los sistemas globales de navegación por satélite. Además, se presenta un resumen de algunas de las soluciones existentes y cuáles son las opciones para mejorar la precisión en Argentina.

Se enuncian las técnicas que se utilizan y cómo se implementa cada una de ellas las cuales apuntan a mejorar la precisión posicional por medio del análisis de datos provenientes de los receptores GPS. El análisis se hace tanto *on-line* como *off-line* tratando de establecer el error que tiene el sistema GPS estándar sin tratamiento alguno. Luego de obtener el error se difunde a otros receptores por algún vínculo para que puedan mejorar sus posiciones.

Definidas las técnicas a usar, se propone conformar un sistema base diferencial de posicionamiento relativo compuesto de una notebook y dos receptores de bajo costo. El sistema debe ser portable y compuesto por dispositivos asequibles en el mercado local para cualquier usuario que desee obtener posiciones de precisión.

### 3.2. Análisis del problema

La precisión del sistema GPS es dependiente de la posición y el retraso de la señal. Los errores en las electrónicas son una de las varias razones que perjudican la precisión (Grewal *et al.* 2007). En la tabla 5 de la sección 2.9.7.9.2 ya se presentaron las fuentes de error y su efecto correspondiente. La precisión del sistema es de 15 metros el 95% de las veces, aunque si se activa el sistema DGPS, la precisión mejora siendo inferior a un metro en el 97% de los casos. Estos sistemas SBAS no aplican en Sudamérica, ya que esta parte del mundo no cuenta con este tipo de satélites geoestacionarios (Rao 2010). Otra causa por la cual no funcionan los sistemas de aumentación en Sudamérica es por la falta de estaciones terrestres de control y corrección. Aún recibiendo la señal de los satélites geoestacionarios, no es posible aumentar la precisión, al contrario se puede ver degradada.

Los receptores GPS usan muchas mediciones pseudo rango para estimar tres componentes de posición. Un problema de estimación con tantos datos ruidosos redundantes es una aplicación natural para el filtro de Kalman, lo que permite usar algo

de la información redundante para remover los efectos de las fuentes de error (Eom & Lee 2010). El objetivo es obtener un estimador óptimo de un sistema dinámico, basado en observaciones ruidosas y en un modelo de incertidumbre de la dinámica del sistema. Afrontando un costo, ya sea este por el abono de un servicio o por la adquisición de cierta infraestructura, se puede obtener una precisión submétrica. Por otro lado, y más allá de abonar un servicio o mantener una infraestructura de gran costo, en ciertas regiones no es posible contar con ellos, ya sea por las características del terreno, por el radio de alcance o por cuestiones de cobertura de las antenas de telefonía celular, de satélites geoestacionarios o de estaciones terrestres de control.

Por su lado, las aplicaciones de agricultura de precisión, no se pueden llevar adelante con la precisión entregada por el sistema GPS estándar (Srinivasan 2006) por ejemplo cuando necesitan posicionar maquinaria en el terreno o cuando se quieren tomar medidas en el campo.

El problema que presentan la mayoría de los sistemas GNSS es la precisión con la que pueden posicionar un receptor en tierra. Aunque actualmente existen sistemas que asisten en el aumento de precisión, sus costos y el hecho de no ser aplicables en todas las regiones, los han convertido en poco accesibles por la comunidad en general.

### **3.3. Análisis de soluciones existentes**

Los sistemas que mejoran la precisión posicional son variados y algunos de ellos ya fueron introducidos en la sección 2. Por lo tanto, se presentan algunos a manera de resumen y que abarcan un amplio espectro en cuanto a la metodología usada para mejorar la precisión.

#### **3.3.1. DGPS (Differential GPS)**

Para usar un GPS Diferencial se debe abonar un monto por el servicio y para que las correcciones emitidas sean válidas, el receptor tiene que estar cerca de alguna estación DGPS (no más de 1.000 km). La precisión lograda puede ser de unos pocos metros (Featherstone 2004, Satheesh 2005, Ilčev 2005, Ghavami *et al.* 2007). La señal de corrección puede no llegar si la zona es montañosa. Es un sistema que proporciona a los receptores GPS correcciones de los datos recibidos de los satélites, con el fin de brindar una mayor precisión en la posición obtenida. Los errores producidos por el sistema GPS están fuertemente correlacionados en receptores situados próximos entre sí en un radio acotado (Grewal *et al.* 2007). De esta manera, si se conoce el error producido en un

receptor se puede propagar al resto para que cada uno corrija su posición. Todos los métodos diferenciales GPS usan el mismo concepto (Di Lecce *et al.* 2008). DGPS requiere de una estación base, con un receptor GPS muy preciso en una posición conocida. La base compara su posición conocida con la calculada de la señal del satélite. La diferencia calculada en la base es aplicada entonces al receptor GPS móvil como una corrección diferencial con la premisa que dos receptores cualesquiera relativamente cerca experimentan errores similares (Zandbergen & Arnold 2011). Con el DGPS se corrigen en parte los errores debidos a: disponibilidad selectiva (eliminada a partir de Mayo del 2000), propagación por la ionosfera - troposfera, errores en la posición del satélite (efemérides) y errores producidos por problemas en el reloj.

### 3.3.2. AGPS (Assisted GPS)

Para usar el sistema AGPS, hay que contar con dispositivos móviles con una conexión de datos activa o de celular tipo GPRS, Ethernet o WiFi (Ho 2011). Es utilizado en los casos donde se tiene una señal débil por estar rodeado de edificios o árboles lo cual implica tener una posición poco precisa. Para triangular y posicionarse, los receptores GPS estándar necesitan cierto tiempo de arranque en frío (Li & Wu 2009, Van Diggelen 2009). Debido a que la señal es baja, a veces obtener una posición demora mucho tiempo o es imposible lograrlo. Un receptor AGPS puede solucionar estos problemas de diversas formas, ya sea en modo “*on-line*” u “*off-line*”. En modo “*on-line*” se accede en tiempo real a los datos pero se necesita una conexión de datos activa con el costo que ello implica. En el modo “*off-line*” se pueden bajar los datos (mientras se conectan a la red vía GPRS) los cuales se almacenan en el dispositivo y son utilizados por varios días hasta que quedan obsoletos. De cualquier manera, el sistema GPS asistido utiliza la información obtenida de una u otra forma y la combina con la información de celda o antena para conocer la posición y saber qué satélites tiene encima. Todos los datos de los satélites están almacenados en un servidor externo o en los datos bajados previamente, y según la posición actual dada por la red de telefonía, el GPS sabe de qué satélites tendría que recibir información. De los que no recibe, trata de completarla con los datos obtenidos.

### 3.3.3. RTK (Real-Time Kinematic)

Para usar RTK o navegación cinemática satelital en tiempo real, se abona por el servicio y además es muy costoso adquirir la infraestructura. Ya se introdujo en la sección 2

oportunamente, pero se recalca que se puede obtener una posición corregida muy precisa.

#### **3.3.4. e-Dif (extended Differential)**

El sistema e-Dif es autónomo y procesa archivos con formato RINEX (Receiver INdependent Exchange format), creado para unificar datos de diferentes fabricantes (Hanif *et al.* 2012). También desarrollada en la sección 2 se puede concluir que es un posicionamiento relativo muy consistente y su precisión es de alrededor de 1 metro. En regiones donde no están disponibles las señales DGPS y se debe abonar por el servicio, como en América del Sur, África y Australia este sistema se torna muy interesante.

#### **3.3.5. Sistemas de aumentación**

Como se mencionó en el capítulo 2, existen sistemas de aumentación que incrementan la precisión a niveles submétricos. Los basados en satélites (SBAS), basados en tierra (GBAS) y basados en aeronave (ABAS) (Grewal *et al.* 2007). La mayoría de estas implementaciones se usan en diferentes aplicaciones, principalmente en la aviación, y algunas están disponibles para usuarios sin permisos especiales. Aún así, los costos son elevados debido a la necesidad de contar con ciertos dispositivos de características especiales o alguna infraestructura acorde al nivel de precisión que se desee obtener. En ciertas regiones es imposible acceder a estos servicios.

#### **3.3.6. Multi frecuencia**

Existe la posibilidad de utilizar ambas frecuencias (L1 y L2) con lo cual se obtienen posiciones con una precisión centimétrica. El problema radica en que sólo son accesibles en algunos receptores de alto costo.

#### **3.3.7. Análisis de soluciones de precisión para Argentina**

Existen varias alternativas y algunas empresas que ofrecen servicios para mejorar la precisión. En su mayoría con abono mensual o anual y que requieren de ciertos receptores especiales propietarios de las diferentes marcas.

Algunas de las empresas que brindan servicios en la Argentina son John Deere, D&E y Geosistemas.

En cuanto a los servicios se puede decir que para conseguir una precisión menor a 2 metros en Sudamérica, mediante satélite geoestacionario, la opción es OMNISTAR. Por el contrario, BEACON posee tres antenas que son las bases correctoras en Argentina y cubren un radio de 300 km, su precisión depende de la distancia a la base correctora y

normalmente es submétrico. Otra forma de mejorar la precisión a metros es mediante corrección electrónica interna (e-Dif) la cual abarca el mundo entero. Por último, las correcciones RTK consiguen una precisión de centímetros pero se necesita una base propia y el radio de alcance no es mayor a los 10 km respecto a la base.

### **3.4. Solución propuesta**

Si se desea trabajar con receptores estándar de bajo costo, la precisión que se puede obtener no es mejor que los 15 metros el 95% de las veces. Con un costo más elevado se pueden obtener mejores resultados pero no en todos los terrenos. En regiones montañosas es difícil tener señal de una estación diferencial de referencia.

Además, se conoce que los errores producidos por los sistemas globales de navegación por satélite afectan por igual a los receptores situados próximos entre sí en un radio acotado (Grewal *et al.* 2007). Este principio es aplicable solamente a receptores exactamente iguales, ya que al ser diferentes sus especificaciones cambian por lo que la señal procesada por uno no es igual a la procesada por otro.

Por consiguiente, haciendo uso de este principio, se proponen técnicas y algoritmos para tratar la información de los receptores GPS. El análisis y tratamiento de información con filtros paso alto/bajo para descartar posiciones con mucho error; con filtros como el de Kalman para tratar los ruidos blancos Gaussianos (Gibbs 2010); con lógica difusa para ponderar la desviación estándar de los errores basado en ciertos parámetros; y funciones matemáticas con ecuaciones de segundo orden, pueden permitir conocer el error para mejorar la precisión relativa del sistema NAVSTAR-GPS.

Contar con un sistema portable que funcione en diversas regiones, como las montañosas, y trabaje con receptores estándar de bajo costo, sin necesidad de adquirir receptores o servicios de costos elevados. Un sistema que sea transportado a cualquier sitio y luego de un tiempo de estabilización comience a entregar posiciones de precisión es un resultado adicional de la presente tesis que persigue el desarrollo de una metodología mediante técnicas y algoritmos computacionales de tiempo real para determinar el error producido por el sistema NAVSTAR-GPS.

De las técnicas presentadas en la sección 2.4, se seleccionan algunas. A continuación se presentan sólo aquellas que aportan algún resultado significativo, ya sea positivo o negativo, que permiten conocer más en detalle la raíz del problema que tiene aparejado el sistema global de navegación por satélite NAVSTAR-GPS. Se usan algunas de estas

técnicas y la combinación de ellas para establecer el error causado en la base diferencial de posicionamiento relativo.

### **3.5. Herramientas estadísticas, matemáticas y computacionales**

Se indaga y examinan algunos recursos estadísticos, matemáticos y geométricos. La ecuación que determina la recta que pasa por dos puntos y la ecuación que define una circunferencia de cierto radio son algunos ejemplos. La intersección de ambas figuras geométricas genera una nueva ecuación, de segundo orden y con dos incógnitas. Con esta ecuación y por medio de Bascara se resuelve y se obtienen ambas raíces.

Como se puede apreciar el problema no sólo requiere del uso de algoritmos computacionales sino también de funciones matemáticas y geométricas.

En cuanto a las herramientas estadísticas, se enuncian algunas y cómo se instancia cada una de ella para el análisis de la información.

#### **3.5.1. Promedio**

Con el fin de amortiguar las mediciones realizadas se procede a computar el promedio de las muestras obtenidas. Es de destacar que cuando existen valores extremos, el promedio se torna una medida no representativa de la población y depende de la dispersión de las muestras. Pero, dependiendo de la cantidad de muestras históricas a analizar para el cálculo de este índice, se podría obtener un mejor estimador reduciendo el sesgo producido por valores extremos o por la acumulación histórica de valores no representativos.

#### **3.5.2. Moda**

El valor que más se repite en las mediciones tomadas es posiblemente el que represente la posición real del receptor. Esta técnica obtiene el valor con mayor frecuencia que se presenta en un conjunto de datos.

Si existe la posibilidad de parametrizar una ventana de tiempo en la cual se establezca la cantidad de muestras a analizar, podría resultar un buen estimador dependiendo de las características especiales de cada situación.

#### **3.5.3. Filtro de Kalman**

Con la aplicación de este filtro se pueden modelar e incorporar los errores que tiene el sistema NAVSTAR-GPS (Grewal & Andrews 2008). Un problema con tantos datos



ruidosos es una aplicación ideal para este tipo de filtro; además, se cuenta con información del tipo de distribución que tiene el error del sistema y de su covarianza. Con este filtro se estiman las posiciones de los receptores, ello permite suavizar las oscilaciones obteniendo un rango de menor amplitud y por consiguiente una menor dispersión de las muestras. Al obtener un valor más constante en el tiempo se puede ajustar el error que tiene una posición mejorando la precisión al reducir la dispersión de las medidas.

#### **3.5.4. Filtros paso bajo/alto**

Las técnicas propuestas van a aplicarse al posicionamiento de maquinaria agrícola o vehículos cuya velocidad de desplazamiento está en un rango de 5 a 20 km/h, lo cual implica poca distancia entre una medida y la próxima a tomarse. Por consiguiente, las mediciones tomadas durante el desplazamiento o posicionamiento del vehículo son de posiciones cercanas entre sí lo que permite hacer uso del principio de localidad espacial. Esta localidad se ve beneficiada por el elevado grado de correlación que tienen los datos de un receptor respecto de otro, así como también de sus errores.

Teniendo en cuenta esto, y dado que se registran valores extremos que sesgan la estimación final de la posición entregada por el receptor, se usan filtros de este tipo para descartar mediciones que estén fuera de un cierto rango. Para filtrar los datos se elijen algunos parámetros que determinan la precisión de la posición, como puede ser la relación señal ruido (SNR), la dilución de la precisión posicional (PDOP) y el diferencial de satélites que usan los receptores para obtener la posición. La salida procesada por estos filtros luego es tratada por una etapa de procesamiento conformada por otras técnicas.

#### **3.5.5. Lógica difusa**

Con el mismo concepto usado para los filtros paso bajo/alto se puede construir un sistema difuso que pondere el error. Se toman los mismos parámetros que usan los filtros como una medida de precisión de las mediciones para definir las reglas de inferencia del sistema difuso. La salida del sistema difuso es un factor de ponderación que afecta directamente a la desviación estándar de los errores usada en el filtro de Kalman para estimar las posiciones.

### **3.6. Resumen**

Se hizo un análisis del problema que debe atacar la solución propuesta, así como también de cuales son las soluciones existentes. Se especificó y detalló una solución para mitigar el error que tiene el sistema NASVTAR-GPS en cuanto al posicionamiento relativo de un objeto en el terreno. Se desarrollaron las técnicas a ser utilizadas para el tratamiento de la información.

## Capítulo 4

# Muestras tomadas y técnicas propuestas

### 4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los diferentes conjuntos de muestras que se tomaron para realizar el análisis. Se recolectaron en diferentes días y horarios a fin de tener un muestreo heterogéneo para eliminar causalidades en cuanto a las características del lugar; condiciones climáticas; estado del sistema satelital; satélites en vista y trackeados en un cierto momento; y ruidos en los receptores causados por proximidades a equipos electrónicos en funcionamiento.

Además, en esta sección se desarrollan las técnicas usadas para el tratamiento de la información a fin de encontrar los errores del sistema NAVSTAR-GPS.

### 4.2. Materiales utilizados

Se instala una base diferencial de posicionamiento relativo dotada con dos receptores Garmin 18X USB y una notebook HP Pavilion dv6835nr. Además, se cuenta con otro receptor de las mismas características y otra notebook HP TouchSmart TX2 que conforman el sistema móvil. Se usa un enlace *wireless* punto a punto para comunicar ambos sistemas.

El dispositivo Garmin 18X USB incluye un receptor y antena embebidos. Puede *trackear* múltiples satélites (12 como máximo) al mismo tiempo, proveyendo una actualización de datos de navegación con una frecuencia de 1 Hz. Su consumo es bajo e incluye también la capacidad de trabajar con el sistema de aumentación WAAS de GPS diferencial para aumentar la precisión a 3 metros. El problema es que en nuestra región no funciona por la falta de señal de satélites geoestacionarios, como se mencionó en la sección 2.5.7.9.1. Este receptor está diseñado para trabajar bajo condiciones extremas e incluso es resistente al agua pudiendo ser sumergido a 1 metro durante 30 minutos. Tiene una memoria flash interna que le permite retener datos críticos como los parámetros orbitales de los satélites, la última posición conocida, fecha y hora. Provee una salida de datos estandarizada NMEA-0183. Están disponibles los *drivers* para Windows, Linux y Macintosh. Cuando se instalan, el mismo aparece como un dispositivo USB cualquiera. La tensión de trabajo está entre los 4.4 y 5.5 volts. La precisión en modo normal, es menor a los 15 metros el 95% de las mediciones.

### 4.3. Consideraciones generales

El formato original tanto de latitud como de longitud del receptor GPS usado en la adquisición de datos es: *GradosMinutos.Decimales de minuto*. Por ejemplo para la latitud de una posición entregada, sería: 3719.3738, donde el 37 representa Grados y 19.3738 Minutos.

### 4.4. Datos usados para el procesamiento

De cada muestra se obtienen los datos crudos que se procesan y como consecuencia se almacenan las siguientes variables:

- **Fecha:** fecha de la toma.
- **Hora:** hora de la toma.
- **Lat:** latitud de la posición en el formato *GradosMinutos.Decimales de minuto*.
- **Long:** Ídem Latitud.
- **SatTrack:** cantidad de satélites usados en la solución de la posición.
- **Alt:** altitud de la posición.
- **Geoide:** valor de geoide de la posición calculada en el área de la muestra.
- **PRNs:** un arreglo de 12 valores con el PRN de cada satélite usado en la determinación de la posición.
- **PDOP:** dilución de la precisión en la posición.
- **HDOP:** dilución de la precisión en la componente horizontal.
- **VDOP:** dilución de la precisión en la componente vertical.
- **SatVis:** cantidad de satélites en vista al momento de la adquisición.
- **Satélites:** tiene la siguiente estructura interna:
  - **PRN:** el PRN del satélite
  - **Elev:** elevación
  - **Az:** Azimut
  - **SNR:** relación señal ruido.
- **VarMag:** variación magnética.

Estas variables son obtenidas desde un sistema que parsea los datos crudos de los receptores Garmin usados. Sistema desarrollado específicamente para esta tesis. De todas las variables almacenadas, se usan como entrada al sistema de procesamiento las siguientes: latitud, longitud, satélites trackeados, PDOP y SNR.

#### 4.5. Escenarios para la toma de muestras

Como se mencionó a principios de este capítulo los escenarios donde se tomaron las muestras fueron variados. Los tres fueron a cielo abierto teniendo en la mayor parte del tiempo una cantidad visibles de satélites aceptable para obtener una buena precisión. Las muestras se tomaron de día lo cual puede afectar un poco la precisión ya que de noche la ionosfera está menos ionizada.

El escenario para el primer conjunto de datos se ve en la figura 23:



Figura 23. Escenario de toma de datos para el conjunto 1.

Para el segundo conjunto de datos, el escenario contempló incluir dos puntos más e inclusive uno fue el mismo (punto 2 del conjunto 1) para ver como variaban los datos respecto del primer conjunto. En la figura 24 se puede ver el escenario en cuestión.



*Figura 24. Escenario de toma de datos para el conjunto 2.*

Para el tercer conjunto de datos se propuso hacer marcas de precisión en el terreno. Cada una de ellas se midió en varias oportunidades para corroborar su exactitud. Las marcas se pueden observar en el diagrama de la figura 25.

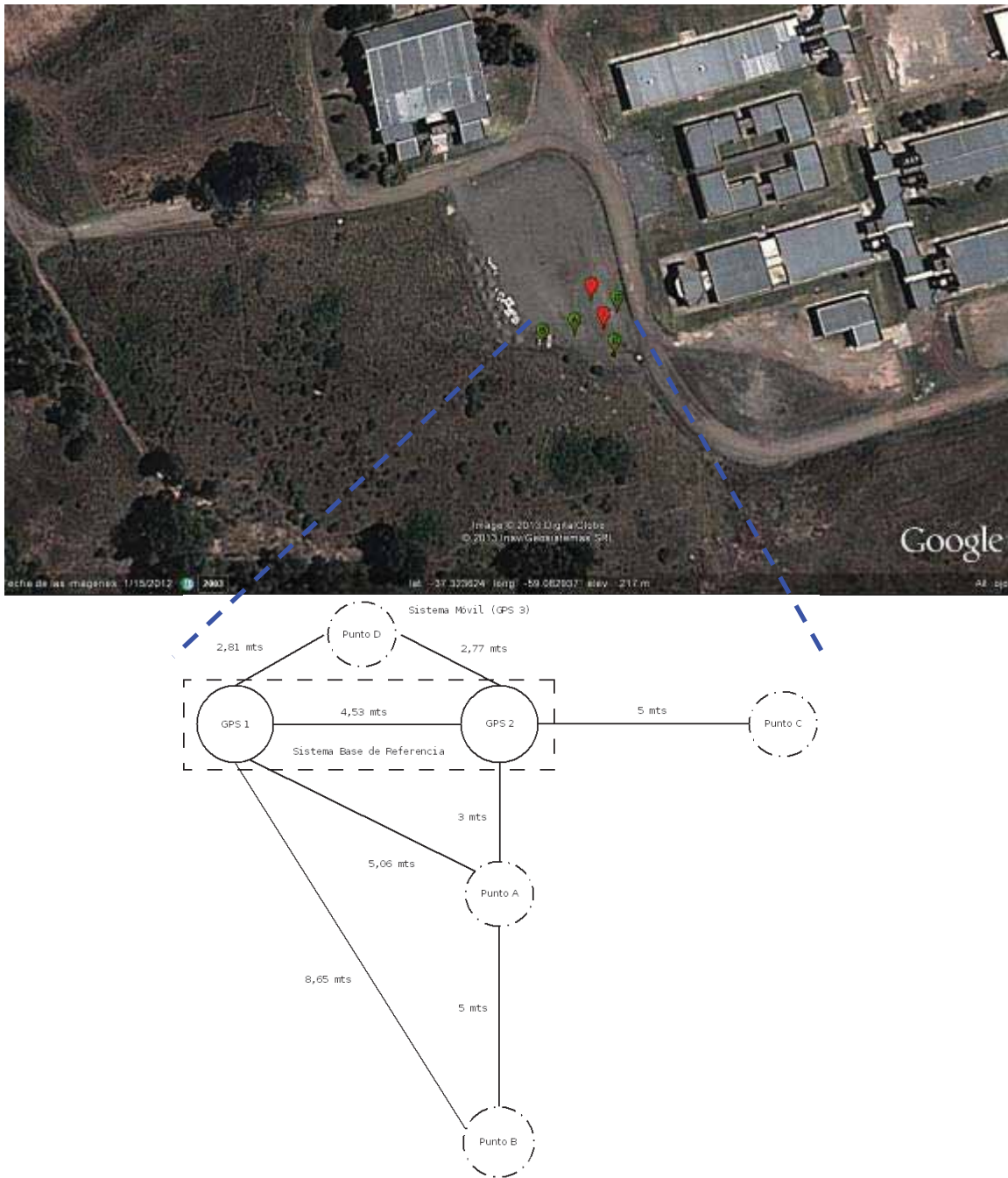


Figura 25. Escenario de toma de datos para el conjunto 3.

#### 4.6. Conjuntos de muestras

Todas las muestras se organizaron por etapas. Se realizaron varias tomas de datos en diferentes puntos del Campus Universitario en la ciudad de Tandil. La captura de datos se dividió en tres grandes conjuntos:

- El conjunto 1 está conformado por dos puntos:
  - El primero sobre uno de los edificios de la Facultad de Ciencias Exactas, más precisamente en una esquina. Se eligió este punto con el objetivo de

tener una señal más pura, ya que no hay obstáculos en la línea de visión a los satélites. Como desventaja, este punto está sobre una gran superficie plana de metal, como es el techo del edificio, que puede ser causa de una fuente de ruido, aumentando los errores.

- El segundo, en el portón de la entrada trasera del Campus Universitario cerca del gimnasio.
- El conjunto 2, conformado por cuatro puntos:
  - En el portón de la entrada trasera del Campus Universitario, cerca del gimnasio, el mismo punto 2 del conjunto 1.
  - A tres metros exactos del punto recién mencionado, también en la entrada trasera del Campus Universitario, cerca del gimnasio.
  - En la base de una lámpara de alumbrado, cerca de la entrada trasera del Campus Universitario.
  - A tres metros exactos de la base de una lámpara de alumbrado, cerca de la entrada trasera del Campus Universitario.
- El conjunto 3, conformado por seis puntos:
  - En inmediaciones del Gimnasio, cercano a la entrada trasera del Campus Universitario, se marcaron seis puntos en el terreno a distancias conocidas para realizar un posicionamiento relativo.

#### **4.6.1. Conjunto 1**

Como inicio del experimento se propone realizar un muestreo de las señales de los receptores para verificar su funcionamiento y comportamiento. Este primer conjunto de datos va a servir para verificar la oscilación presente en las posiciones entregadas por los receptores.

La adquisición consta de una muestra por segundo (1 Hz) durante un lapso de 15 minutos. Las tomas se realizaron durante las primeras horas de la tarde.

##### **4.6.1.1. Punto 1**

El primer punto de este conjunto donde se toman los datos es en el techo de la facultad de ciencias exactas de la Universidad Nacional del Centro ubicado en el Campus



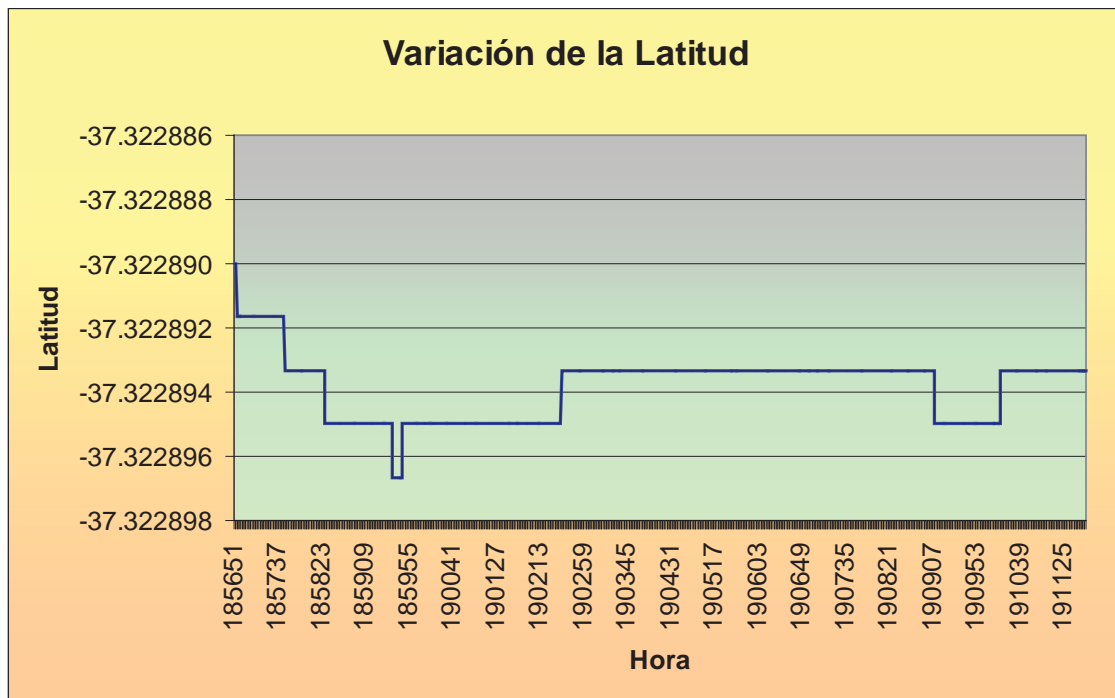
Universitario y cuya posición según Google Earth en latitud es -37.322888 y su longitud -59.082786. En la figura 26 se muestra el punto 1 en el mapa.



**Figura 26.** Punto 1 en el techo de la facultad de ciencias exactas.

Según los datos adquiridos por el receptor GPS estándar, se puede observar en la figura 27 como varía la latitud.

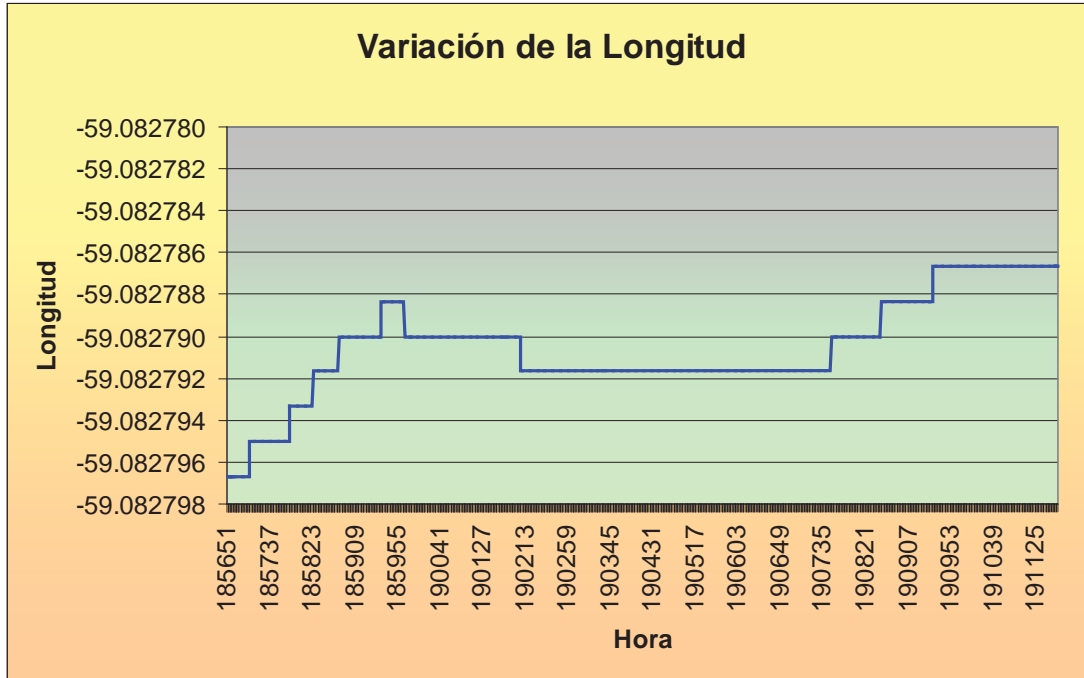
Mínimo	-37.322890
Máximo	-37.322897
Promedio	-37.322894
Oscilación (metros)	0.77



**Figura 27.** Variación de la latitud en el tiempo.

La longitud varía como se muestra en la figura 28.

Mínimo	-59.082787
Máximo	-59.082797
Promedio	-59.082791
Oscilación (metros)	0.89



**Figura 28.** Variación de la longitud en el tiempo.

En el caso de la altitud, se puede observar en la figura 29 un comportamiento de oscilación constante.

Mínimo	217.90
Máximo	208.50
Promedio	212.84
Oscilación (metros)	9.40

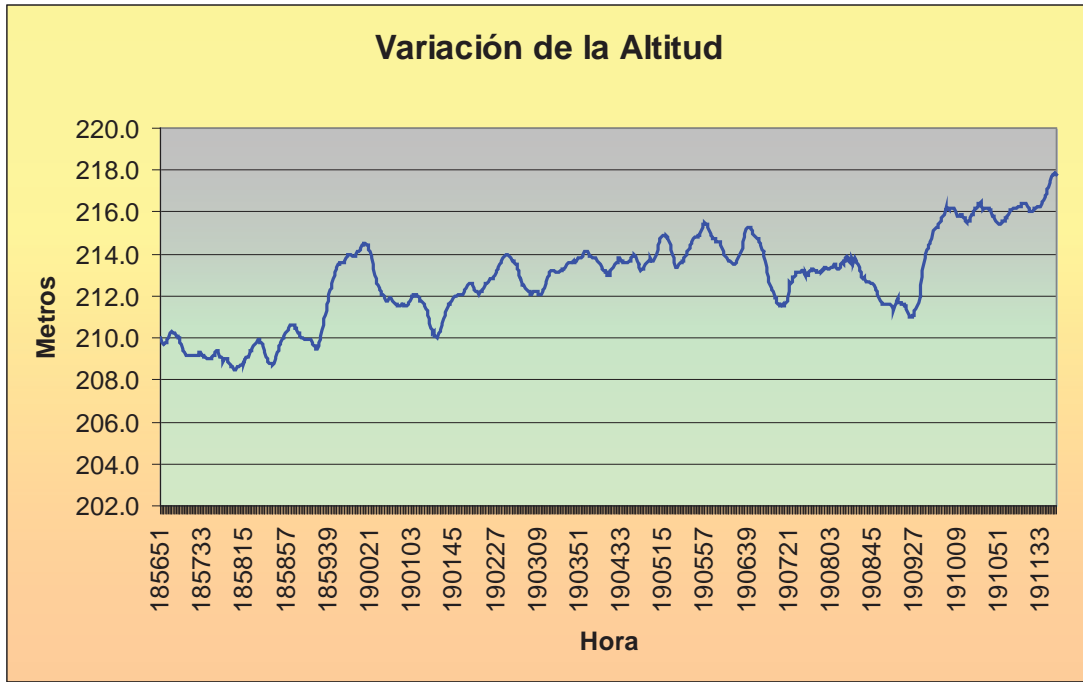


Figura 29. Variación de la altitud en el tiempo.

#### 4.6.1.2. Punto 2

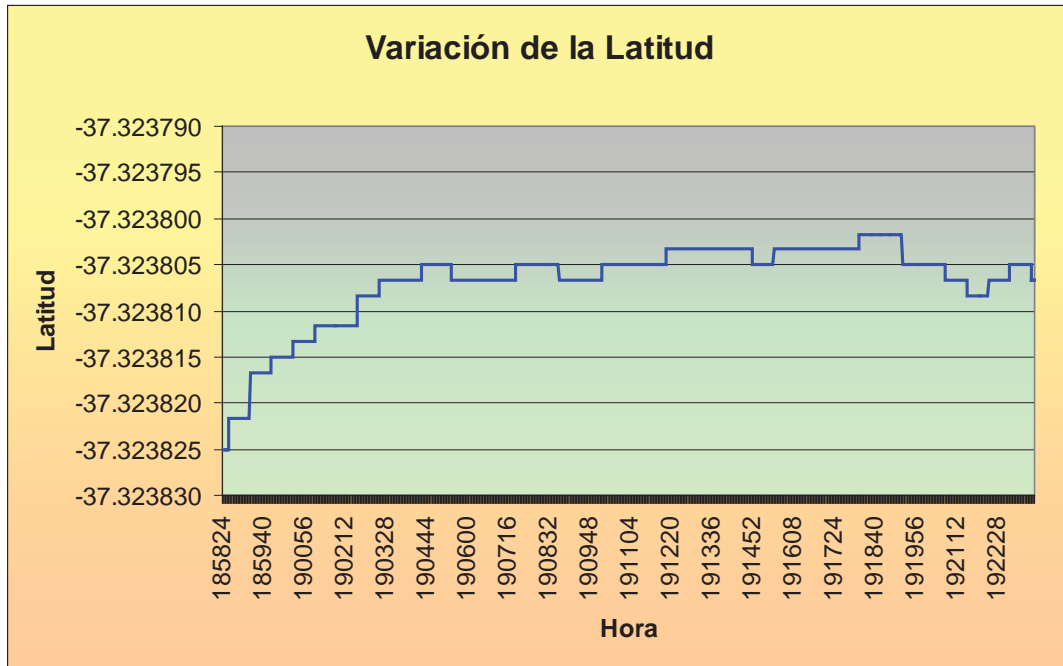
El segundo punto se situó en el portón de salida trasero ubicado en las cercanías del gimnasio del campus de la Universidad Nacional del Centro, cuya posición según Google Earth en latitud es -37.323752 y en longitud es -59.084780. En la figura 30 se muestra el punto 2 en el mapa.



Figura 30. Punto 2 en el portón de salida en cercanías del gimnasio.

Al igual que para el punto 1, se puede apreciar en la figura 31 la oscilación que presenta la latitud.

Mínimo	-37.323802
Máximo	-37.323825
Promedio	-37.323807
Oscilación (metros)	2.55



*Figura 31. Variación de la latitud en el tiempo.*

La longitud también oscila como se presenta en la figura 32.

Mínimo	-59.084778
Máximo	-59.084785
Promedio	-59.084783
Oscilación (metros)	0.62

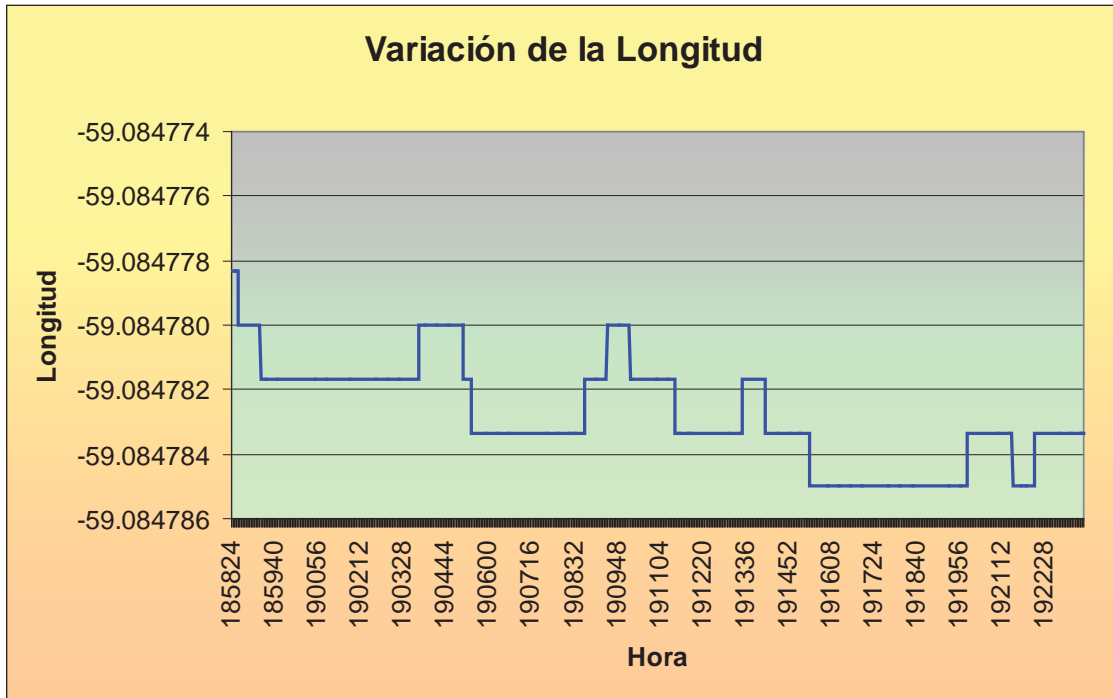


Figura 32. Variación de la longitud en el tiempo.

La altitud varía como muestra la figura 33.

Mínimo	223.90
Máximo	214.00
Promedio	217.47
Oscilación (metros)	9.90

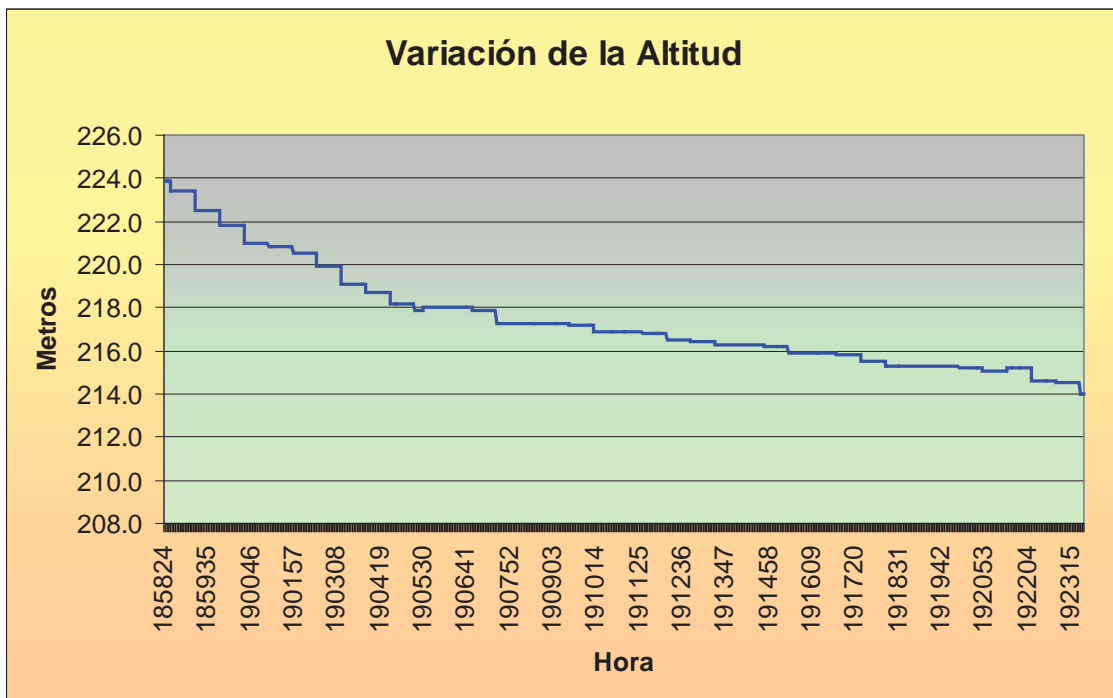


Figura 33. Variación de la altitud en el tiempo.

## 4.6.2. Conjunto 2

Luego de observar la oscilación de las señales en el primer conjunto de datos, se propone hacer una adquisición de datos más extensa y agregando dos puntos más.

Se tomaron datos de cuatro puntos en las inmediaciones del campus universitario durante once días en el período comprendido entre el 15/02/11 y el 02/03/11. Por cada día se hicieron entre cuatro y cinco tomas con intervalos de una hora. Se tomaron diez minutos en cada muestra con una frecuencia de muestreo de 1 Hz.

Se obtuvieron 600 datos por cada toma, entre 2400 y 3000 por día de cada punto. En total en los once días alcanzan entre los 25000 y 33000 datos por cada punto, y entre los cuatro alrededor de entre 100000 y 130000 muestras.

Todas las figuras del conjunto 2 muestran el comportamiento de la señal para el conjunto completo de datos, siendo contemplados del primer al último día inclusive. Por ello, el eje  $x$  deja de ser la hora y pasa a ser la fecha de la toma.

### 4.6.2.1. Punto 1 - Portón

El primer punto, que es el mismo punto 2 del conjunto 1, se ubica en el portón de salida en inmediaciones del gimnasio del campus como se muestra en la figura 34 y cuya posición según Google Earth en latitud es  $-37.323752$  y en longitud  $-59.084780$ .



*Figura 34. Punto 1 en el portón cercano al gimnasio del campus universitario.*

La componente latitud de la posición según el GPS estándar varía como se ve en la figura 35.

Mínimo	-37.323867
Máximo	-37.323680
Promedio	-37.323771
Oscilación (metros)	20.75

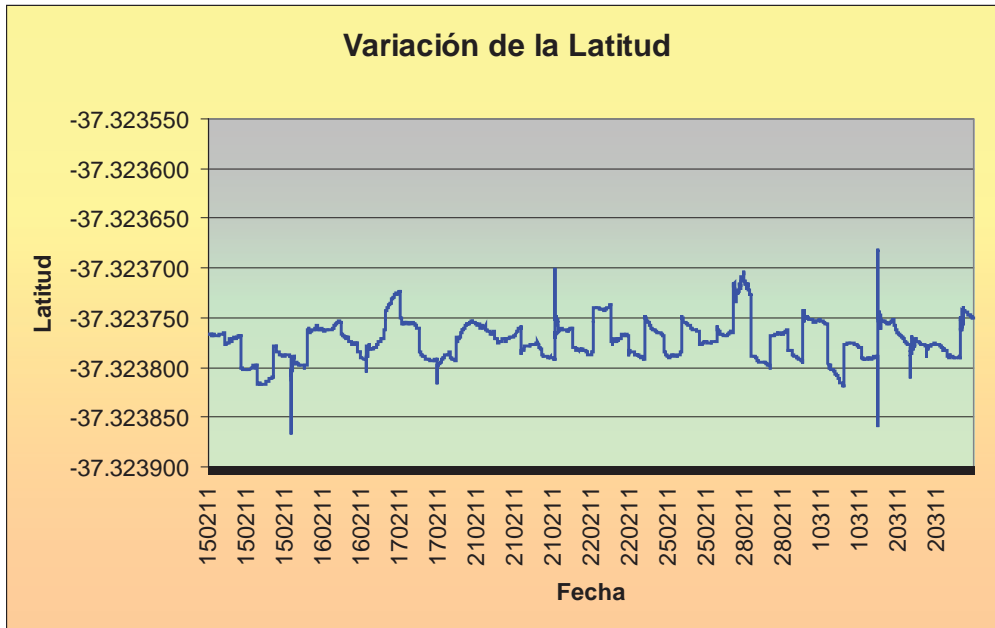


Figura 35. Variación de la latitud en el tiempo.

La longitud también presenta una oscilación como muestra la figura 36.

Mínimo	-59.085003
Máximo	-59.084565
Promedio	-59.084791
Oscilación (metros)	38.98

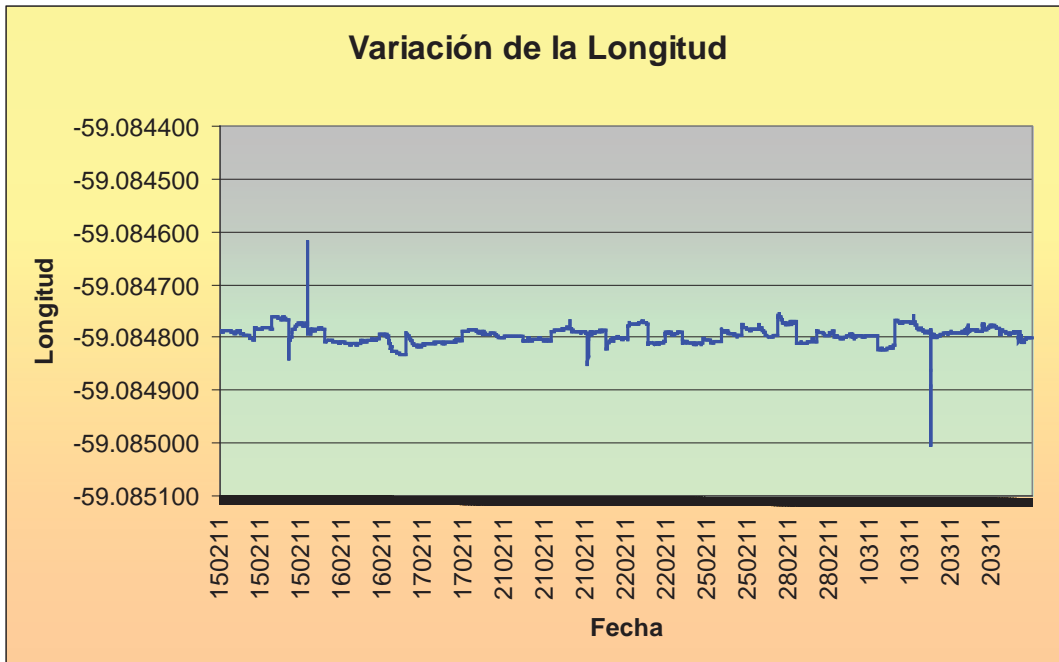


Figura 36. Variación de la longitud en el tiempo.

De la altitud puede verse su constante variación en la figura 37.

Mínimo	193.2
Máximo	219.7
Promedio	207.7
Oscilación (metros)	26.5

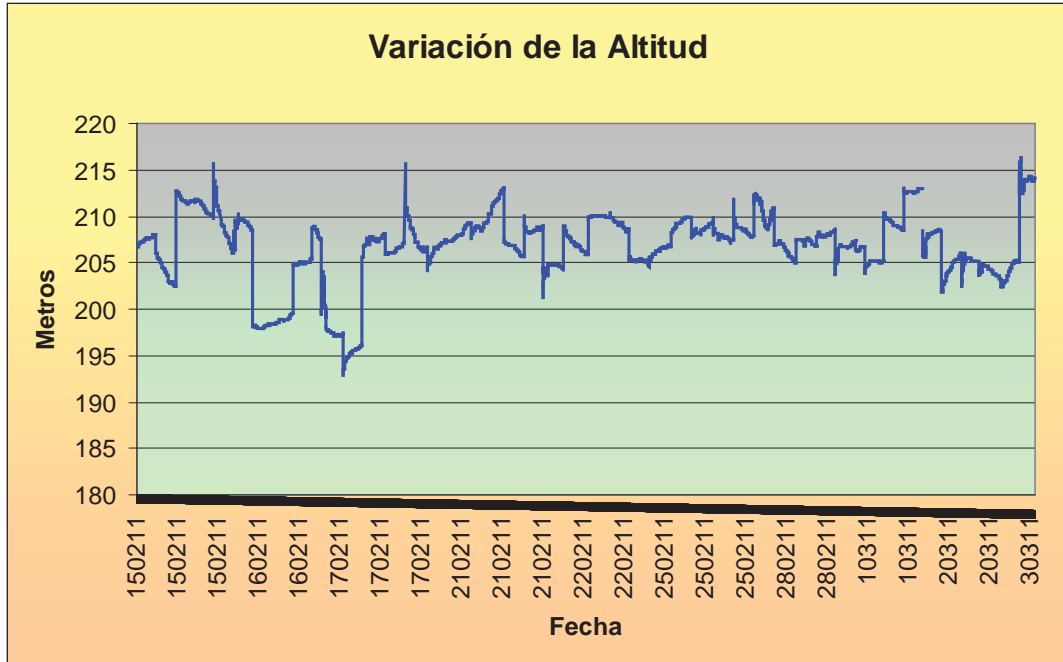


Figura 37. Variación de la altitud en el tiempo.

Dado que al momento de tomar las muestras para el segundo conjunto, se exploraron algunas de las técnicas, se ponen a prueba con estos datos. Se implementa un filtro de Kalman estático. En la figura 38 se puede observar el patrón de cada componente (latitud y longitud) originalmente entregado por el sistema GPS sin tratamiento alguno de color rojo. Además, se observa como queda la señal luego de pasar por el filtro de Kalman en color verde.

Se verifica como se suaviza dicha señal al ser procesada por el filtro. Por otro lado, se observa que la señal pura tiene mucho ruido lo cual hace difícil obtener una componente estable en el tiempo.



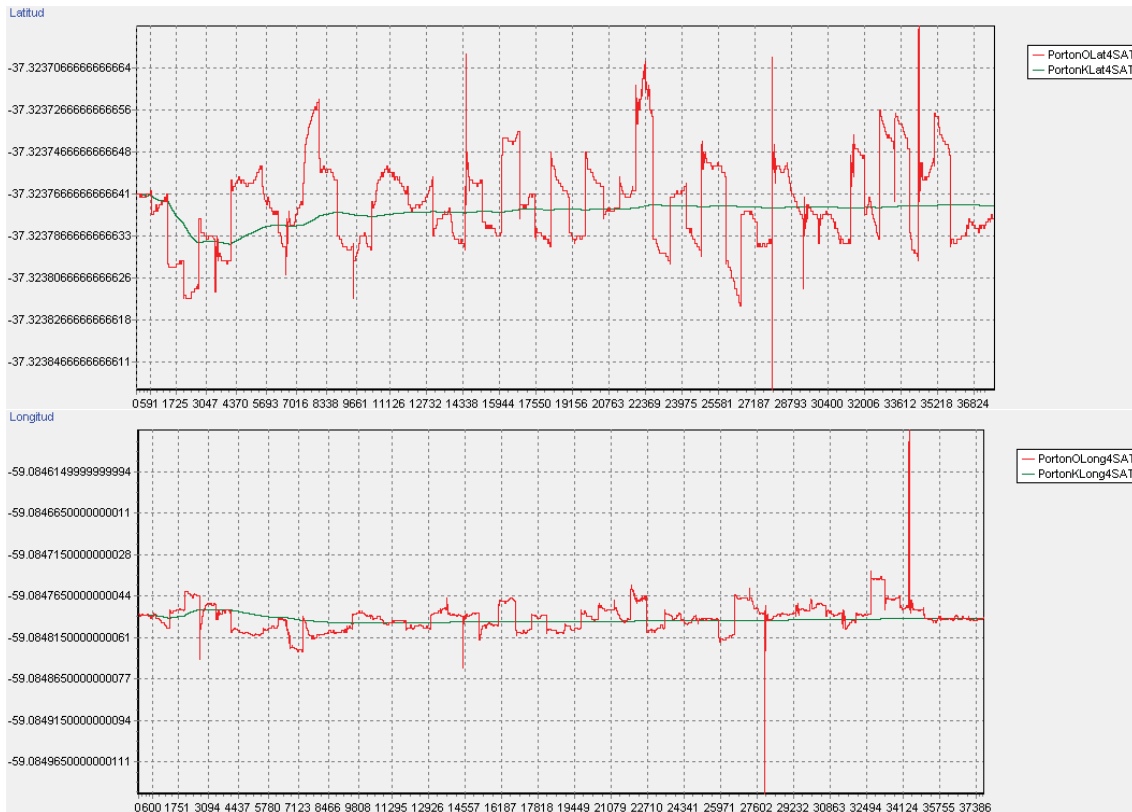


Figura 38. Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.

#### 4.6.2.2. Punto 2 - 3Mts Portón

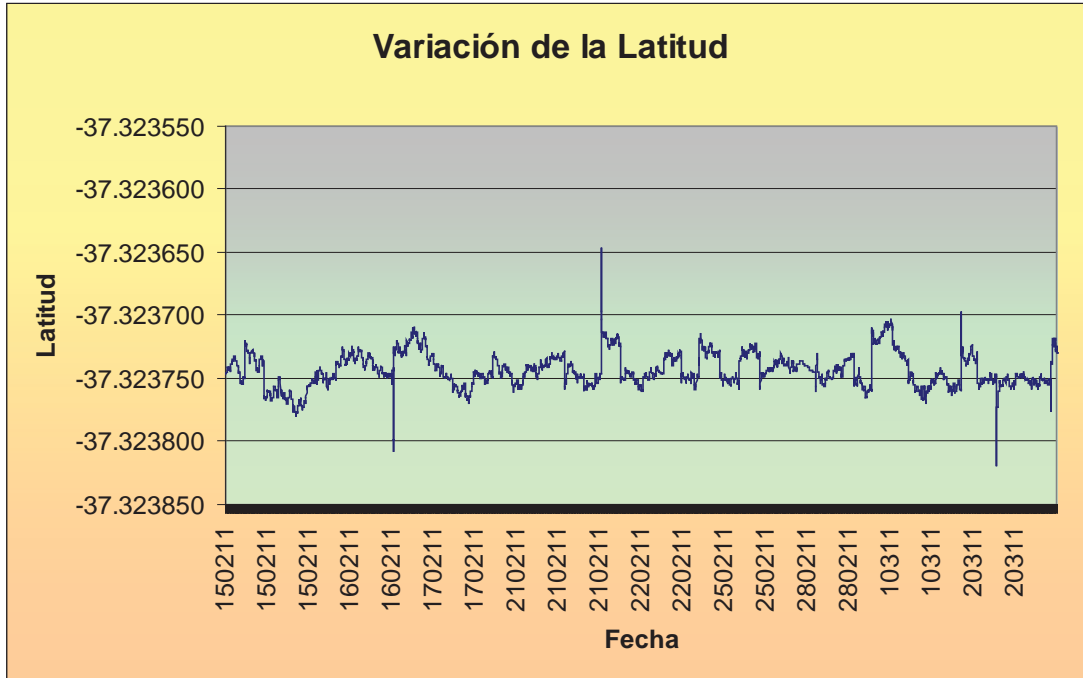
El segundo punto se sitúa a tres metros del punto 1 para tener una referencia de la distancia, como se muestra en la figura 39 y cuya posición según Google Earth en latitud es -37.323741 y en longitud es -59.084752.



Figura 39. Punto 2, a 3 metros del portón de salida en cercanías del gimnasio.

De la adquisición de datos se observa, en la figura 40, como varía la latitud.

Mínimo	-37.323827
Máximo	-37.323647
Promedio	-37.323743
Oscilación (metros)	19.97



**Figura 40.** Variación de la latitud en el tiempo.

En cuanto a la longitud su comportamiento se puede ver en la figura 41.

Mínimo	-59.084902
Máximo	-59.084608
Promedio	-59.084760
Oscilación (metros)	26.16

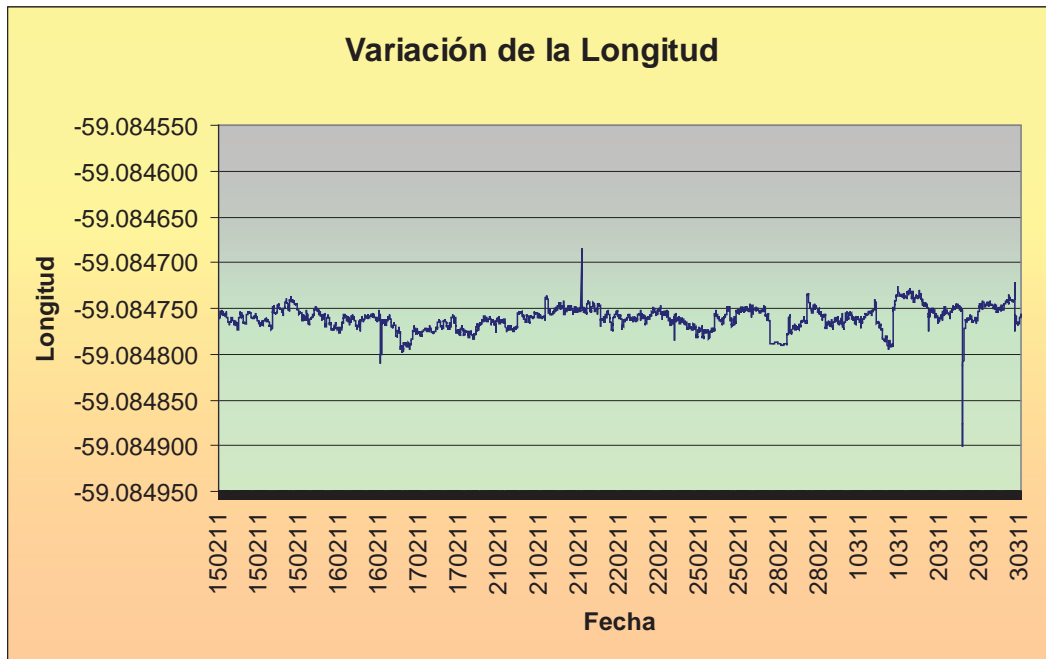


Figura 41. Variación de la longitud en el tiempo.

La altitud también sufre oscilaciones como muestra la figura 42.

Mínimo	196.8
Máximo	238.2
Promedio	208.4
Oscilación (metros)	41.40

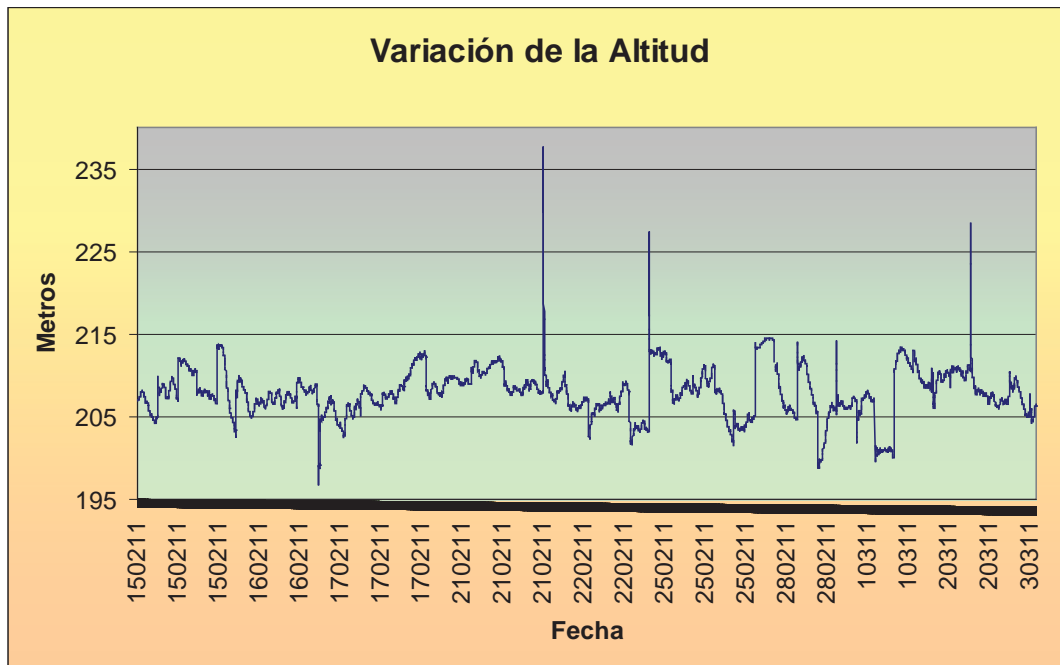
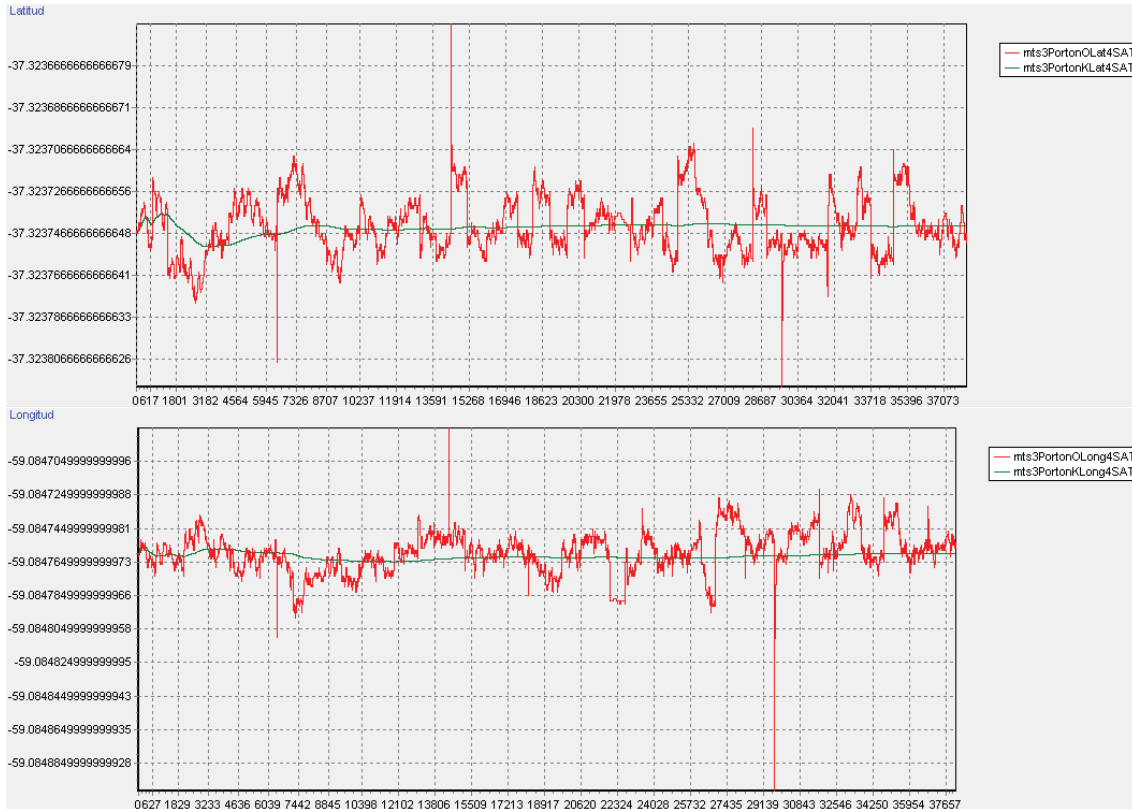


Figura 42. Variación de la altitud en el tiempo.

Luego de aplicar el Filtro de Kalman se obtienen los resultados mostrados en la figura 43. Allí se puede observar, al igual que en el punto 1, el patrón de cada componente

(latitud y longitud) originalmente entregado por el sistema GPS sin tratamiento alguno en color rojo. Además, se observa como se suaviza dicha señal al ser tratada en color verde.



*Figura 43. Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.*

#### 4.6.2.3. Punto 3 - Columna

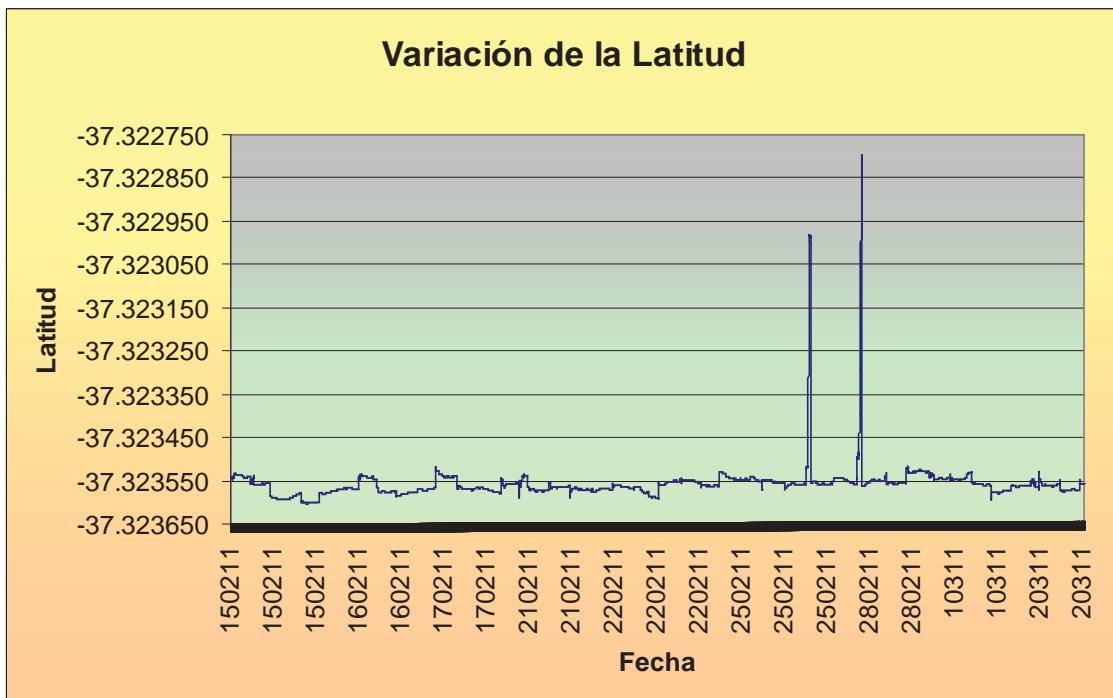
El tercer punto se establece en una columna de luz ubicada a escasos metros del gimnasio del campus como se muestra en la figura 44 y cuya posición según Google Earth en latitud es -37.323563 y en longitud es -59.083711.



**Figura 44.** Punto 3 - Columna de luz en cercanías del gimnasio.

En la figura 45 se puede ver como oscilaron los valores para la latitud. En este caso se puede observar como en algunos días se disparan los valores entregando picos muy altos con respecto a los valores obtenidos para otras muestras.

Mínimo	-37.323603
Máximo	-37.322800
Promedio	-37.323561
Oscilación (metros)	89.12



**Figura 45.** Variación de la latitud en el tiempo.

En cuanto a la componente de longitud y según se observa en la figura 46, también se puede observar un comportamiento similar en los mismos días en que la latitud sufrió oscilaciones extremas.

Mínimo	-59.083855
Máximo	-59.082387
Promedio	-59.083780
Oscilación (metros)	130.66

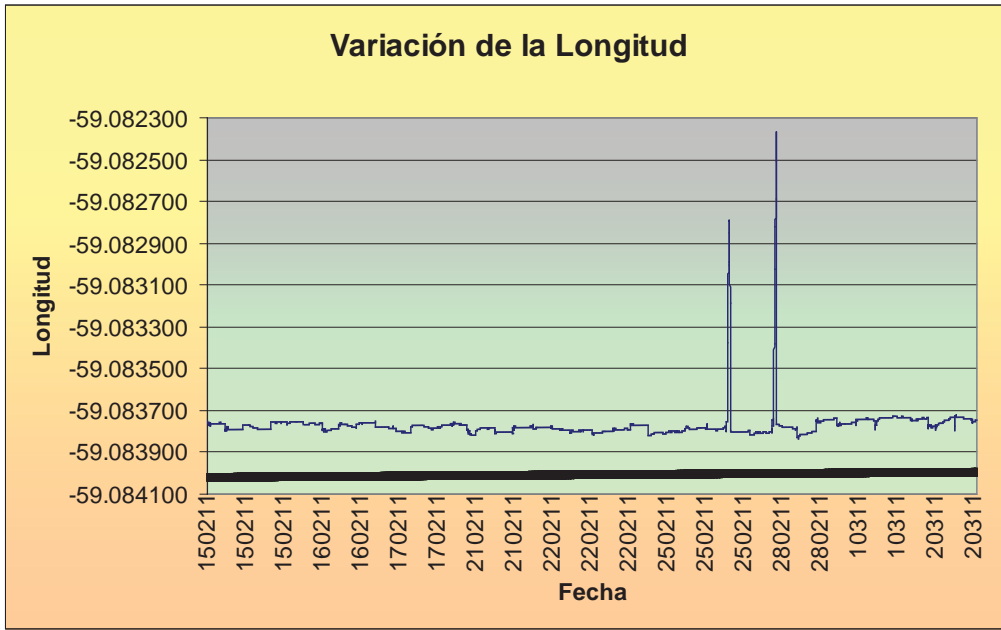


Figura 46. Variación de la longitud en el tiempo.

En altitud, la oscilación no deja de estar presente como se ve en la figura 44.

Mínimo	202.0
Máximo	221.6
Promedio	211.8
Oscilación (metros)	19.60

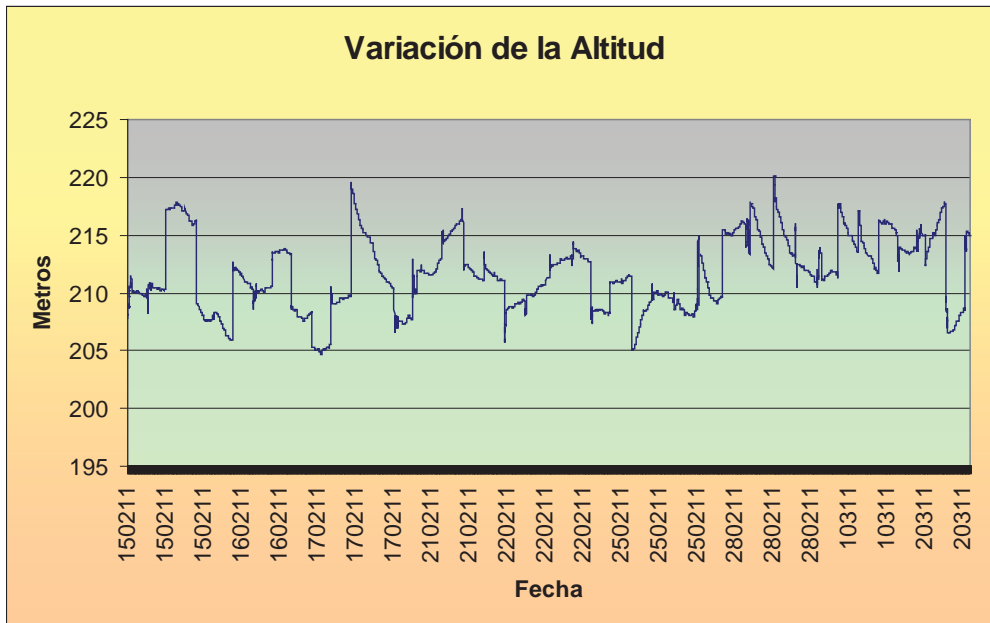


Figura 47. Variación de la altitud en el tiempo.

En la figura 48 se puede observar en color rojo la oscilación de la señal pura y en verde como se suaviza luego de aplicar el filtro de Kalman.

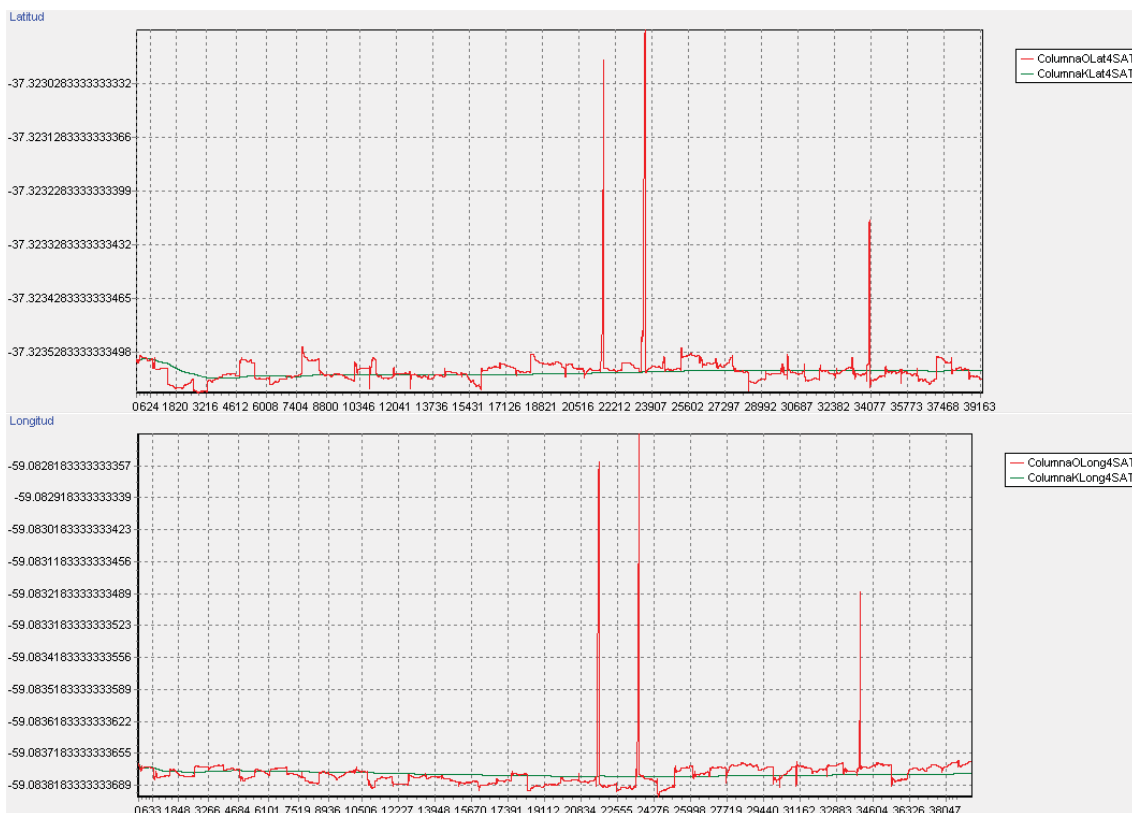


Figura 48. Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.

#### 4.6.2.4. Punto 4 - 3Mts Columna

El último punto tomado está ubicado a tres metros del punto 3 como se muestra en la figura 49 y cuya posición según Google Earth en latitud es -37.323562 y en longitud es -59.083711.



*Figura 49. Punto 4 a 3 metros de la columna de luz en cercanías del gimnasio.*

Las posiciones de Latitud varían notando un comportamiento similar, en uno de los días (28/02/11), al punto 3 tomado y presentado recientemente. La figura 50 muestra esta situación.

Mínimo	-37.323673
Máximo	-37.321832
Promedio	-37.323563
Oscilación (metros)	204.32



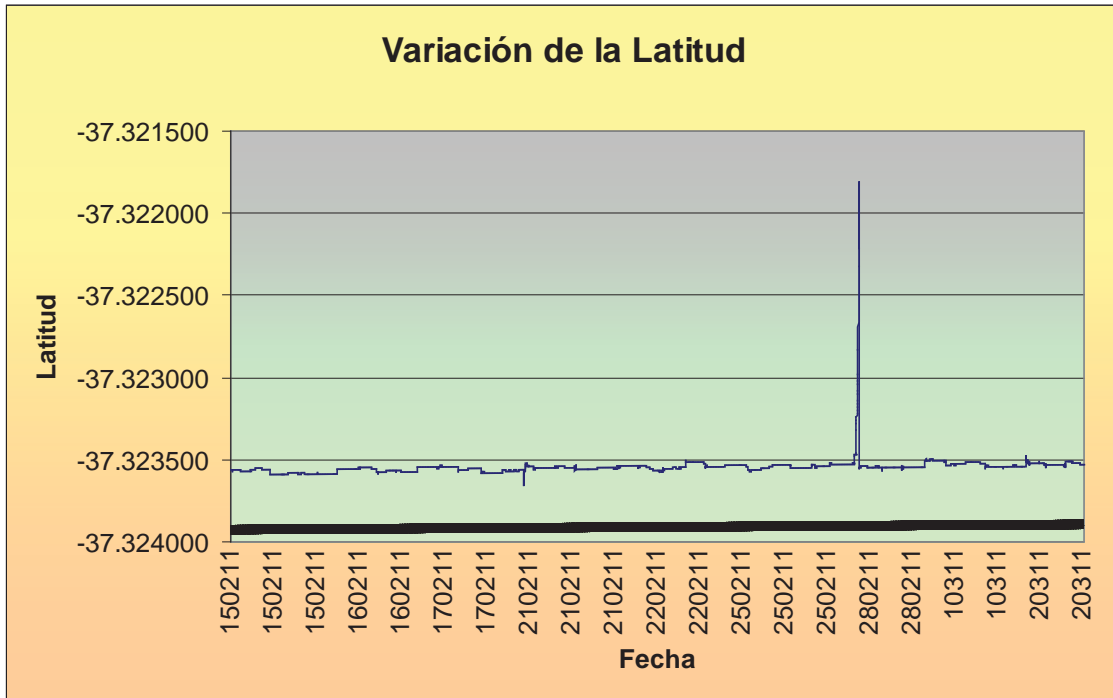


Figura 50. Variación de la latitud en el tiempo.

Para la longitud vuelve a repetirse la situación del punto 3 Aquí también la longitud tiene un comportamiento parecido a la latitud en un día particular. En la figura 51 se puede observar esta situación.

Mínimo	-59.083903
Máximo	-59.080312
Promedio	-59.083786
Oscilación (metros)	319.63

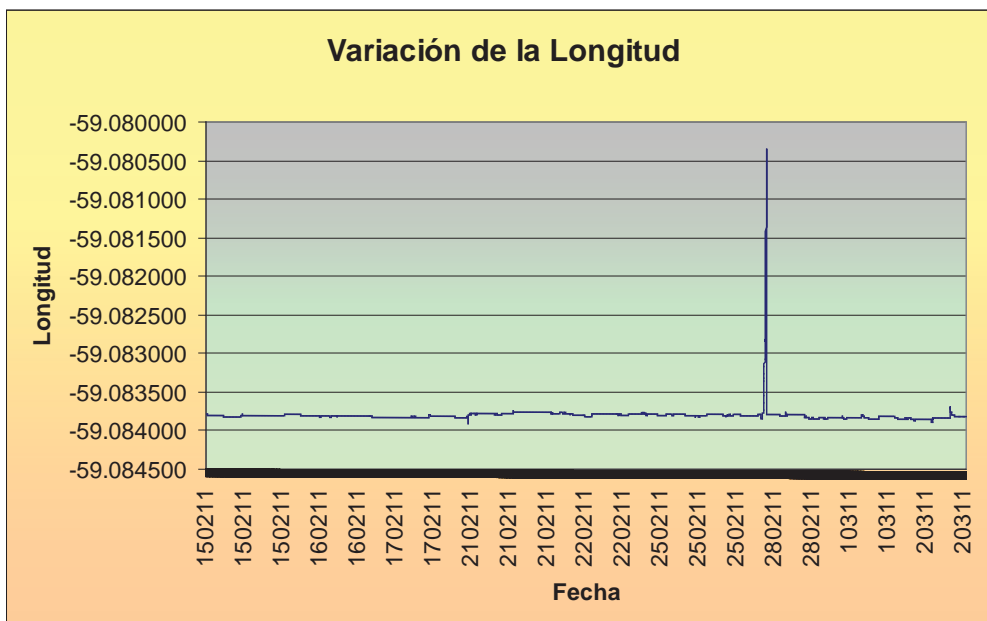
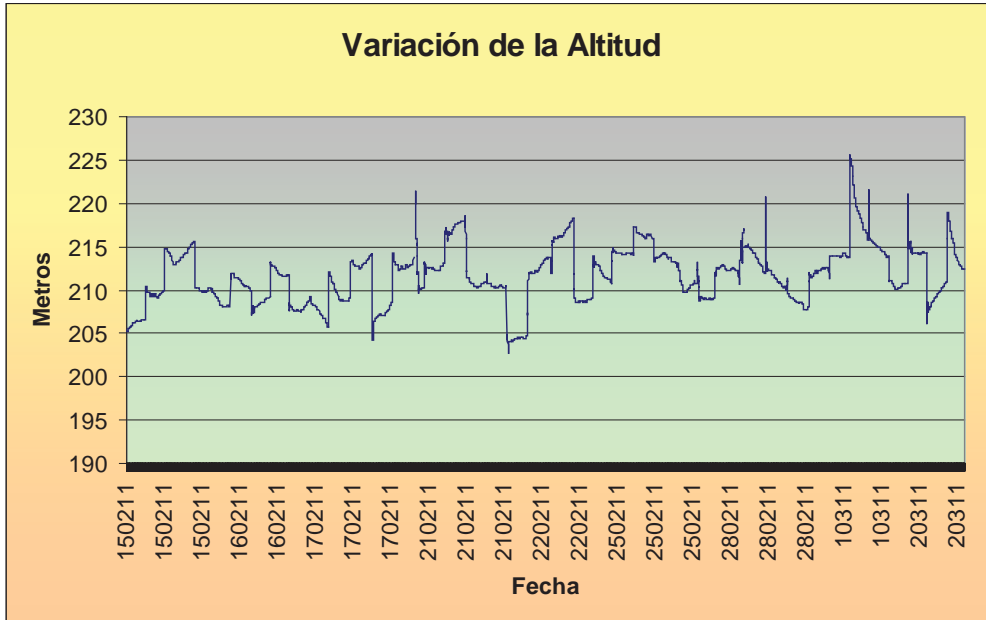


Figura 51. Variación de la longitud en el tiempo.

La altitud sigue mostrando una oscilación notable como muestra la figura 52.

Mínimo	200.2
Máximo	236.2
Promedio	211.9
Oscilación (metros)	36.00



**Figura 52.** Variación de la altitud en el tiempo.

En la figura 53 se observa el mismo comportamiento que en los tres casos anteriores donde la señal tratada con el filtro de Kalman se estabiliza en un valor, representada en color verde, respecto de la original mostrada en color rojo.

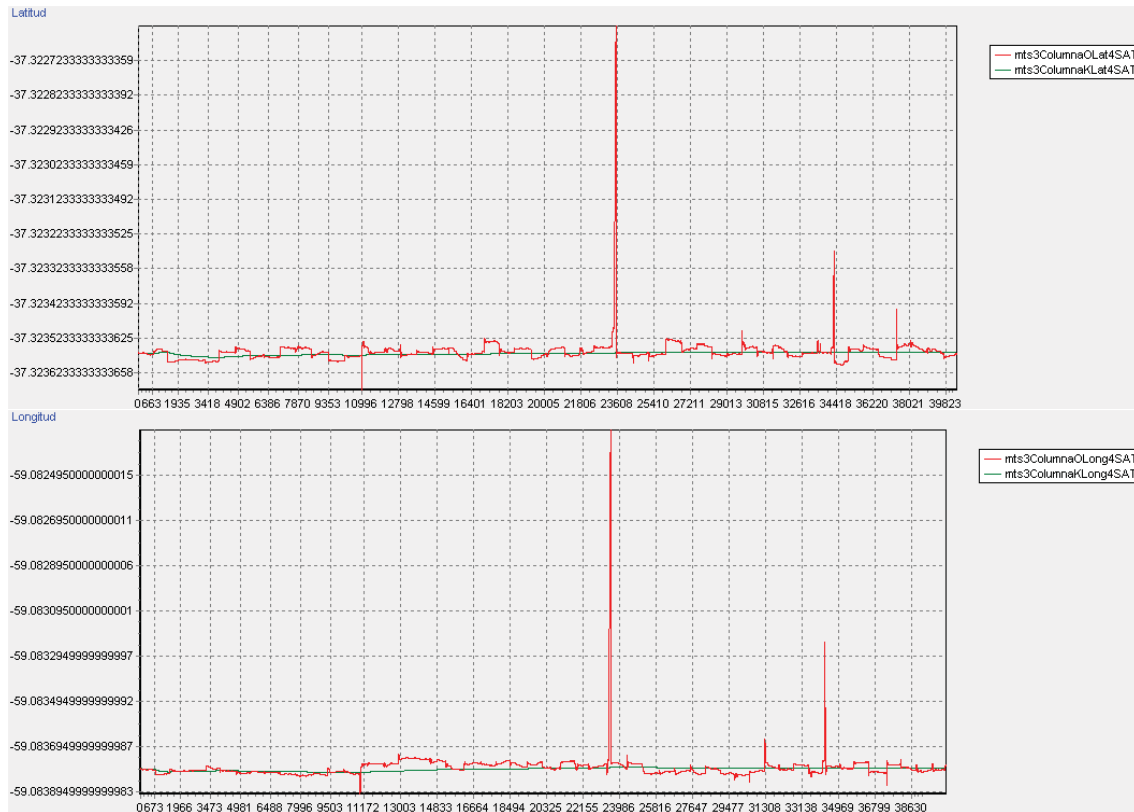


Figura 53. Señales originales del GPS y con el filtro de Kalman aplicado.

### 4.6.3. Conjunto 3

En el tercer conjunto los puntos están anclados en el terreno con marcas de precisión. Se realizaron en inmediaciones del Gimnasio del Campus Universitario. En total son seis puntos (A, B, C, D, GPS 1 y GPS 2) como mostraba la figura 25 en la sección 4.5.

Los receptores, GPS 1 y 2 quedan fijos conformando la estación base de posicionamiento relativo. El receptor GPS 3, que hace de sistema móvil, en principio queda fijo en la posición “Punto D” hasta que el sistema se estabiliza. Una vez estable, el GPS 3 se traslada a los diferentes puntos (A, B y C).

La toma de datos se realiza durante varias franjas horarias distribuidas en diferentes días a razón de una por segundo obteniendo un total de 486000 muestras de los tres receptores GPS. Se generan gran cantidad de datos que deben ser procesados y analizados para poder calificar las técnicas propuestas.

### 4.7. Solución propuesta y aportes

Luego de indagar la bibliografía en pos de encontrar las mejores técnicas para mitigar la falta de precisión en la posición entregada por el sistema GPS, se arriba a la implementación de algunas de ellas con resultados que serán mostrados más adelante.

El experimento que se lleva a cabo tiene como finalidad obtener el error del GPS para realizar la corrección necesaria con el objetivo de mejorar la precisión.

Se basa en el principio de la metodología adoptada por el DGPS, pero en este caso, con receptores GPS estándar de bajo costo. Para obtener las mediciones, se utilizan tres receptores GPS Garmin 18X USB conectados a dos notebooks. La estación base de posicionamiento relativo se conforma por una notebook y dos de los tres receptores GPS; el móvil por la notebook y el receptor GPS restantes. El vínculo entre la estación base y la móvil es una conexión inalámbrica punto a punto.

En este contexto, en el sistema base se obtienen mediciones de los receptores GPS conectados y luego de un cierto tiempo, necesario para la estabilización del sistema, se estiman dos posiciones. Los receptores se ubican a una distancia conocida entre sí (posicionamiento relativo). Al finalizar la etapa de estabilización, se obtiene una nube de puntos con las posiciones entregadas por los receptores.

Para comprobar la aplicabilidad de las técnicas propuestas y medir su efectividad se selecciona un conjunto de muestras a ser procesadas. El conjunto elegido es el número 3 que se divide en 3 días. Para el primer día se hicieron dos mediciones de las cuales se obtuvieron los primeros 10 minutos para las pruebas. De esos 10 minutos, 5 se utilizaron para la estabilización del sistema como forma de suavizar los errores producidos en el arranque en frío. Los 5 minutos restantes, se usaron para estimar los errores del sistema y empezar a generar las correcciones. Dichas correcciones se generaban cada 30 segundos a manera de prueba y para no saturar el canal de comunicación. Para el segundo día, sólo hay una medición pero no se usó para testear las técnicas. Por último, el tercer día se realizaron tres mediciones. De ellas también se obtuvieron los primeros 10 minutos de los cuales se usaron 5 para estabilizar y 5 para generar las correcciones. Las correcciones en cambio en este caso se generaban cada 1 segundo.

Se realizaron medidas desde diferentes posiciones. Para el primer día el receptor móvil siempre se puso en la posición representada por el punto D según mostraba el diagrama en la figura 25 de la sección 4.5. En cambio, para el tercer día, se posicionó el receptor en los puntos A, B y C.

Para medir la efectividad de las técnicas se trabaja con la totalidad de las muestras (los 10 minutos) obteniendo un estado de las mediciones al terminar este tiempo. Además, se prueba también con el 95% de las muestras obtenidas luego de la estabilización del

sistema, las cuales se ordenan de mayor a menor por el error absoluto y se establece esa medida como un máximo.

Todas las técnicas son probadas mediante una herramienta desarrollada (ver Anexo I) especialmente para ello. La herramienta permite aplicar alguna o todas las técnicas en tiempo real y fuera de línea. La opción de hacerlo en tiempo real permite tener una corrección del error mientras se está navegando. Por otro lado, hacerlo fuera de línea permite la repetición de experimentos con los mismos datos procesados en tiempo real y poder así decidir que técnica resulta óptima para tratar la información.

#### **4.7.1. Metodología de cálculo del error**

En esta sección se presenta una visión general del problema para luego abordar las técnicas específicas. Esta metodología presentada va a permitir proponer diversas técnicas que apunten a mitigar el error.

La falta de precisión del GPS, como se mencionó anteriormente en la sección 2.5.7.9.2, depende de varios factores. Al obtener datos de una posición con un receptor estándar se obtiene una nube de puntos debido a la gran dispersión que tienen las posiciones entregadas. Esta dispersión puede ser analizada y tratada de muchas formas. En esta sección se muestran las alternativas existentes que aportan alguna mejora significativa al aumento de la precisión posicional relativa del GPS. En general, cuando se capturan datos de un receptor se obtienen coordenadas en tres ejes: latitud, longitud y altitud. En este análisis se incluyen dos de las tres coordenadas quedando para futuro análisis la altitud. En la figura 54 se pueden observar las nubes de puntos formadas por los dos receptores de la base de referencia, situados entre sí a una distancia conocida. La dispersión representada por los puntos negros redondos puede resultar perjudicial al momento de necesitar una posición definida y exacta. La estimación de una posición se puede realizar por diferentes técnicas, como será presentado más adelante, obteniendo una posible posición como la representada por el rombo verde.

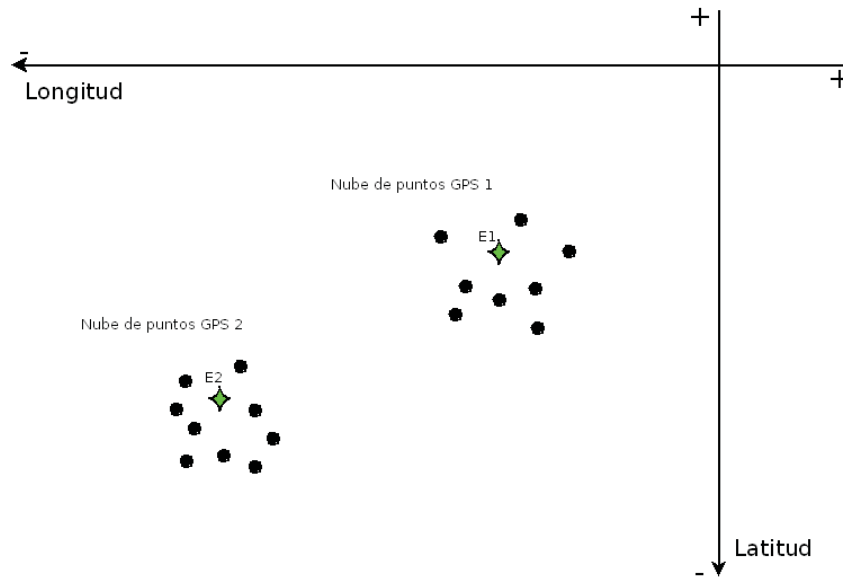


Figura 54. Puntos estimados E1 y E2.

Con ambas posiciones estimadas (E1 y E2) se procede a calcular la distancia entre ellas. Si la distancia calculada es distinta a la real (más/menos un umbral) se detecta que hay un error de posicionamiento. Para el caso de la figura 55 la distancia calculada con los puntos estimados es mayor a la real.

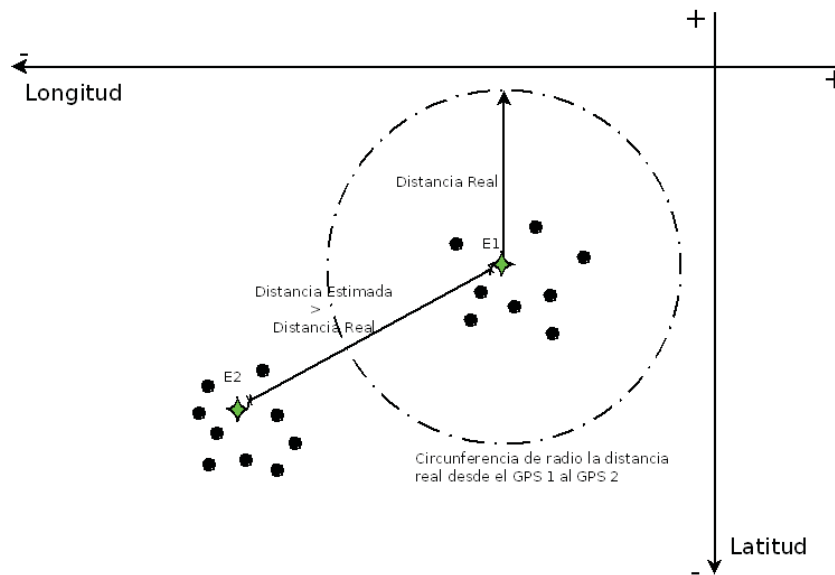


Figura 55. Distancia estimada vs. distancia real.

Además, la figura 55 muestra una circunferencia con un radio igual a la distancia real tomada con una cinta métrica desde el GPS 1 al GPS 2 con centro en el punto estimado

para el GPS 1. Se elige una circunferencia ya que el GPS 2 puede estar a esa distancia pero en cualquier punto de la circunferencia. Este es el principio de funcionamiento que utilizan los sistemas globales de navegación por satélite para obtener las posiciones de los receptores (Grewal *et al.* 2007).

Luego de calcular la distancia de los puntos estimados y contrastarla con la real se deduce que hay un error de posicionamiento. Una vez que se sabe que hay un error se procede a calcular su magnitud y dirección.

En primer lugar, se conocen los dos puntos estimados entonces se traza la recta de E1 a E2 que los une. La ecuación 40 pertenece a la recta que pasa por dos puntos.

$$\frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} = \frac{(x - x_1)}{(x_2 - x_1)}$$

*Ecuación 40. Recta que pasa por dos puntos.*

donde las  $x$  representan la componente de longitud y las  $y$  de latitud.

Por otro lado, se sabe que el GPS 2 se encuentra en algún punto de la circunferencia con centro en el GPS 1 y con un radio igual la distancia que se define al momento de posicionar los dos receptores. La ecuación 41 pertenece a la circunferencia con centro en  $(x_1, y_1)$  de radio  $r$ .

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = r^2$$

*Ecuación 41. Circunferencia de radio  $r$ .*

Conociendo las ecuaciones de la recta que pasa por ambos puntos estimados y la ecuación de la circunferencia de radio igual a la distancia GPS 1-GPS 2 con centro en GPS 1, se procede a calcular su intersección. Dicha intersección se presenta como un polinomio de segundo grado que se resuelve matemáticamente y se obtienen los coeficientes  $a$ ,  $b$  y  $c$  (ecuaciones 43, 44 y 45). La ecuación 42 solamente presenta un cálculo auxiliar de tal manera de no repetirlo en las otras operaciones y para hacer más legible el resto de las ecuaciones.

$$divisor = y_2^2 - 2y_2y_1 + y_1^2$$

*Ecuación 42. Cálculo auxiliar del divisor.*

$$a = 1 + \frac{(x_2^2 - 2x_2x_1 + x_1^2)}{divisor}$$

*Ecuación 43. Cálculo del coeficiente  $a$ .*

$$b = -2y_1 + \frac{(-2x_2^2y_1 + 4x_2x_1y_1 - 2x_1^2y_1)}{\text{divisor}}$$

**Ecuación 44.** Cálculo del coeficiente b.

$$c = y_1^2 - r^2 + \frac{(x_2^2y_1^2 - 2x_2x_1y_1^2 + x_1^2y_1^2)}{\text{divisor}}$$

**Ecuación 45.** Cálculo del coeficiente c.

Con estos coeficientes despejados por medio de Bascara (ecuación 46) se encuentran las raíces del polinomio.

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{(b^2 - 4ac)}}{2a}$$

**Ecuación 46.** Cálculo de las raíces del polinomio de segundo grado por Bascara.

Cabe aclarar que para minimizar los cálculos y poder normalizar se traslada todo a una misma unidad (metros) y se desplaza al (0,0) para luego obtener la diferencia entre E2 y E1.

De las dos raíces halladas (dos por ser de segundo grado) se elige una y se calculan los puntos de intersección. Se elige la más cercana al punto estimado del GPS 2 en alguna de sus componentes, en este caso en latitud, ya que la otra no tiene sentido al estar muy lejos (del otro lado de la circunferencia).

$$\text{resultado}_{\text{latitud}} = \text{raízMásCerca}(y_2, \text{raíces.raíz}_1, \text{raíces.raíz}_2)$$

Por último, se obtiene la otra componente (longitud) en función de la latitud hallada en el punto anterior como se ve en la ecuación 47.

$$\text{resultado}_{\text{longitud}} = x_1 + \left( (x_2 - x_1) * \frac{(\text{resultado}_{\text{latitud}} - y_1)}{y_2 - y_1} \right)$$

**Ecuación 47.** Cálculo de la Longitud en base a la latitud hallada.

Con estas operaciones se logra obtener el punto corregido como muestra la figura 56, el cual se encuentra exactamente en la intersección de la recta y la circunferencia.



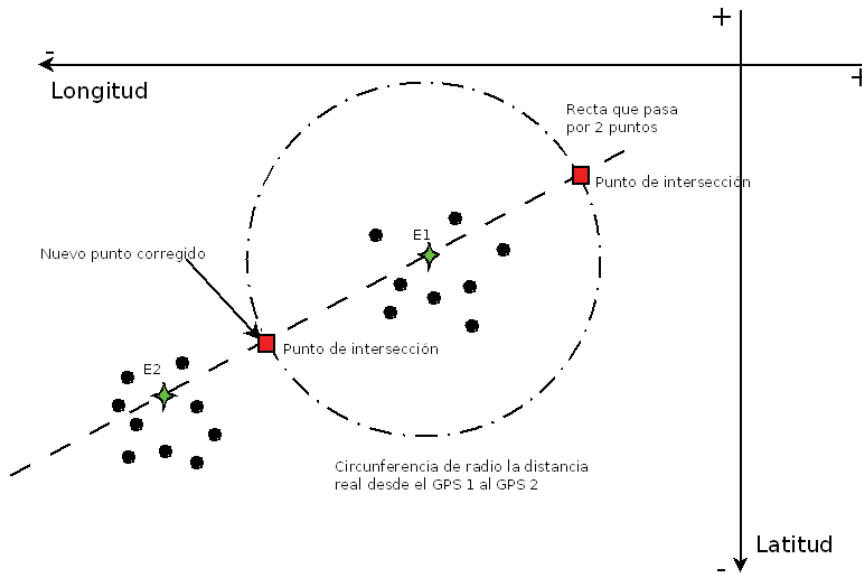


Figura 56. Punto corregido en la intersección de la recta con la circunferencia.

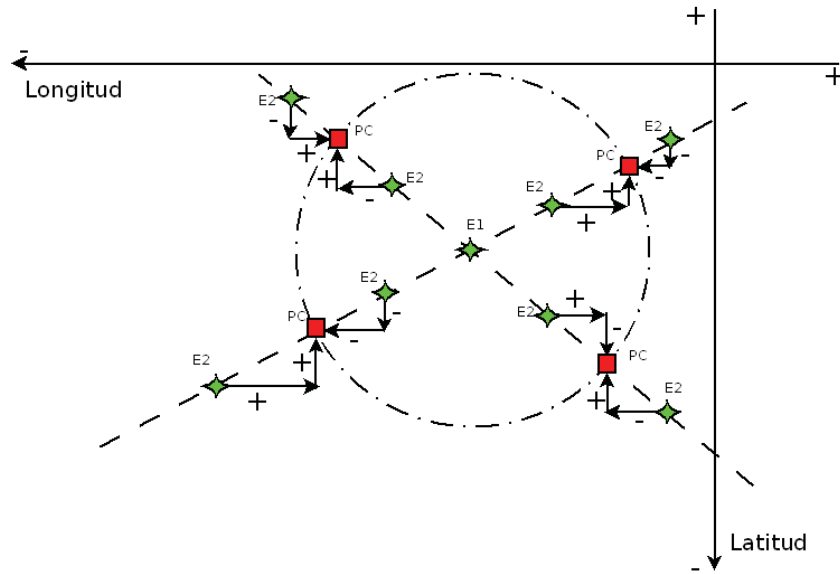
Hasta el momento, se conoce la magnitud del error pero se necesita también obtener la dirección. La dirección del error se puede dar en cualquiera de los cuatro sentidos y la combinación de ellos. Se detectan nueve casos que son combinaciones de dos variables (latitud y longitud) y tres valores (mayor, menor, igual) como muestra la tabla 9.

	Estimada	
	Latitud	Longitud
1	Mayor a	Mayor a
2	Mayor a	Menor a
3	Mayor a	Igual a
4	Menor a	Mayor a
5	Menor a	Menor a
6	Menor a	Igual a
7	Igual a	Mayor a
8	Igual a	Menor a
9	Igual a	Igual a
	Latitud	Longitud
	Real	

Tabla 9. Determinación de la dirección del error.

La tabla se lee de arriba hacia abajo. Como ejemplo, en la tercera fila se muestra el caso cuando la latitud estimada es mayor a la real y cuando la longitud estimada es igual a la real. Para el caso donde ambas componentes son idénticas se presenta en la novena fila,

donde no hay corrección. La figura 57 muestra como se obtiene la dirección para cada caso.



**Figura 57.** Determinación de la dirección del error encontrado.

En este análisis, las latitudes y longitudes son negativas ya que la región donde se desarrolla el experimento se encuentra al Oeste del meridiano de Greenwich y al Sur del Ecuador. Por este motivo, todos los datos y resultados encontrados se trabajan en el tercer cuadrante como muestra la figura 57.

Por lo tanto, para obtener la dirección del error se procede a verificar de qué lado del punto corregido se encuentra el punto estimado. Si la recta que pasa por los puntos E1 y E2 es horizontal o vertical, se anulan algunas de las componentes; en el caso horizontal se elimina la latitud y en el vertical la longitud. Por ello no hay correcciones en esas componentes.

Finalmente, en la figura 58 se observa la magnitud y dirección del error encontrado para el caso de estudio presentado.

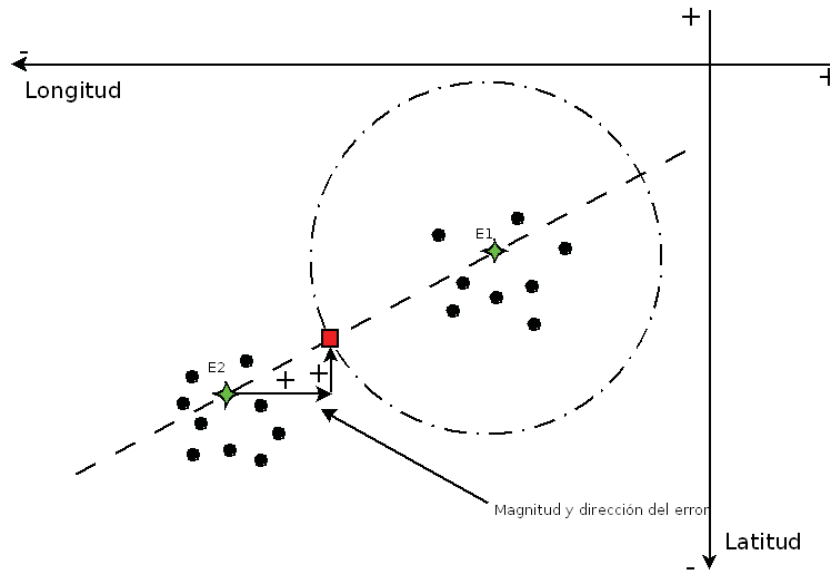


Figura 58. Magnitud y dirección del error.

A continuación se presenta un análisis de la estimación de los puntos E1 y E2 mediante diversas técnicas. Dependiendo de la técnica elegida se obtienen diferentes resultados que pueden variar la mejora en la precisión, pero depende de la simpleza del método y de la potencia de cálculo de la plataforma donde se ejecute el sistema se podrá implementar una u otra.

#### 4.7.2. Estimación de la posición mediante el Promedio

Luego de realizar una búsqueda de los métodos tradicionales que se usan para estimar una posición, se encuentra que algunos realizan la estimación promediando los valores entregados por el receptor. Entre sus ventajas se puede mencionar la simple implementación y la baja carga de procesamiento lo cual permite ser usado en variadas aplicaciones y diferentes plataformas de trabajo. El problema que presenta es que se ve afectado por valores extremos; valores muy altos tienden a aumentarlo mientras que valores muy bajos tienden a reducirlo, lo que implica que puede dejar de ser representativo de la población. El resultado de estimar la posición por medio de esta técnica se puede observar en la sección 5.3.

#### 4.7.3. Estimación de la posición mediante la Moda

La moda está representada por el valor que más se repite en una serie de datos. Su ventaja radica también en su implementación pero requiere mayor carga de procesamiento ya que en todo momento se debe saber el historial de los valores que

ocurrieron y su frecuencia. La desventaja es que en aplicaciones donde la dispersión es muy grande no es aplicable esta técnica. El resultado de su aplicación se puede ver en la sección 5.4.

#### **4.7.4. Estimación de la posición mediante el Filtro de Kalman**

Un problema de estimación con tantos datos ruidosos redundantes es una aplicación natural para el filtro de Kalman, lo que permite usar algo de la información redundante para remover los efectos de las fuentes de error. El filtro de Kalman es usado para eliminar el ruido blanco Gaussiano (Eom & Lee 2010).

Para poder implementar este filtro es necesario conocer la desviación estándar del error. Los errores mostrados en la tabla 5 de la sección 2.5.7.9.2 son los típicos para el sistema NAVSTAR-GPS. Con estos errores definidos y con información adicional de la geometría de los satélites es posible obtener la desviación estándar instantánea para una posición lo que permite realizar la estimación con este filtro. Como ventaja para este tipo de filtro se puede mencionar que su estimación es más precisa dado que tiene en cuenta los errores instantáneos del sistema. Como desventaja se presenta la carga de procesamiento que requiere poder estimar las posiciones, lo cual depende de la plataforma donde se ejecute. La sección 5.5 analiza los resultados alcanzados con este filtro.

##### **4.7.4.1. Usando filtro de Kalman estático**

El filtro de Kalman estático es un conjunto de ecuaciones matemáticas que proveen una solución recursiva eficiente del método de mínimos cuadrados. Esta solución permite calcular un estimador lineal, insesgado y óptimo del estado de un proceso en cada momento del tiempo ( $t$ ) con base en la información disponible en el momento  $t-1$ , y actualizar, con la información disponible en el momento  $t$ , el valor del estimador.

Su implementación es relativamente sencilla pero no se tiene en cuenta la estimación realizada, es decir, no se hace una verificación que la posición estimada sea la que se obtiene en la próxima medición. Los resultados están presentados en la sección 5.5.1.

##### **4.7.4.2. Usando filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar**

Se llama Kalman dinámico a aquel sistema en el que el valor de la variable  $x$  a estimar tiene un valor que cambia a través del tiempo ( $x_{i+1} \neq x_i$ ) pero estos estados tienen alguna relación conocida entre el instante  $i$  e  $i+1$ . Por ejemplo, si medimos posición de un

objeto se puede predecir que la posición siguiente será como se muestra en la ecuación 48:

$$x_{i+1} = x_i + \Delta t * v_i$$

*Ecuación 48. Predicción de la posición.*

donde  $\Delta t$  es el tiempo transcurrido y  $v_i$  la velocidad en el instante  $i$ . La posición puede ser obtenida por un GPS por ejemplo y la velocidad con un elemento adicional de medición como lo es un acelerómetro.

Este filtro verifica la estimación hecha con la medida en el instante siguiente, lo cual permite ajustar el proceso en cada instante. Aquí se abren dos posibilidades que se tienen en cuenta también en el momento de realizar el experimento. Una es no tener en cuenta esta diferencia entre la posición estimada y la real; y la otra, es que al conocerse se puede introducir como parte de la desviación estándar para las nuevas estimaciones, lo cual permite refinar cada vez más el proceso de estimación.

La desviación estándar del sistema se calcula como la raíz cuadrada de la varianza representada por la suma de los cuadrados de cada error (tabla 5 presentada en la sección 2.5.7.9.2) como mostraba la ecuación 36.

Ahora, la desviación estándar del error pero en la posición del receptor se estima teniendo en cuenta adicionalmente el PDOP y el error numérico, por lo tanto, a la desviación calculada a partir de los errores típicos se le agrega el PDOP ya que para cada medida tomada varía según la geometría instantánea de los satélites. Quedando como resultado la desviación estándar usada para el filtro de Kalman la mostrada en la ecuación 37.

De aquí proviene el hecho de aplicar Kalman con ajuste de la desviación estándar, ya que fluctúa para cada dato proveniente de los receptores en cada momento a medida que varía la geometría de los satélites. Los resultados son mostrados en la sección 5.5.2.

#### ***4.7.4.2.1. Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma)***

En este caso la diferencia entre la posición estimada y la real es agregada como error al proceso de estimación. Esto permite refinar el proceso ajustando la desviación estándar a partir de la diferencia entre la posición estimada y la medida por el dispositivo. Este es el de mayor exigencia en cuanto a procesamiento pero del cual se deberían obtener mejores resultados, los cuales se muestran en la sección 5.5.2.1.

***4.7.4.2.2. Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) y ponderación de la desviación mediante lógica difusa.***

Hasta aquí el filtro de Kalman presentado trabaja teniendo en cuenta la desviación estándar que se va ajustando por medio de la geometría de los satélites o por la diferencia entre la posición estimada y la medida en el siguiente instante.

En esta sección se presenta una novedosa forma de ponderar la desviación estándar mediante la aplicación de lógica difusa. Esta técnica se utiliza para determinar el grado de error que tiene una posición. Las reglas que determinan el error que presenta una posición tienen que ver con analizar algunos parámetros como el PDOP (dilución de la precisión posicional), SNR (relación señal-ruido) y la diferencia de satélites *trackeados*. La salida del sistema difuso pondera la desviación estándar usada por el filtro de Kalman, dándole más peso a la desviación estándar cuyas posiciones tiene mucho error y viceversa.

En la tabla 10 se muestran los valores cualitativos (alto, medio y bajo) correspondientes a los diferentes parámetros (PDOP, SNR y diferencia de satélites) con los cuales se arman las reglas de inferencia. Los valores cuantitativos (0.2, 0.5 y 1) corresponden a la salida que produce el sistema difuso que pondera la desviación típica del error. Los valores se eligen a criterio del autor según los experimentos que se llevan a cabo y la bibliografía indagada.

Diferencia de satélites: <b>Bajo</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	0.5	0.5	1
	Alto	0.2	0.5	1
Diferencia de satélites: <b>Medio</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	1	1	1
	Alto	0.5	1	1
Diferencia de satélites: <b>Alto</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	1	1	1
	Alto	1	1	1

Tabla 10. Reglas de inferencia del sistema difuso.

Los resultados de aplicar esta técnica se pueden ver en la sección 5.5.2.2.

**4.7.4.2.3. Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y sin corrección de sigma.**

En esta sección se pone a prueba la estimación de las posiciones mediante el filtro de Kalman dinámico pero sin retroalimentar la desviación estándar con la diferencia entre la posición estimada y la medida por el dispositivo. La desviación estándar si se pondera por medio de lógica difusa. Los resultados se pueden ver en la sección 5.5.2.3.

**4.7.4.2.4. Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.**

De aquí en adelante, para todos los casos donde se descartan puntos se debe tener en cuenta que: los filtros permiten descartar valores que están fuera de cierto rango permitido. Dependiendo que tipo de valores se filtren se denominan paso bajo o alto. En este caso las mediciones con mucho ruido o error que influyen sobre el resultado final de la estimación de una posición son filtradas. De esta forma las mediciones que tienen mucho error no sesgan la estimación final. La aplicación de estos filtros se puede hacer

ya que las tomas no son muy espaciadas en el tiempo y se supone que el vehículo donde se monta el receptor móvil está quieto o no se desliza a grandes velocidades, como se menciona en la sección 3.5.4, lo que implica que los valores no cambien radicalmente. Se usan filtros paso alto/bajo, de manera análoga a los filtros electrónicos, para los siguientes datos:

- a. Se usan filtros para descartar los mensajes provenientes del receptor cuya cantidad de satélites *trackeados* está fuera del valor requerido. De esta manera no se procesan datos si no cumplen con una cantidad mínima de satélites para obtener la posición.
- b. Se descartan puntos que están fuera de rango. Los atributos elegidos para el descarte de un punto son:
  - PDOP (dilución de la precisión posicional) que representa un factor de calidad de la geometría de los satélites en vista que tiene cada receptor. A menor valor, indica mejor geometría y mayor precisión en los cálculos de posición.
  - SNR (Relación señal ruido) que indica la calidad de la señal recibida. A mayor valor, menor ruido y señal más limpia. Cada fabricante establece un valor y rango óptimos.
  - Magnitud de la diferencia de satélites *trackeados* entre los tres receptores (los dos de la base y el móvil), ya que se parte de la hipótesis de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual a receptores cercanos, cuanto menor sea esta diferencia entre los tres receptores, más correlación va a tener el error encontrado. Por lo tanto, la corrección transmitida al móvil va a ser la misma que tiene dicho receptor ya que está totalmente correlacionada a la de los receptores de la estación base.

Los rangos de valores óptimos para los tres parámetros, a criterio del autor según la bibliografía indagada y los experimentos realizados, se muestran en las tablas 11, 12 y 13 respectivamente.



PDOP			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	1.9	Bueno
Medio	2	2.9	Medio
Alto	>= 3		Malo

Tabla 11. Rango de valores óptimos para el PDOP.

SNR			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	29	Malo
Medio	30	39	Medio
Alto	>= 40		Bueno

Tabla 12. Rango de valores óptimos para el SNR.

Diferencia de satélites			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	0	Bueno
Medio	1	1	Medio
Alto	>= 2		Malo

Tabla 13. Rango de valores óptimos para la diferencia de satélites trackeados.

Luego de aplicar estas técnicas, los resultados se pueden observar en la sección 5.5.2.4.

#### 4.7.4.2.5. Kalman dinámico con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.

En este caso, sólo se usa el filtro de Kalman dinámico pero se procesan aquellos datos que pasen el filtro de descarte de puntos. Mediante esta técnica se persigue no procesar datos que tengan mucho error, además de optimizar la carga de procesamiento. Los resultados de aplicar esta técnica se pueden ver en la sección 5.5.2.5.

#### 4.7.4.2.6. Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos

Aquí se usa la combinación de dos técnicas ya presentadas lo que permite el procesamiento de la información en pasos secuenciales. A diferencia de la técnica anterior, esta prevé la ponderación de la desviación estándar usada en el filtro de Kalman. Los resultados se pueden ver en la sección 5.5.2.6.

***4.7.4.2.7. Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa, descarte de puntos y corrección de sigma.***

Por último, la combinación de las tres técnicas presentadas se pone a prueba con el conjunto de datos y se arriba a los resultados mostrados en la sección 5.5.2.7.

***4.8. Resumen***

Se presentaron los escenarios para la toma de datos mostrándolos en imágenes georreferenciadas por medio de Google Earth. Además, se detallaron las especificaciones técnicas de los materiales usados y qué datos se usaron para ser procesados por las técnicas. Se especificaron los diferentes conjuntos de muestras que se recolectaron y se hizo un análisis de cada una de ellas. Con todo ello ya presentado se procedió proponer una solución. Se mostraron y desarrollaron las técnicas a aplicar a los datos recolectados en las muestras. Con esto queda ahora presentar los resultados de la aplicación de cada una de las técnicas, mostrados en la siguiente sección.

## Capítulo 5

### Métricas de desempeño

#### 5.1. Introducción

En esta sección se presentan las métricas obtenidas luego de aplicar las técnicas propuestas y desarrolladas para mejorar la precisión relativa del GPS.

Se realizan múltiples pruebas y los resultados que se muestran se ordenan de la siguiente manera: en primer lugar se presentan los obtenidos en una instantánea al finalizar el tiempo total del experimento, que en todos los casos es de 10 minutos. En segundo lugar, se obtienen los datos procesados pero se tienen en cuenta sólo aquellos que no forman parte del arranque en frío, es decir, los 5 minutos procesados luego de los 5 minutos de arranque en frío. De los datos obtenidos de estos 5 minutos, se ordenan los resultados de mayor a menor en cuanto al error absoluto y se deja de lado el primer 5%. Con el 95% restante se obtiene el error máximo que se asegura con la implementación de las técnicas.

Para obtener un factor de desempeño del uso de cada técnica, en todos los casos, se procede a calcular las distancias a los diferentes receptores de manera tal de obtener el error absoluto medido para cada par de receptores.

#### 5.2. Resultados derivados de las técnicas generales

El estudio de funciones matemáticas y trigonométricas aplicadas a problemas computacionales permite proponer su uso con el fin de mejorar la precisión. Para ello, primero se debe analizar el problema de forma general y luego determinar una metodología para el tratamiento de la información. Los resultados obtenidos, al proponer las técnicas generales, están relacionados a una forma abstracta de tratar los datos para luego realizar su adecuado procesamiento. Se establecen de manera general algunos lineamientos a seguir antes de aplicar las técnicas particulares. Una forma general de ver el problema abre el juego para analizar las técnicas específicas que se deben implementar.

El proceso de estimación de las posiciones por medio de alguna técnica particular permite obtener un punto único con el cual trabajar. Pero, es necesario el uso de figuras geométricas y sus ecuaciones, para determinar la distancia de los puntos únicos estimados. Esta distancia luego se compara con la real que es conocida al momento de

posicionar los receptores en el terreno. La diferencia pasará a conformar el error de del sistema GPS.

Por lo tanto, determinar de manera general cual es el problema y como atacarlo es esencial para luego aplicar la técnica que mejor se ajuste.

### 5.3. Resultados derivados de la utilización del Promedio

Una de las técnicas específicas que se usa es el promedio para estimar las posiciones entregadas por los receptores GPS. Luego de calcular las posiciones, se compara la distancia real con la obtenida mediante esta estimación a través del promedio. De esta manera se obtiene el error absoluto que tienen los pares de receptores. Este valor obtenido va a ser un factor concluyente al momento de decidir la técnica a usar.

Las tablas 14, 15 y 16 muestran el error absoluto. Los resultados mostrados son luego de analizar los 10 minutos de muestras.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		Promedio	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		Promedio	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		Promedio	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		Promedio	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		Promedio	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89

**Tabla 14.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio.

En la tabla 14 se observa que el promedio no cambia en nada los valores obtenidos en comparación con los reales.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		Promedio	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.04	0.77
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		Promedio	-37.324140	-59.082050	-37.324191	-59.082065	2.81	5.77	2.96
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		Promedio	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		Promedio	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		Promedio	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46

**Tabla 15.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio.

En este caso, la tabla 15 acusa una mejora en la primera muestra pero no sucede lo mismo en la segunda dado que el error absoluto aumenta.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		Promedio	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.50	0.73
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		Promedio	-37.324191	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.98	1.21
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		Promedio	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		Promedio	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		Promedio	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11

**Tabla 16.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el promedio.

La tabla 16 muestra que las únicas diferencias que hay son perjudiciales para el error absoluto, pero solamente en el primer día de muestras.

Las tablas 17, 18 y 19 muestran los resultados pero en este caso analizando sólo los datos procesados luego del arranque en frío. Con ello se asegura que el 95% de las veces el error absoluto como máximo es el valor mostrado en las diferentes tablas.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		Promedio	4.53	5.19	0.66
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		Promedio	4.53	3.08	1.45
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		Promedio	4.53	5.73	1.20
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		Promedio	4.53	3.94	0.59
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		Promedio	4.53	5.81	1.28

**Tabla 17.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.*

Solamente en la primera muestra del primer día, se puede asegurar un error absoluto menor al obtenido con los datos sin procesar, como se ve en la tabla 17

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		Promedio	2.81	1.31	1.50
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		Promedio	2.81	5.78	2.97
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		Promedio	5.06	7.21	2.15
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		Promedio	8.65	10.51	1.86
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		Promedio	5.06	10.80	5.74

**Tabla 18.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.*

En cambio en la tabla 18, se puede ver que en más de una muestra el error absoluto que se asegura el 95 % de las veces es menor al obtenido originalmente.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		Promedio	2.77	3.88	1.11
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		Promedio	2.77	4.05	1.28
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		Promedio	3.00	1.86	1.14
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		Promedio	8.00	9.35	1.35
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		Promedio	3.00	5.23	2.23

**Tabla 19.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.*

La tabla 19 muestra que a veces el error absoluto asegurado mejora y otras que empeora respecto de los obtenidos originalmente.

Por lo tanto, si bien el promedio permite en algunos casos reducir el error absoluto en cuanto a la distancia entre los receptores con respecto al valor original obtenido por el sistema sin mejoras, éste muchas veces puede no ser óptimo debido a los valores extremos que pueden tener los datos crudos que hacen sesgar el resultado.

Un análisis que se puede realizar es determinar la antigüedad que se le da al promedio. Es decir, con cuántos valores se calcula. Si se mantiene el histórico desde el comienzo o si se determina un tiempo o cantidad de muestras a procesar.

#### 5.4. Resultados derivados de la utilización de la Moda

La moda se calcula a partir de los valores históricos de los receptores. Cada valor tiene una frecuencia asociada que depende de su aparición en el conjunto de datos. La técnica es aplicable en casos donde se tenga un posicionamiento estático, dado que si está en movimiento los valores cambian continuamente teniendo una frecuencia igual a 1 la totalidad de las muestras. Hay que tener en cuenta que para el área de aplicación que se está pensando aplicar este tipo de desarrollos los vehículos se mueven a una velocidad reducida entre 5 y 20 Km/h. Por lo cual, si se analiza la cantidad de medidas que se toman en cuenta (el histórico) para calcular la moda y la cantidad de medidas que no cambian su posición dada la baja velocidad, se puede obtener una frecuencia diferente a la unidad.

En las tablas 20, 21 y 22 se muestran los resultados de utilizar la moda al finalizar el tiempo de procesamiento total, que es de 10 minutos.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		Moda	-37.324128	-59.082057	-37.324172	-59.082052	4.53	4.83	0.30
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		Moda	-37.324143	-59.082058	-37.324168	-59.082033	4.53	3.56	0.97
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		Moda	-37.324168	-59.082068	-37.324208	-59.082045	4.53	4.90	0.37
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		Moda	-37.324170	-59.082052	-37.324203	-59.082032	4.53	4.11	0.42
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		Moda	-37.324153	-59.082055	-37.324195	-59.082027	4.53	5.27	0.74

**Tabla 20.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda.

La tabla 20 presenta resultados alentadores reduciendo el error absoluto casi en la totalidad de las muestras.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		Moda	-37.324128	-59.082057	-37.324147	-59.082033	2.81	2.91	0.10
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		Moda	-37.324143	-59.082058	-37.324185	-59.082063	2.81	4.65	1.84
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		Moda	-37.324168	-59.082068	-37.324222	-59.082063	5.06	5.94	0.88
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		Moda	-37.324170	-59.082052	-37.324247	-59.082117	8.65	10.29	1.64
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		Moda	-37.324153	-59.082055	-37.324208	-59.082068	5.06	6.22	1.16

**Tabla 21.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda.

En la tabla 21 se observa el mismo comportamiento que en la 20 salvo la segunda muestra del segundo día que no se beneficia de la aplicación de la moda.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		Moda	-37.324147	-59.082033	-37.324172	-59.082052	2.77	3.22	0.45
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		Moda	-37.324185	-59.082063	-37.324168	-59.082033	2.77	3.25	0.48
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		Moda	-37.324222	-59.082063	-37.324208	-59.082045	3.00	2.20	0.80
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		Moda	-37.324247	-59.082117	-37.324203	-59.082032	8.00	8.97	0.97
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		Moda	-37.324208	-59.082068	-37.324195	-59.082027	3.00	3.99	0.99

**Tabla 22.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con la moda.

En cambio en la tabla 22 se puede ver que no sólo empeora para la segunda muestra del segundo día sino que también lo hace para la primera de ese mismo día. Esto puede ser dependiente del receptor ya que cuando se analizan los casos en donde interviene el receptor GPS 3, no se reduce siempre el error absoluto. Las tablas 21 y 22 muestran que cuando se obtiene el error absoluto del GPS 1 respecto del 3 y del 2 también respecto del 3, siempre hay al menos una muestra que aumenta el error.

Además, si se obtienen los errores absolutos el 95% de las veces luego de la estabilización del sistema, es decir con los 5 minutos restantes, se llega a los resultados mostrados en las tablas 23, 24 y 25.



Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		Moda	4.53	4.14	0.39
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		Moda	4.53	3.56	0.97
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		Moda	4.53	5.18	0.65
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		Moda	4.53	4.11	0.42
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		Moda	4.53	5.34	0.81

**Tabla 23.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

En todos los casos se asegura un error absoluto máximo menor al original del sistema GPS, como se muestra en la tabla 23.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		Moda	2.81	1.97	0.84
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		Moda	2.81	4.82	2.01
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		Moda	5.06	5.95	0.89
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		Moda	8.65	10.70	2.05
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		Moda	5.06	6.22	1.16

**Tabla 24.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

En la tabla 24 se observa el mismo comportamiento que en la tabla 21 en donde la segunda muestra del segundo día aumenta el error.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		Moda	2.77	3.42	0.65
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		Moda	2.77	3.25	0.48
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		Moda	3.00	2.20	0.80
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		Moda	8.00	8.97	0.97
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		Moda	3.00	3.99	0.99

**Tabla 25.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

Sin embargo, la situación cambia según muestra la tabla 25. En este caso todos los errores absolutos se reducen y se puede asegurar, el 95% de las veces, un error menor al original. Situación que en la tabla 22 no se daba debido a que había algunos casos donde el error aumentaba.

Como se puede observar la moda es una técnica que permite reducir, casi en todos los casos, el error absoluto con respecto al obtenido originalmente.

### 5.5. Resultados derivados de la utilización de filtro de Kalman

El filtro se aplica teniendo en cuenta los errores del sistema NAVSTAR-GPS. En realidad se computa su desviación estándar, que permite usar dicha información para remover la fuente de errores aumentando la precisión del sistema.

#### 5.5.1. Resultados con filtro de Kalman estático

Para usar el filtro de Kalman estático hay que computar las muestras. Cada una de ellas hace de entrada al filtro el cual estima una nueva a partir de esta posición entregada, la desviación estándar obtenida y la dilución de la precisión posicional (PDOP) que tiene asociada la muestra. Los resultados de su aplicación se presentan en las tablas 26, 27 y 28.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		Kalman E	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		Kalman E	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		Kalman E	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		Kalman E	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.16	0.37
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		Kalman E	-37.324152	-59.082057	-37.324190	-59.082055	4.53	4.24	0.29

**Tabla 26.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático.

La tabla 26 muestra como luego de aplicar el filtro, el error absoluto no cambia radicalmente en comparación al original. En el último caso solamente se nota una mejora significativa.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		Kalman E	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.04	0.77
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		Kalman E	-37.324140	-59.082050	-37.324191	-59.082065	2.81	5.77	2.96
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		Kalman E	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		Kalman E	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		Kalman E	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46

**Tabla 27.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático.

La tabla 27 en cambio se observan una reducción pero también un aumento del error absoluto.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		Kalman E	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.50	0.73
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		Kalman E	-37.324191	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.98	1.21
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		Kalman E	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		Kalman E	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.71	0.71
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		Kalman E	-37.324233	-59.081997	-37.324190	-59.082055	3.00	7.10	4.10

**Tabla 28.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman estático.

En cambio, la tabla 28 acusa un comportamiento diferente ya que en algunos casos aumenta el error absoluto significativamente.

Si se tratan los datos luego del arranque en frío y se analizan, se arriban a los resultados mostrados en las tablas 29, 30 y 31.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		Kalman E	4.53	5.19	0.66
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		Kalman E	4.53	3.08	1.45
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		Kalman E	4.53	5.73	1.20
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		Kalman E	4.53	3.82	0.71
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		Kalman E	4.53	5.75	1.22

**Tabla 29.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

La tabla 29 muestra que no se puede asegurar, para el 95% de las veces, un error absoluto menor al original.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		Kalman E	2.81	1.31	1.50
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		Kalman E	2.81	5.78	2.97
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		Kalman E	5.06	7.21	2.15
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		Kalman E	8.65	10.51	1.86
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		Kalman E	5.06	10.80	5.74

**Tabla 30.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

Por el contrario, en la tabla 30, puede verse que siempre se asegura un error absoluto menor o igual al original.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		Kalman E	2.77	3.88	1.11
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		Kalman E	2.77	4.05	1.28
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		Kalman E	3.00	1.86	1.14
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		Kalman E	8.00	9.30	1.30
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		Kalman E	3.00	6.78	3.78

**Tabla 31.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

En la tabla 31 vuelve a presentarse casos donde el error aumenta, por lo cual no se asegura un error menor al original.

Dado que cuando se ve involucrado el receptor GPS 2 hay aumento del error absoluto, este puede ser atribuido a algún inconveniente en cuanto a la señal recibida y procesada por el dispositivo.

La implementación de esta técnica no produce resultados mejores a los obtenidos originalmente con el sistema GPS sin procesamiento alguno. Además, requiere de una considerable carga computacional que la hace poco usable en plataformas con un bajo nivel de procesamiento.

### 5.5.2. Resultados con filtro de Kalman dinámico

El uso de un filtro de Kalman dinámico requiere mayor carga de procesamiento pero los resultados en algunos casos son mejores respecto a los obtenidos originalmente. En este caso el filtro no sólo tiene en cuenta la desviación estándar del sistema sino que además trabaja con la desviación estándar del proceso de estimación. Por cada muestra se hace una estimación a priori que es la posición estimada en el paso anterior. Se obtiene una nueva posición basada en la estimación a priori y se le agrega un valor que viene dado por la ponderación (ganancia de Kalman) de la diferencia entre la nueva medida y la calculada a priori.

Las tablas 32, 33 y 34 muestran el resultado de aplicar esta técnica luego de completar el tiempo total del experimento.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		Kalman D	-37.324133	-59.082056	-37.324173	-59.082058	4.53	4.40	0.13
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		Kalman D	-37.324140	-59.082053	-37.324176	-59.082050	4.53	3.95	0.58
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		Kalman D	-37.324168	-59.082067	-37.324209	-59.082062	4.53	4.62	0.09
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		Kalman D	-37.324169	-59.082057	-37.324209	-59.082057	4.53	4.52	0.01
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		Kalman D	-37.324156	-59.082055	-37.324197	-59.082055	4.53	4.54	0.01

**Tabla 32.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico.

La tabla 32 muestra que en todos los casos es posible aumentar la precisión reduciendo el error absoluto respecto de los valores originales.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		Kalman D	-37.324133	-59.082056	-37.324145	-59.082036	2.81	2.23	0.58
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		Kalman D	-37.324140	-59.082053	-37.324188	-59.082073	2.81	5.64	2.83
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		Kalman D	-37.324168	-59.082067	-37.324221	-59.082070	5.06	5.94	0.88
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		Kalman D	-37.324169	-59.082057	-37.324245	-59.082115	8.65	9.91	1.26
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		Kalman D	-37.324156	-59.082055	-37.324218	-59.082028	5.06	7.36	2.30

**Tabla 33.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico.

En este caso, la tabla 33, muestra que también todos los errores absolutos disminuyen respecto de los originales.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		Kalman D	-37.324145	-59.082036	-37.324173	-59.082058	2.77	3.62	0.85
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		Kalman D	-37.324188	-59.082073	-37.324176	-59.082050	2.77	2.48	0.29
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		Kalman D	-37.324221	-59.082070	-37.324209	-59.082062	3.00	1.52	1.48
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		Kalman D	-37.324245	-59.082115	-37.324209	-59.082057	8.00	6.53	1.47
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		Kalman D	-37.324218	-59.082028	-37.324197	-59.082055	3.00	3.39	0.39

**Tabla 34.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico.

Por el contrario, la tabla 34, denota un comportamiento diferente a las dos anteriores (tablas 32 y 33). En algunos casos el error se ve aumentado al aplicar el filtro. Tal vez en este caso, si la precisión obtenida con el original esta en un rango aceptable no debería aplicarse el filtro.

Si por otro lado se analiza el 95% de las muestras procesadas luego de la estabilización del sistema se llegan a los resultados mostrados en las tablas 35, 36 y 37.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		Kalman D	4.53	4.42	0.11
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		Kalman D	4.53	3.74	0.79
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		Kalman D	4.53	4.26	0.27
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		Kalman D	4.53	4.49	0.04
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		Kalman D	4.53	4.48	0.05

**Tabla 35.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

La tabla 35 muestra que en todos los casos se puede asegurar un error absoluto menor al original.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		Kalman D	2.81	2.45	0.36
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		Kalman D	2.81	6.23	3.42
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		Kalman D	5.06	5.86	0.80
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		Kalman D	8.65	10.25	1.60
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		Kalman D	5.06	7.06	2.00

**Tabla 36.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

En cambio en la tabla 36, el error absoluto luego de aplicar el filtro aumenta.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		Kalman D	2.77	4.09	1.32
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		Kalman D	2.77	1.96	0.81
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		Kalman D	3.00	1.31	1.69
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		Kalman D	8.00	5.55	2.45
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		Kalman D	3.00	1.00	2.00

**Tabla 37.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

La tabla 37 vuelve a mostrar una situación parecida a la anterior (tabla 36), aumentando el error al aplicar el filtro.

El receptor GPS 3 parece tener un elevado grado de error en sus mediciones ya que la situación se repite cuando es tenido en cuenta para calcular el error absoluto.

El filtro de Kalman dinámico en la mayoría de los casos permite mejorar la precisión posicional aunque cuando el error absoluto de los valores originales del sistema no es tan grande, el filtro no responde correctamente.

### 5.5.2.1. Resultados con filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma)

En este caso el error encontrado entre la estimación de una posición y la posición medida en el próximo instante es reingresado como parte de la desviación estándar para las próximas estimaciones. De esta manera se pretende refinar el método de estimación.

Los resultados luego de procesar las muestras al finalizar el tiempo de análisis se muestran en las tablas 38, 39 y 40.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D Corr Sigma	-37.324133	-59.082056	-37.324173	-59.082058	4.53	4.40	0.13
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D Corr Sigma	-37.324140	-59.082053	-37.324174	-59.082050	4.53	3.82	0.71
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D Corr Sigma	-37.324168	-59.082067	-37.324209	-59.082063	4.53	4.60	0.07
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D Corr Sigma	-37.324169	-59.082057	-37.324209	-59.082057	4.53	4.52	0.01
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D Corr Sigma	-37.324156	-59.082055	-37.324197	-59.082054	4.53	4.54	0.01

**Tabla 38.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.

La tabla 38 muestra que en todos los casos es disminuido el error respecto del original.



Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D Corr Sigma	-37.324133	-59.082056	-37.324145	-59.082036	2.81	2.23	0.58
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D Corr Sigma	-37.324140	-59.082053	-37.324188	-59.082073	2.81	5.56	2.75
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D Corr Sigma	-37.324168	-59.082067	-37.324221	-59.082084	5.06	6.07	1.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D Corr Sigma	-37.324169	-59.082057	-37.324253	-59.082147	8.65	12.31	3.66
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D Corr Sigma	-37.324156	-59.082055	-37.324219	-59.082043	5.06	7.06	2.00

**Tabla 39.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.

En el caso de la tabla 39 se puede observar que una de las muestras aumenta el error, el resto se mantiene por debajo del original.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D Corr Sigma	-37.324145	-59.082036	-37.324173	-59.082058	2.77	3.62	0.85
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D Corr Sigma	-37.324188	-59.082073	-37.324174	-59.082050	2.77	2.52	0.25
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D Corr Sigma	-37.324221	-59.082084	-37.324209	-59.082063	3.00	2.28	0.72
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D Corr Sigma	-37.324253	-59.082147	-37.324209	-59.082057	8.00	9.33	1.33
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D Corr Sigma	-37.324219	-59.082043	-37.324197	-59.082054	3.00	2.63	0.37

**Tabla 40.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma.

En la tabla 40 se observa que los errores aumentan al aplicar esta técnica, no siendo óptima para el tratado de los datos en este caso.

Analizando el 95% de las estimaciones luego del arranque en frío se obtienen los resultados mostrados en las tablas 41, 42 y 43.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D Corr Sigma	4.53	4.42	0.11
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D Corr Sigma	4.53	3.83	0.70
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D Corr Sigma	4.53	4.29	0.24
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D Corr Sigma	4.53	4.49	0.04
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D Corr Sigma	4.53	4.48	0.05

**Tabla 41.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

Se puede observar en la tabla 41 que siempre se asegura un error menor al obtenido originalmente con el sistema sin ningún tipo de procesamiento.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D Corr Sigma	2.81	2.25	0.56
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D Corr Sigma	2.81	6.22	3.41
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D Corr Sigma	5.06	7.28	2.22
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D Corr Sigma	8.65	12.96	4.31
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D Corr Sigma	5.06	8.01	2.95

**Tabla 42.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

La tabla 42 muestra que no es posible asegurar un error menor al obtenido sin procesar los datos, por el contrario, se introduce más ruido aumentando el error absoluto.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D Corr Sigma	2.77	4.09	1.32
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D Corr Sigma	2.77	1.90	0.87
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D Corr Sigma	3.00	2.29	0.71
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D Corr Sigma	8.00	9.51	1.51
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D Corr Sigma	3.00	4.78	1.78

**Tabla 43.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

En la tabla 43 se puede ver que el error tampoco siempre es menor al original.

En algunos casos los errores absolutos mejoran a los obtenidos mediante el filtro dinámico con retroalimentación de la desviación estándar. Aún así, no son óptimos dado que cuando el sistema original no posee tanto error, este filtro no se comporta de manera adecuada.

### 5.5.2.2. Resultados con filtro de Kalman dinámico con ajuste de la desviación estándar retroalimentada (con corrección de sigma) y ponderación de la desviación mediante lógica difusa

En este caso se combinan dos de las técnicas ya presentadas y se analizan los resultados en las tablas 44, 45 y 46 luego de procesar los 10 minutos de muestras. Aquí no solamente la desviación es recalculada en cada instante sino que además su ponderación varía según los datos analizados por el sistema difuso.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324132	-59.082055	-37.324171	-59.082057	4.53	4.40	0.13
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324141	-59.082051	-37.324172	-59.082038	4.53	3.70	0.83
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324169	-59.082070	-37.324210	-59.082069	4.53	4.54	0.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324169	-59.082054	-37.324210	-59.082053	4.53	4.50	0.03
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324154	-59.082056	-37.324194	-59.082054	4.53	4.54	0.01

**Tabla 44.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

La tabla 44 muestra que siempre es posible mejorar el error absoluto de las muestras originales.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324132	-59.082055	-37.324146	-59.082044	2.81	1.86	0.95
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324141	-59.082051	-37.324191	-59.082070	2.81	5.78	2.97
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324169	-59.082070	-37.324223	-59.082093	5.06	6.37	1.31
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324169	-59.082054	-37.324252	-59.082141	8.65	12.02	3.37
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324154	-59.082056	-37.324227	-59.082010	5.06	9.08	4.02

**Tabla 45.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

En la tabla 45 se observa por el contrario que muchas veces el error aumenta cuando se aplica la técnica.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324146	-59.082044	-37.324171	-59.082057	2.77	3.01	0.24
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324191	-59.082070	-37.324172	-59.082038	2.77	3.52	0.75
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324223	-59.082093	-37.324210	-59.082069	3.00	2.55	0.45
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324252	-59.082141	-37.324210	-59.082053	8.00	9.09	1.09
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D Corr Sigma y LogDif	-37.324227	-59.082010	-37.324194	-59.082054	3.00	5.31	2.31

**Tabla 46.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

En la tabla 46 algunas de las medidas arrojan errores mayores a los obtenidos sin procesa las muestras.

En las tablas 47, 48 y 49 se observan los errores absolutos cometidos el 95% de las estimaciones.

Día	Muestra	Dato	GPS 1 - GPS 2		Error Absoluto (metros)
			real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D Corr Sigma y LogDif	4.53	4.43	0.10
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D Corr Sigma y LogDif	4.53	3.44	1.09
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D Corr Sigma y LogDif	4.53	5.31	0.78
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D Corr Sigma y LogDif	4.53	4.47	0.06
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D Corr Sigma y LogDif	4.53	4.47	0.06

**Tabla 47.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

La tabla 47 resalta que para todos los casos se asegura un error menor al original el 95% de las veces.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D Corr Sigma y LogDif	2.81	1.87	0.94
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D Corr Sigma y LogDif	2.81	6.12	3.31
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D Corr Sigma y LogDif	5.06	6.92	1.86
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D Corr Sigma y LogDif	8.65	12.52	3.87
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D Corr Sigma y LogDif	5.06	9.04	3.98

**Tabla 48.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.*

La tabla 48 muestra que a veces el error aumenta, como viene sucediendo en repetidas oportunidades cuando se incluye al receptor GPS 3 en el análisis.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D Corr Sigma y LogDif	2.77	2.98	0.21
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D Corr Sigma y LogDif	2.77	1.00	1.77
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D Corr Sigma y LogDif	3.00	2.33	0.67
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D Corr Sigma y LogDif	8.00	9.07	1.07
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D Corr Sigma y LogDif	3.00	6.12	3.12

**Tabla 49.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.*

En la tabla 49 se observa un comportamiento parecido al que se viene dando, ya que varias de las muestras procesadas aumentan el error absoluto.

Por lo tanto, en algunos casos el error absoluto mejora notablemente no así en otros donde se acentúa un poco. Esta técnica permite la corrección de los errores pero debido a causas no precisadas a veces el error aumenta.

### 5.5.2.3. Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y sin corrección de sigma

Se pone a prueba otra de las combinaciones de técnicas. En este caso no se retroalimenta la desviación estándar y los resultados se muestran en las tablas 50, 51 y 52.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D LogDif	-37.324132	-59.082055	-37.324171	-59.082055	4.53	4.34	0.19
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D LogDif	-37.324141	-59.082052	-37.324172	-59.082037	4.53	3.68	0.85
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D LogDif	-37.324169	-59.082070	-37.324210	-59.082059	4.53	4.70	0.17
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D LogDif	-37.324169	-59.082054	-37.324210	-59.082053	4.53	4.47	0.06
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D LogDif	-37.324154	-59.082056	-37.324194	-59.082057	4.53	4.53	0.00

**Tabla 50.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

En la tabla 50 se puede ver como el error siempre es corregido al aplicar estas técnicas.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D LogDif	-37.324132	-59.082055	-37.324145	-59.082036	2.81	2.26	0.55
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D LogDif	-37.324141	-59.082052	-37.324191	-59.082070	2.81	5.74	2.93
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D LogDif	-37.324169	-59.082070	-37.324223	-59.082067	5.06	6.07	1.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D LogDif	-37.324169	-59.082054	-37.324246	-59.082117	8.65	10.24	1.59
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D LogDif	-37.324154	-59.082056	-37.324227	-59.082002	5.06	9.47	4.41

**Tabla 51.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

La tabla 51 muestra que en general los errores se corrigen o mejoran respecto de los originales, en muy pocos casos aumenta y su magnitud es más bien baja.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D LogDif	-37.324145	-59.082036	-37.324171	-59.082055	2.77	3.37	0.60
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D LogDif	-37.324191	-59.082070	-37.324172	-59.082037	2.77	3.57	0.80
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D LogDif	-37.324223	-59.082067	-37.324210	-59.082059	3.00	1.62	1.38
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D LogDif	-37.324246	-59.082117	-37.324210	-59.082053	8.00	7.02	0.98
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D LogDif	-37.324227	-59.082002	-37.324194	-59.082057	3.00	6.10	3.10

**Tabla 52.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa.

La tabla 52 refleja un comportamiento similar a la tabla 51 teniendo algunos valores por debajo y otros por encima de los originales.

Al analizar los datos luego del arranque en frío se llega a los resultados mostrados en las tablas 53, 54 y 55.

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D LogDif	4.53	4.37	0.16
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D LogDif	4.53	3.44	1.09
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D LogDif	4.53	4.06	0.47
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D LogDif	4.53	4.47	0.06
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D LogDif	4.53	4.47	0.06

**Tabla 53.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.*

Siempre se puede asegurar un error absoluto menor al original, como lo muestra la tabla 53.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D LogDif	2.81	2.28	0.53
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D LogDif	2.81	6.16	3.35
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D LogDif	5.06	5.95	0.89
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D LogDif	8.65	10.25	1.60
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D LogDif	5.06	9.44	4.38

**Tabla 54.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.*

Solamente en un caso el error aumenta pero en menos de un metro, como se puede observar en la tabla 54, en la segunda muestra del primer día.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D LogDif	2.77	3.80	1.03
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D LogDif	2.77	1.00	1.77
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D LogDif	3.00	1.36	1.64
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D LogDif	8.00	5.80	2.20
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D LogDif	3.00	5.84	2.84

**Tabla 55.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.*

En la tabla 55 se puede ver que el error absoluto aumenta en la mayoría de los casos, esta se debe a la inclusión del receptor GPS 3 en el análisis ya que el mismo tiene mucho error.

En ciertos casos el error absoluto disminuye considerablemente, principalmente en los receptores de la base diferencial. Por otro lado, a veces el error supera la medida original a la que están ubicados los receptores pero esto es debido a la corta distancia que se encuentran y al elevado error que tiene el sistema.

#### **5.5.2.4. Resultados con filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo**

De las técnicas introducidas ahora se pone a prueba el descarte de puntos. En este caso lo que se hace en primer lugar es filtrar aquellas muestras que no están en un rango aceptable. Este rango es definido en base a experimentos y a la bibliografía examinada. Los parámetros y sus valores para realizar el filtrado ya fueron definidos oportunamente en la sección 4.7.4.2.4.

Las muestras que pasan este filtro son las que toma el filtro de Kalman para realizar la estimación. Además, en este caso se retroalimenta la desviación estándar agregando el error encontrado entre la posición estimada y la medida por el receptor. El resultado de aplicar estas técnicas en conjunto se observa en las tablas 56, 57 y 58.



Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324133	-59.082056	-37.324174	-59.082058	4.53	4.50	0.03
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324140	-59.082053	-37.324173	-59.082050	4.53	3.68	0.85
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324168	-59.082067	-37.324209	-59.082067	4.53	4.54	0.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324169	-59.082057	-37.324209	-59.082057	4.53	4.52	0.01
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324156	-59.082055	-37.324197	-59.082055	4.53	4.53	0.00

**Tabla 56.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos.

La tabla 56 muestra que al aplicar esta técnica el error absoluto se reduce notablemente, siendo en algunos casos nulo.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324133	-59.082056	-37.324147	-59.082044	2.81	1.87	0.94
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324140	-59.082053	-37.324186	-59.082073	2.81	5.44	2.63
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324168	-59.082067	-37.324220	-59.082089	5.06	6.13	1.07
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324169	-59.082057	-37.324253	-59.082146	8.65	12.28	3.63
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324156	-59.082055	-37.324219	-59.082044	5.06	7.04	1.98

**Tabla 57.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos.

En la tabla 57, en cambio, se observa que a veces el error aumenta al aplicar esta técnica.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324147	-59.082044	-37.324174	-59.082058	2.77	3.17	0.40
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324186	-59.082073	-37.324173	-59.082050	2.77	2.53	0.24
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324220	-59.082089	-37.324209	-59.082067	3.00	2.28	0.72
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324253	-59.082146	-37.324209	-59.082057	8.00	9.33	1.33
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D Corr Sigma y Descarte	-37.324219	-59.082044	-37.324197	-59.082055	3.00	2.63	0.37

**Tabla 58.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma y descarte de puntos.

La tabla 58 muestra casi la misma situación anterior dado que al aplicar esta técnica el error absoluto a veces se reduce y otras no.

Por otro lado, al finalizar el tiempo de arranque en frío se analiza el 95% de las estimaciones resultantes hasta finalizar el tiempo del experimento. Los resultados se observan en las tablas 59, 60 y 61.

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.44	0.09
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D Corr Sigma y Descarte	4.53	3.71	0.82
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.52	0.01
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.49	0.04
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.48	0.05

**Tabla 59.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.*

La tabla 59 muestra que es posible asegurar un error absoluto mucho más bajo que el original, en algunos casos hasta más de un 90% del error se elimina con esta técnica.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D Corr Sigma y Descarte	2.81	1.85	0.96
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D Corr Sigma y Descarte	2.81	6.22	3.41
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D Corr Sigma y Descarte	5.06	7.35	2.29
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D Corr Sigma y Descarte	8.65	12.95	4.30
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D Corr Sigma y Descarte	5.06	8.01	2.95

**Tabla 60.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.*

La tabla 60, por el contrario, muestra que no en todos los casos es posible asegurar un error absoluto menor al original.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D Corr Sigma y Descarte	2.77	3.13	0.36
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D Corr Sigma y Descarte	2.77	1.88	0.89
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D Corr Sigma y Descarte	3.00	2.30	0.70
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D Corr Sigma y Descarte	8.00	9.51	1.51
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D Corr Sigma y Descarte	3.00	4.78	1.78

**Tabla 61.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

En la tabla 61 se observa que, salvo en un caso, en el resto es posible asegurar un error absoluto más bajo que el original.

Esta técnica si bien promete reducir mucho el error absoluto, no lo hace en la totalidad de los casos.

### 5.5.2.5. Resultados con filtro de Kalman dinámico con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo

Se aplica el filtro de Kalman con el mismo criterio que el la sección 5.5.2.4 pero no se retroalimenta la desviación estándar.

Los resultados se pueden ver en las tablas 62, 63 y 64.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D Descarte	-37.324133	-59.082056	-37.324173	-59.082058	4.53	4.40	0.13
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D Descarte	-37.324140	-59.082053	-37.324171	-59.082050	4.53	3.46	1.07
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D Descarte	-37.324168	-59.082067	-37.324209	-59.082063	4.53	4.63	0.10
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D Descarte	-37.324169	-59.082057	-37.324209	-59.082057	4.53	4.52	0.01
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D Descarte	-37.324156	-59.082055	-37.324197	-59.082056	4.53	4.53	0.00

**Tabla 62.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos.

Esta situación mostrada en la tabla 62 se viene repitiendo en variadas oportunidades pudiendo tener una reducción del error absoluto efectiva.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D Descarte	-37.324133	-59.082056	-37.324146	-59.082044	2.81	1.79	1.02
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D Descarte	-37.324140	-59.082053	-37.324185	-59.082072	2.81	5.29	2.48
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D Descarte	-37.324168	-59.082067	-37.324221	-59.082070	5.06	5.94	0.88
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D Descarte	-37.324169	-59.082057	-37.324247	-59.082116	8.65	10.20	1.55
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D Descarte	-37.324156	-59.082055	-37.324218	-59.082028	5.06	7.36	2.30

**Tabla 63.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos.

En la tabla 64 se observa que muchas veces el error es reducido notablemente como se ve en la última fila de la tabla, pero aún así hay otras muestras que no sólo conservan el error sino que se aumenta al aplicar esta técnica, como se ve en la primera muestra del primer día.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D Descarte	-37.324146	-59.082044	-37.324173	-59.082058	2.77	3.17	0.40
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D Descarte	-37.324185	-59.082072	-37.324171	-59.082050	2.77	2.50	0.27
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D Descarte	-37.324221	-59.082070	-37.324209	-59.082063	3.00	1.48	1.52
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D Descarte	-37.324247	-59.082116	-37.324209	-59.082057	8.00	6.77	1.23
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D Descarte	-37.324218	-59.082028	-37.324197	-59.082056	3.00	3.45	0.45

**Tabla 64.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con descarte de puntos.

La tabla 64 muestra que en los casos donde el error original es bajo, la técnica lo aumenta. Pero por otro lado, se obtiene una buena reducción del error para el resto de los casos, principalmente para cuando el error original es muy grande.

Si luego de la estabilización del sistema se procesan los datos y se obtienen los resultados del 95% se llega a la situación mostrada en las tablas 65, 66 y 67.

Capítulo 5 - Métricas de Desempeño

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D Descarte	4.53	4.42	0.11
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D Descarte	4.53	3.47	1.06
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D Descarte	4.53	4.26	0.27
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D Descarte	4.53	4.49	0.04
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D Descarte	4.53	4.48	0.05

**Tabla 65.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

Siempre es posible reducir el error absoluto en la dupla GPS 1-GPS 2, como muestra la tabla 65.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D Descarte	2.81	1.81	1.00
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D Descarte	2.81	6.23	3.42
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D Descarte	5.06	5.86	0.80
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D Descarte	8.65	10.20	1.55
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D Descarte	5.06	7.06	2.00

**Tabla 66.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

En este caso no siempre es posible reducir el error absoluto pero si es relevante que cuando las posiciones originales tienen mucho error, se corrige y en gran parte, como se ve en la tabla 66.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D Descarte	2.77	3.12	0.35
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D Descarte	2.77	1.97	0.80
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D Descarte	3.00	1.21	1.79
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D Descarte	8.00	5.70	2.30
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D Descarte	3.00	0.99	2.01

**Tabla 67.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.

La tabla 67 se ve que el error se reduce pero también aumenta.

La aplicación del descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo permite reducir el procesamiento bajando la carga computacional y obteniendo resultados similares a los ya obtenidos por medio de otras técnicas. También permite en algunos casos reducir considerablemente el error, mientras que en otros lo aumenta. Tal vez acotando los casos en cuales aplicarlo se pueda llegar a mejores resultados.

### 5.5.2.6. Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.

En este caso se trabaja con lógica difusa para ponderar la desviación estándar, técnica presentada en la sección 5.5.2.3, pero se le agrega el descarte de puntos antes de entrar al filtro de Kalman.

Los resultados de esta técnica se muestran en las tablas 68, 69 y 70.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D LogDif y Descarte	-37.324132	-59.082055	-37.324171	-59.082056	4.53	4.35	0.18
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D LogDif y Descarte	-37.324141	-59.082051	-37.324170	-59.082035	4.53	3.51	1.02
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D LogDif y Descarte	-37.324169	-59.082070	-37.324210	-59.082069	4.53	4.54	0.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D LogDif y Descarte	-37.324169	-59.082054	-37.324210	-59.082053	4.53	4.47	0.06
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D LogDif y Descarte	-37.324154	-59.082056	-37.324194	-59.082055	4.53	4.53	0.00

**Tabla 68.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.

La tabla 68 muestra que los errores son reducidos en todos los casos analizados en el experimento.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D LogDif y Descarte	-37.324132	-59.082055	-37.324145	-59.082044	2.81	1.82	0.99
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D LogDif y Descarte	-37.324141	-59.082051	-37.324188	-59.082067	2.81	5.42	2.61
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D LogDif y Descarte	-37.324169	-59.082070	-37.324228	-59.082063	5.06	6.58	1.52
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D LogDif y Descarte	-37.324169	-59.082054	-37.324246	-59.082117	8.65	10.24	1.59
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D LogDif y Descarte	-37.324154	-59.082056	-37.324227	-59.082002	5.06	9.47	4.41

**Tabla 69.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.

En cambio, en la tabla 69, se puede observar que no siempre pueden ser reducidos los errores absolutos.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D LogDif y Descarte	-37.324145	-59.082044	-37.324171	-59.082056	2.77	3.01	0.24
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D LogDif y Descarte	-37.324188	-59.082067	-37.324170	-59.082035	2.77	3.54	0.77
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D LogDif y Descarte	-37.324228	-59.082063	-37.324210	-59.082069	3.00	2.09	0.91
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D LogDif y Descarte	-37.324246	-59.082117	-37.324210	-59.082053	8.00	7.02	0.98
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D LogDif y Descarte	-37.324227	-59.082002	-37.324194	-59.082055	3.00	5.98	2.98

**Tabla 70.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa y descarte de puntos.

La tabla 70 muestra una situación similar a la tabla 69, dado que los errores no son reducidos en todos los casos analizados en el experimento.

Al quedar el sistema estabilizado, luego de 5 minutos, se siguen procesando los datos y los resultados desde ese momento hasta finalizar el tiempo de muestreo se pueden observar en las tablas 71, 72 y 73.

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		K D LogDif y Descarte	4.53	4.37	0.16
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		K D LogDif y Descarte	4.53	3.54	0.99
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		K D LogDif y Descarte	4.53	4.51	0.02
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		K D LogDif y Descarte	4.53	4.47	0.06
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		K D LogDif y Descarte	4.53	4.47	0.06

**Tabla 71.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

La tabla 71 denota un comportamiento ideal de esta técnica, aumentado la precisión en todos los casos.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		K D LogDif y Descarte	2.81	1.84	0.97
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		K D LogDif y Descarte	2.81	5.55	2.74
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		K D LogDif y Descarte	5.06	6.39	1.33
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		K D LogDif y Descarte	8.65	10.25	1.60
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		K D LogDif y Descarte	5.06	9.44	4.38

**Tabla 72.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.*

La tabla 72 y a diferencia de la situación que se venía repitiendo, muestra que en todos los casos el error absoluto es reducido con respecto al error original.

GPS 3 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		K D LogDif y Descarte	2.77	2.98	0.21
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		K D LogDif y Descarte	2.77	1.00	1.77
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		K D LogDif y Descarte	3.00	1.62	1.38
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		K D LogDif y Descarte	8.00	5.80	2.20
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		K D LogDif y Descarte	3.00	6.00	3.00

**Tabla 73.** *Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 3-GPS 2.*

Sin embargo, en la tabla 73 se puede ver que los errores no se reducen respecto del original.

Hasta ahora es la mejor técnica ya que en la mayoría de los casos el error fue mitigado notablemente.

### 5.5.2.7. Resultados con filtro de Kalman dinámico con ponderación de la desviación estándar mediante lógica difusa, descarte de puntos y corrección de sigma.

Finalmente, la combinación de las tres técnicas presentadas se pone a prueba. Las muestras pasan primero por el filtro paso bajo/alto donde se descartan aquellas que no están en el rango permitido. Luego pasan al filtro de Kalman donde son procesadas,



pero la desviación estándar del error es ponderada mediante lógica difusa. Además, esta desviación es recalculada y retroalimentada en cada paso de estimación.

Los resultados de su aplicación se muestran en las tablas 74, 75 y 76.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324167	-59.082047	4.53	3.99	0.54
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324132	-59.082055	-37.324171	-59.082056	4.53	4.36	0.17
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324167	-59.082032	4.53	3.38	1.15
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324141	-59.082051	-37.324172	-59.082036	4.53	3.65	0.88
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324215	-59.082048	4.53	5.03	0.50
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324169	-59.082070	-37.324210	-59.082069	4.53	4.54	0.01
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324203	-59.082032	4.53	4.17	0.36
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324169	-59.082054	-37.324210	-59.082053	4.53	4.49	0.04
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324193	-59.082025	4.53	5.42	0.89
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324154	-59.082056	-37.324194	-59.082056	4.53	4.53	0.00

**Tabla 74.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.

En este caso se puede reducir el error al punto de anularse, como se puede ver en la tabla 74.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324132	-59.082057	-37.324137	-59.082035	2.81	2.01	0.80
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324132	-59.082055	-37.324146	-59.082044	2.81	1.83	0.98
	2	Original	-37.324140	-59.082050	-37.324190	-59.082065	2.81	5.71	2.90
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324141	-59.082051	-37.324191	-59.082068	2.81	5.71	2.90
2	1	Original	-37.324172	-59.082065	-37.324240	-59.082063	5.06	7.59	2.53
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324169	-59.082070	-37.324227	-59.082077	5.06	6.52	1.46
	2	Original	-37.324170	-59.082053	-37.324245	-59.082115	8.65	9.97	1.32
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324169	-59.082054	-37.324252	-59.082141	8.65	12.01	3.36
	3	Original	-37.324152	-59.082057	-37.324233	-59.081997	5.06	10.52	5.46
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324154	-59.082056	-37.324227	-59.082013	5.06	8.99	3.93

**Tabla 75.** Errores absolutos de GPS 1-GPS 3 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.

En la tabla 75 se ve que no siempre se puede reducir el error.

Día	Muestra	Dato	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada	
1	1	Original	-37.324137	-59.082035	-37.324167	-59.082047	2.77	3.49	0.72
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324146	-59.082044	-37.324171	-59.082056	2.77	3.00	0.23
	2	Original	-37.324190	-59.082065	-37.324167	-59.082032	2.77	3.94	1.17
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324191	-59.082068	-37.324172	-59.082036	2.77	3.57	0.80
2	1	Original	-37.324240	-59.082063	-37.324215	-59.082048	3.00	3.08	0.08
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324227	-59.082077	-37.324210	-59.082069	3.00	2.07	0.93
	2	Original	-37.324245	-59.082115	-37.324203	-59.082032	8.00	8.74	0.74
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324252	-59.082141	-37.324210	-59.082053	8.00	9.09	1.09
	3	Original	-37.324233	-59.081997	-37.324193	-59.082025	3.00	5.11	2.11
		K D Corr Sigma, LogDif y Desc	-37.324227	-59.082013	-37.324194	-59.082056	3.00	5.30	2.30

**Tabla 76.** Errores absolutos de GPS 3-GPS 2 obtenidos luego de procesar los 10 minutos de muestras con el filtro de Kalman con corrección de sigma, ponderación de la desviación estándar por medio de lógica difusa y con descarte de puntos mediante filtro paso alto/bajo.

Lo mismo sucede en este caso donde el error no siempre se ve reducido, situación que se observa en la tabla 76.

Luego del arranque en frío los errores absolutos para el 95% de las estimaciones se observa en las tablas 77, 78 y 79.

Día	Muestra	Dato	GPS 1 - GPS 2		Error Absoluto (metros)
			real	calculada	
1	1	Original	4.53	5.20	0.67
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	4.53	4.68	0.15
	2	Original	4.53	3.08	1.45
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	4.53	3.45	1.08
2	1	Original	4.53	5.73	1.20
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	4.53	4.51	0.02
	2	Original	4.53	3.94	0.59
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	4.53	4.47	0.06
	3	Original	4.53	5.81	1.28
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	4.53	4.47	0.06

**Tabla 77.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 2.

La tabla 77 muestra que los errores son reducidos y que si bien no se anulan, en todos los casos es posible obtener una mejor precisión.

GPS 1 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.81	1.28	1.53
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	2.81	1.85	0.96
	2	Original	2.81	5.78	2.97
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	2.81	5.99	3.18
2	1	Original	5.06	7.22	2.16
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	5.06	7.27	2.21
	2	Original	8.65	10.53	1.88
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	8.65	12.52	3.87
	3	Original	5.06	10.83	5.77
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	5.06	8.97	3.91

**Tabla 78.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 1-GPS 3.

En la tabla 78, en cambio, se ve que no todos los errores son reducidos.

GPS 2 - GPS 3			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Dato	real	calculada	
1	1	Original	2.77	3.87	1.10
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	2.77	2.98	0.21
	2	Original	2.77	4.05	1.28
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	2.77	1.00	1.77
2	1	Original	3.00	1.85	1.15
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	3.00	1.53	1.47
	2	Original	8.00	9.34	1.34
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	8.00	9.07	1.07
	3	Original	3.00	5.26	2.26
		Kalman D Corr Sigma, LogDif y Desc	3.00	6.11	3.11

**Tabla 79.** Máximo error absoluto para el 95% de las estimaciones luego de la estabilización del sistema correspondiente a la distancia GPS 2-GPS 3.

La misma situación de la tabla anterior acontece en este caso, como se muestra en la tabla 79, donde los errores no son reducidos para todos los casos.

Del conjunto de técnicas aplicadas, se puede concluir que algunas mejoran la precisión más que otras tomando en cuenta el mismo conjunto de datos. En la tabla 80 se presenta un resumen de las técnicas aplicadas luego de la estabilización del sistema, con el 95% de las estimaciones hechas luego de los 5 minutos de arranque en frío. Allí se puede observar no sólo la cantidad de mejoras que se lograron sino también el máximo, mínimo y el promedio de los errores absolutos de la distancia entre el receptor móvil y cada receptor de la base diferencial.

Técnica	Cantidad de mejoras	Error absoluto en metros		
		máximo	mínimo	promedio
Promedio	6	5.74	1.14	2.44
Moda	9	2.01	0.48	0.98
Kalman estático	6	5.74	1.14	2.28
Kalman dinámico (KD)	6	2.00	0.36	1.26
K D con corrección de sigma	5	2.95	0.56	1.37
K D con corrección de sigma y Log. Dif.	6	3.98	0.21	1.46
K D con lógica difusa	5	4.38	0.53	1.69
K D con corrección de sigma y descarte	6	2.95	0.36	1.27
K D con descarte	7	2.01	0.35	1.22
K D con Log. Dif. y descarte	5	4.38	0.21	1.98
K D con corrección de sigma, Log. Dif. y descarte	4	3.91	0.21	1.54

**Tabla 80.** Cantidad de mejoras y errores absolutos por técnica aplicada con el 95% de las estimaciones luego del arranque en frío.

Las comparaciones se hicieron una a una con el error absoluto de la medición original. Todas las mejoras se contabilizan de un total de 10 comparaciones hechas ya que son 5 muestras por 2 pares comparados (GPS 1-3 y GPS 2-3). La tabla 80 muestra que la mejor técnica a aplicar cuando se trabaja con el 95% de las estimaciones es la moda. Esta puede ser usada en este caso ya que el sistema se encuentra estático, no pudiendo ser usada en el caso dinámico. El problema que tiene al moverse es que dependiendo de la velocidad del móvil, la frecuencia de muestreo del receptor puede ser muy baja respecto de la distancia recorrida. Por lo tanto, si el receptor no entrega suficientes muestras antes que el móvil se mueva una cierta distancia, la frecuencia de aparición de cada posición pasa a ser 1 dado que cambia continuamente.

Sin embargo, si se usa la técnica de Kalman con descarte se obtiene una buena cantidad de mejoras, teniendo en cuenta que ésta si puede ser usada cuando el sistema se encuentra en movimiento.

Por tanto, se ha logrado reducir el error absoluto del GPS en un rango que va desde los 0.21 metros a los 5.74 el 95% de las veces. Las técnicas como el promedio, Kalman estático, Kalman dinámico con y sin corrección de sigma, ambos aplicando lógica difusa y el filtro de Kalman dinámico con corrección de sigma, con lógica difusa y descarte de puntos, mejoran la precisión logrando un error promedio de nos más de 2 metros y en algunas ocasiones de 1 metro.

### 5.6. Técnicas adicionales para unificar las mejoras

Dado que los resultados de las técnicas implementadas no permiten determinar una sola que se adapte mejor a todas las muestras analizadas, se proponen algunas técnicas adicionales. El resultado de estas nuevas técnicas es obtener una única que mejore la precisión.

Las técnicas propuestas son tres. La primera consiste en determinar cuál fue la mejor técnica implementada en la base diferencial y esa misma aplicarla en el móvil. La segunda, promedia las correcciones realizadas por cada técnica y aplica esos nuevos valores obtenidos para hacer la corrección en el receptor móvil. En la tercera y última, se ordenan de menor a mayor el valor absoluto de las correcciones recibidas. Esto se hace con cada una de las coordenadas. Se eligen las cuatro primeras, es decir, las correcciones de menor magnitud. Luego, con el valor real de la corrección (no con el valor absoluto), se calcula el promedio de ellas y se obtiene la nueva corrección en ambas componentes.

#### 5.6.1. Mejor técnica implementada en la base diferencial

La primera técnica es determinar en la base de referencia conformada por el GPS 1 y 2, cuál fue la técnica que menor error absoluto presentó. La tabla 81 muestra la mejor técnica encontrada para la base en cada muestra.

GPS 1 - GPS 2			Distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
Día	Muestra	Mejor técnica	real	calculada	
1	1	K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.44	0.09
	2	Kalman D Corr Sigma	4.53	3.83	0.70
2	1	K D Corr Sigma y Descarte	4.53	4.52	0.01
	2	Kalman D Descarte	4.53	4.49	0.04
	3	Kalman D Descarte	4.53	4.48	0.05

*Tabla 81. Mejor técnica implementada en la base diferencial para cada muestra.*

Con estas técnicas se procesan los datos en el GPS 3 y se compara la posición original que brindó el dispositivo con la corregida. La tabla 82 muestra los resultados de aplicar la mejor técnica de la base en el móvil.

Día	Muestra	Técnica	Error absoluto (metros)
1	1	K D Corr Sigma y Descarte	1.54
	2	Kalman D Corr Sigma	1.92
2	1	K D Corr Sigma y Descarte	3.06
	2	Kalman D Descarte	0.36
	3	Kalman D Descarte	3.53

**Tabla 82.** Error absoluto en el móvil luego de aplicar la mejor técnica de la base diferencial.

### 5.6.2. Técnica de promediar las correcciones recibidas de la base

Consiste en promediar las correcciones recibidas en el sistema móvil. Se promedian las obtenidas por cada técnica y luego se le aplica al valor original del receptor GPS 3. Esta posición ya corregida se comprara con la posición del GPS 3 original y los errores absolutos se muestran en la tabla 83.

Día	Muestra	Error absoluto (metros)
1	1	1.15
	2	0.54
2	1	2.23
	2	1.42
	3	2.49

**Tabla 83.** Error absoluto en el móvil luego de aplicar el promedio de las correcciones obtenidas por cada técnica.

### 5.6.3. Técnica menor distancia al error

De las correcciones recibidas se ordenan de menor a mayor según el valor absoluto de cada coordenada. Se obtiene un promedio con las cuatro de menor magnitud de cada coordenada. Luego se promedian los valores reales de cada una y esos valores se usan para corregir el GPS 3. Los resultados de aplicar esta técnica se muestran en la tabla 84

Día	Muestra	Error absoluto (metros)
1	1	1.19
	2	0.54
2	1	2.55
	2	1.94
	3	2.50

**Tabla 84.** Error absoluto en el móvil luego de aplicar el promedio de la primera mitad de las correcciones recibidas ordenadas de menor a mayor.

Por lo tanto, a partir de las tablas y resultados presentados se puede concluir que la mejor técnica es promediar los resultados de las técnicas por medio de las cuales se calculó oportunamente la corrección. Con esta técnica se pueden obtener posiciones con un error máximo de 2.49 metros y que en ocasiones se reduce a 0.54 metros.

### **5.7. Resumen**

Se han presentado los resultados de aplicar las técnicas propuestas en los capítulos 3 y 4. No se puede determinar con unanimidad cuál es la mejor técnica a usar dado que en algunas ocasiones una se ajusta mejor que otra. Esto puede ser debido a varios factores que provocan oscilaciones en las mediciones tomadas con el receptor. En este sentido se puede mencionar que cuando se usó el receptor GPS 3 para determinar el error absoluto entre otro receptor y éste, casi siempre se obtuvieron errores tanto en los datos originales como en los tratados por las técnicas. En algunos casos los errores eran mayores a la distancia a la cual estaba posicionado el otro receptor, esto puede ser llamativo pero los experimentos se hicieron con distancias cortas para ver la precisión que tenían las muestras tomadas y las procesadas. Por lo tanto, la mejor técnica a implementar, tal vez no sea única sino un compendio de ellas. Sin embargo, se logró acotar el error absoluto del GPS en un rango que va desde los 0.21 metros a los 5.74 el 95% de las veces.

Por último, se propusieron técnicas adicionales para poder determinar una única manera de mejorar la precisión. Con estas técnicas se logró acotar aún más el error llevándolo a un máximo de 2.49 metros.

## Capítulo 6

### Conclusiones y trabajos futuros

#### *6.1. Conclusiones derivadas del desarrollo de la tesis*

El desarrollo de esta tesis se dividió en tres etapas bien definidas. La primera dirigida principalmente por la investigación de técnicas y algoritmos de tiempo real para mejorar la precisión del sistema NAVSTAR-GPS. La segunda, impulsada por el desarrollo de una herramienta de análisis de información entregada por receptores GPS en forma de sentencias del estándar NMEA-0183. Por último, la tercera, relacionada al trabajo de campo para adquirir las muestras y luego procesarlas.

El resultado final es la construcción de un sistema diferencial de posicionamiento relativo dotado de receptores GPS estándar de bajo costo. El área de aplicación de este tipo de desarrollos abarca tanto el posicionamiento de maquinaria agrícola en el campo como la toma de medidas de precisión en el terreno. El sistema fue usado para probar las técnicas propuestas en las afueras de la ciudad de Tandil. Sin embargo, permite configurar todos los parámetros con el objetivo de ser usado en cualquier región del planeta.

Si bien no se puede determinar una técnica única que mejore la precisión para todos los casos, se propusieron técnicas adicionales para poder determinar una única forma de mejorar la precisión.

De los resultados obtenidos, se puede notar que el uso del filtro de Kalman suaviza las mediciones permitiendo tener una posición más constante en el tiempo. Esto posibilita establecer el error del sistema dado que las oscilaciones son amortiguadas y la nueva medición puede ser contrastada fácilmente con la estimada por el filtro.

El uso de filtros paso bajo/alto permitió descartar posiciones que, según parámetros relevantes como el SNR, PDOP y el diferencial de satélites usados para obtener la posición, tenían incluido un error considerable.

Aplicar lógica difusa para ponderar la desviación estándar del error, permitió hacer una estimación más ajustada al no tratar a todas las mediciones con el mismo error ya que según los parámetros recientemente expuestos podían presentar menor o mayor grado de error.

Se ha logrado acotar el error absoluto del GPS en un rango que va desde los 0.21 a los 5.74 metros el 95% de las veces. Pero con técnicas adicionales para unificar las mejoras



se logró acotar aún más el error llegando a posiciones con un error máximo de 2.49 metros y en algunas ocasiones de 0.54 metros.

El diseño de los experimentos fue apropiado para la construcción de la herramienta de manera tal de poner a prueba las técnicas propuestas y desarrolladas ya que las distancias son cortas. Se deben tomar datos de distancias más largas para evaluar el comportamiento del sistema con dichas técnicas.

## 6.2. Aportes

Los aportes están relacionados a la creación de técnicas que permiten obtener los errores del sistema global de navegación por satélite que utilizamos en nuestra región, operado por el departamento de defensa de los Estados Unidos de América, NAVSTAR-GPS. Estos errores son usados para corregir la posición de otros receptores con el fin de mejorar su precisión posicional relativa.

Se crean y ponen a prueba técnicas, que de manera diferencial por medio de posicionamiento relativo de dos receptores, obtienen el error del sistema NAVSTAR-GPS. Las técnicas se basan en funciones matemáticas y geométricas, en análisis de información mediante lógica difusa y en el uso de filtros.

Las diversas técnicas específicas permiten mitigar el error y la implementación de una u otra depende de la plataforma donde se vaya a usar. Las plataformas van de un sistema embebido con recursos limitados de procesamiento y almacenamiento hasta una computadora portátil mucho más potente. Dichas técnicas pueden ser implementadas de manera aislada o dentro de una herramienta como la desarrollada en esta tesis.

Los experimentos que se llevan a cabo con diferentes conjuntos de datos arrojan mediciones con un error máximo de 2.49 metros ( $\pm 1.25$  metros) y un mínimo de 0.54 metros ( $\pm 0,27$ ) en ciertas ocasiones particulares, el 95% de las veces.

## 6.3. Extensiones y trabajos futuros

Se van a tomar muestras con distancias más largas para verificar la validez de estas técnicas en aplicaciones con escalas reales.

Se va a analizar la elevación y el azimut de cada satélite usado en la solución para ver cómo está conformada la geometría. Con este análisis, se busca conocer la forma geométrica (más allá del parámetro PDOP analizado aquí) de los satélites usados para luego compararla con una “ideal” y así poder descartar o no la posición entregada por el receptor. También con ello se busca poder seleccionar como dato de entrada aquellas

posiciones en las cuales los satélites usados para la solución se encuentren a cierta elevación respecto del horizonte.

Se pretende mejorar la precisión hasta obtener un error máximo de posicionamiento de  $\pm 0,10$  metros. Esta mejora puede incluir el uso de otra señal adicional o sensores que ayuden a minimizar los errores. Las técnicas a analizar son: redes neuronales, algoritmos genéticos, redes bayesianas, geometría computacional, estadística y clustering.

#### **6.4. Producción científica derivada del desarrollo de la tesis**

Durante el desarrollo de esta tesis se presentaron artículos en revistas científicas internacionales y en congresos. Todos relacionados de una u otra forma, ya sea por el tema específico o por haber implementado algunas de las técnicas desarrolladas en otro dominio de aplicación. Asimismo, se han presentado trabajos en concursos de innovación y se ha conseguido financiamiento mediante diferentes organismos para la investigación y el desarrollo de algunos de ellos.

##### **6.4.1. Artículos en revistas internacionales con referato**

1. J. Toloza, N. Acosta and A. De Giusti, “*An approach to determine the magnitude and direction error in GPS system,*” Asian Journal of Computer Science and Information Technology, Volume 2 No. 9, September 2012, pp. 267-271.

El artículo presenta un enfoque basado en funciones matemáticas y algoritmos de tratamiento de información para obtener el error del GPS. Muestra cual es la dispersión de las mediciones de los receptores que repercuten al momento de posicionar un objeto/vehículo en el terreno. Introduce una metodología para el tratamiento de la información y técnicas para mejorar la precisión.

2. J. Toloza and N. Acosta, “*NMEA-0183 sentences analysis tool from the GPS system to increase the positional accuracy,*” International Journal of Telecommunications, Volume 15 Issue 2, August 2012, pp. 23-30.

Este artículo presenta el desarrollo de una herramienta que permite procesar información de sentencias del estándar NMEA-0183 de receptores GPS de uso general. Se detalla el uso y configuración de la herramienta mostrando la potencialidad de la misma al ser adaptable a diferentes situaciones y regiones.

3. N. Acosta and J. Toloza, “*Techniques to improve the GPS precision,*” International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Volume 3 No. 8, August 2012, pp. 125-130.

El artículo presenta un compendio de técnicas que permiten analizar la información contenida en el mensaje transmitido por los satélites del sistema NAVSTAR-GPS, con el fin de mejorar la precisión posicional. Hace especial énfasis en el comportamiento que tienen los errores encontrados.

4. N Acosta and J. Toloza, “A tool for prototyping a precision GPS system,” International Journal of Computers & Technology, Volume 3 No 1, Aug-31 2012, pp. 15-23.

Este artículo presenta un sistema diferencial de posicionamiento relativo dotado de receptores estándar de bajo costo para ser usado en actividades de precisión como el posicionamiento de maquinaria en el terreno o la toma de medidas para delimitar áreas de interés.

#### 6.4.2. Artículos publicados en congresos

1. N. Acosta y J. Toloza. “Simulador robótico de vehículos terrestres”. VII Jornadas Argentinas de Robótica (JAR) 2012-Olavarría-Buenos Aires-Argentina.

Presenta un simulador con sensores y actuadores usado para la conducción de vehículos terrestres. El procesamiento de la información se realiza a través de técnicas como el promedio y el filtro de Kalman dinámico.

2. J. Toloza, N. Acosta and A. De Giusti. “Techniques to determine the magnitude and direction error of GPS system” CACIC 2012-Bahía Blanca-Buenos Aires-Argentina, pp. 1461-1470.

El artículo presenta técnicas como la moda, el promedio, el filtro de Kalman, filtro paso bajo/alto y lógica difusa, para obtener una corrección del sistema GPS. Corrección necesaria para mejorar la precisión del GPS llevándola a errores de  $\pm 2.87$  metros el 95% de las veces y en algunos casos de  $\pm 0.11$  metros.

3. N. Acosta, J. Toloza y M. Poncio. “Sistema de entrenamiento para la conducción de vehículos basado en simulación de entornos virtuales”. TE&ET. 2012- Pergamino-Buenos Aires-Argentina.

El artículo muestra un sistema de entrenamiento que utiliza un simulador robótico para reproducir los movimientos. Dada la oscilación de los valores, se procesa la información mediante técnicas como la moda y el descarte de mediciones fuera de rango.

4. J. Toloza, N. Acosta y M. Poncio. “Herramienta de asistencia en tiempo real y fuera de línea para aumentar la precisión posicional del sistema GPS”. WICC 2012-Posadas-Misiones-Argentina, pp. 826-830.

La herramienta presentada aquí es configurable y permite el agregado de diferentes filtros o técnicas para el tratamiento de información contenida en sentencias NMEA-0183 proveniente de receptores GPS.

5. N. Acosta, M. Marinelli, L. Leiva, M. Vialley, H. Kuna, J. Toloza, C. Kornuta, S. Holowaty y M. Poncio. “Análisis de Factibilidad para el Desarrollo de un Prototipo que calcule en Tiempo-Real la humedad de la Yerba Mate a la salida del sapecador”. WICC 2012-Posadas-Misiones-Argentina, pp. 821-825.

Se propone el uso de un sensor NDVI portátil para adquirir muestras de hojas y palos de yerba mate con el fin de medir su humedad en tiempo real. El tratamiento de dicha información se realiza con filtro de Kalman estático y promedio.

6. Carmona F., Riba A., Frati E., Tejada J., Acosta N. & Toloza J. “*Integración y administración de índices de sensado en la programación y pronósticos de riego presurizado para cultivo de olivo en regiones áridas*”. WICC 2012-Posadas-Misiones-Argentina, pp. 702-706.  
Propone identificar, analizar e interpretar, a través de la utilización de técnicas de análisis de patrones y mecanismos de razonamiento, los valores de variables que integradas a la información de un sistema de gestión de riego, aporten información al proceso de toma de decisión relacionada con la planificación y el pronóstico de riego.
7. J. Toloza y N. Acosta, “*Proyecto de desarrollo de un sistema para asistir en la toma de decisiones en tiempo real en una red de sensores*”, WICC 2011-Rosario-Santa Fe-Argentina, pp. 785-788.  
Se presentan las bases para desarrollar un sistema que contemple datos de sensores variados con el fin de tratarlos para su uso en aplicaciones de tiempo real.
8. J. Toloza, L. Leiva, A. Riba, F. Carmona y N. Acosta, “*Desarrollo de un prototipo de sistema portátil para la detección en tiempo real de la necesidad de riego en cultivos de producción intensiva*”, CACIC 2010-Buenos Aires-Argentina, pp. 962-971.  
Este artículo presenta un experimento hecho con un sensor NDVI portátil con el cual se toman muestras de dos bandejas de pasto en un ambiente controlado. Por medio de la aplicación del promedio se llega a determinar el nivel relativo de humedad de ambas bandejas.
9. C. Aciti, N. Acosta, H. Curti, O. Goñi, L. Leiva, J. Marone, E. Todorovich, J. Toloza, M. Tosini, C. Tommasi y M. Vázquez. “*Plataformas digitales de sistemas de entrada/salida complejos*”. WICC 2010-El Calafate-Santa Cruz-Argentina, pp. 37-41.  
Presenta el estado de un proyecto donde se utilizan diferentes plataformas hardware que permiten la obtención de datos reales de diferentes sensores y su relación con determinados actuadores.
10. J. Toloza y N. Acosta, “*Proyecto de desarrollo de un sistema de control de flotas de vehículos*”, WICC 2009-San Juan-Argentina, pp. 457-461.  
El artículo muestra el desarrollo de un sistema conformado por hardware y software. En el primer caso, un dispositivo que envía mensajes de texto con datos sobre su ubicación y valores de los sensores conectados a él. En cuanto al software presenta el sistema de georreferenciación desarrollado y usado para mostrar la ubicación de cada móvil de la flota. Esto permitió comenzar a trabajar con sistemas GPS y a analizar las fuentes de error.

#### **6.4.3. Trabajos presentados en el concurso nacional de innovaciones INNOVAR, 7<sup>ma</sup> Edición.**

11. Autor y expositor “*GPS de precisión de bajo coste*”, Categoría “Innovaciones en el agro”, Proyecto seleccionado para el catálogo (Pág. 190 ref. 10860), Tecnópolis, Octubre 2011, Buenos Aires, Argentina.

12. Autor y expositor “*Simulador de vehículo con movimiento para entrenamiento de conductores*”, Categoría “Robótica”, Proyecto seleccionado para el catálogo (Pág. 292 ref. 10864), Tecnópolis, Octubre 2011, Buenos Aires, Argentina.

#### **6.4.4. Integrante de proyectos de I+D**

13. Proyecto: “*Diseño de un sonar para invidentes con modo autónomo y/o acoplable a un teléfono inteligente tipo Apple Iphone o similar*”, Financiado por resolución del 20/05/2011 de los proyectos de Cooperación InterUniversitaria Universidad Autónoma de Madrid-Santander con América Latina.
14. Proyecto: “*Análisis de Factibilidad para el Desarrollo de un Prototipo que Calcule en Tiempo-real la Humedad de la Yerba Mate a la salida del Sapegador*”, Financiado por el Instituto Nacional de la Yerba Mate (INYM) a través del Programa Regional de Asistencia al Sector Yerbatero (PRASY) resolución 139/11 en cooperación con la Universidad Nacional de Misiones.
15. Proyecto: “*Desarrollo de un prototipo de GPS diferencial de bajo costo*”, empresa IEXILEF SA (Tandil). Resolución ANR NA 126/08 del FONTAR res 229/10.
16. Proyecto: “*Plataformas digitales de sistemas de entrada/salida complejos*” (2010-2012). Financiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNCPBA. (Código 0-C214 del Consejo Superior).
17. Proyecto: “*Desarrollo de un simulador de vehículos terrestres*”, empresa IEXILEF SA (Tandil). Resolución ANR NA 439/10 del FONTAR – FONSOFT 2009.

# Anexo I

## Herramienta desarrollada

En esta sección se presenta una herramienta de análisis de datos, tanto “*on-line*” como “*off-line*”, provenientes del sistema GPS con el propósito de asistir a un usuario en aplicaciones que requieren mayor precisión que la entregada originalmente. Se llega a una precisión posicional con un error máximo de  $\pm 1.25$  metros y un mínimo de  $\pm 0,27$  metros. El resultado de haber desarrollado una técnica para conocer el error del GPS es usado como uno de los algoritmos de corrección de errores GPS. La herramienta provee una interfase usable y configurable donde se puede parametrizar el análisis que se va a realizar sobre los datos.

El sistema se divide en dos partes: una base de referencia y una móvil. Para los experimentos se utiliza un enlace wireless punto a punto entre estos dos. Los sistemas se comunican por socket mediante protocolo TCP/IP.

Para el análisis de los datos se tienen en cuenta los siguientes campos:

- Latitud
- Longitud
- PDOP (Positional Dilution Of Precision)
- Satélites trackeados
- Satélites visibles, y por cada uno:
  - Código PRN del satélite
  - Elevación en el horizonte en grados
  - Acimut en grados
  - Relación señal-ruido (SNR)

EL PDOP, SNR y la diferencia de satélites trackeados por los tres GPS son los parámetros de entrada a un sistema difuso. La salida del mismo pondera la ganancia del filtro de Kalman adoptado para la solución de la posición.

## Procedimiento de cálculo de correcciones

El GPS diferencial (DGPS) se basa en el principio que los errores de posicionamiento afectan de forma correlacionada a receptores cercanos dentro de un cierto radio. El

presente proyecto también se basa en este principio pero en este caso se usa un receptor estándar de bajo costo, a diferencia del usado en el DGPS.

Para obtener las mediciones, se utilizan tres receptores GPS Garmin 18X USB conectados a dos notebooks. La estación base de referencia se conforma por una notebook y dos de los tres receptores GPS; el móvil por la notebook y el receptor GPS restante.

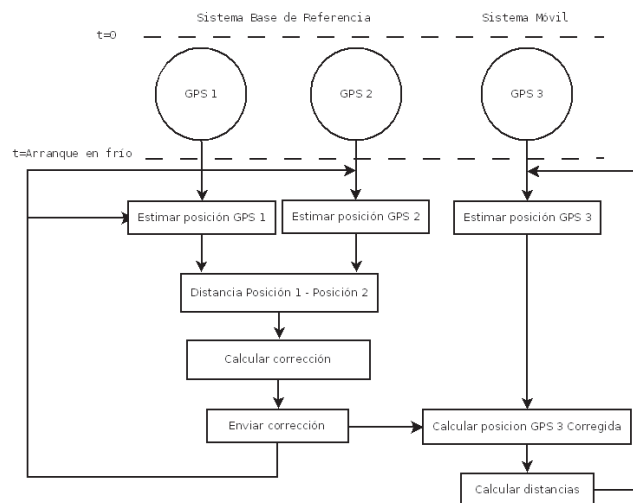
En el sistema base se obtienen mediciones de los receptores GPS conectados y luego de un cierto tiempo, necesario para la estabilización del sistema, se estiman dos posiciones. La estimación de las posiciones se realiza con un filtro de Kalman resultado que es ponderado por un factor que resulta de aplicar lógica difusa a algunos de los parámetros elegidos para tal fin. Se elige el punto estimado del receptor GPS 1 como punto de anclaje de todo el experimento. Con esta estimación y con la del receptor GPS 2 se procede a calcular la distancia, la cual se contrasta con la real. De esta comparación y luego de aplicar ciertas funciones geométricas, se obtienen las correcciones necesarias para luego ser transmitidas a las unidades móviles. Para no sobrecargar el sistema con cálculos innecesarios, se establece un umbral configurable que permite tener un error acotado sobre la distancia real que existe entre los dos receptores GPS de la estación base. Todas las correcciones se conforman de una magnitud y dirección para que el receptor móvil pueda determinar hacia donde y cuanto se debe mover su medida para obtener una posición de mayor precisión. En el caso de no encontrar una diferencia significativa entre la distancia calculada con las posiciones estimadas y la real, la corrección tiene una magnitud nula.

Por su lado, el sistema móvil también estima una posición luego de estabilizado el sistema. Al finalizar este tiempo, queda a la espera de recibir correcciones desde la estación base. Por lo tanto, con estas correcciones y la posición estimada, el móvil corrige su posición.

Ambos sistemas estiman una nueva posición cada un segundo, tiempo en el cual se renueva la posición entregada por el receptor. El cálculo de una nueva corrección se realiza también cada un segundo, pero se puede modificar fácilmente mediante la interfase del sistema.

A manera de obtener un indicador de rendimiento del sistema se procede a calcular las distancias resultantes entre los tres receptores GPS. Con estos valores se deduce el error absoluto para verificar la mejora de precisión obtenida con el procesamiento de los datos realizados. La figura 59 muestra un diagrama de flujo del sistema. Aquí se

observa como es el proceso de la toma de muestras tanto en la estación base como en el sistema móvil. En primer lugar, luego de pasar la línea de tiempo de arranque en frío, tanto en el sistema base como en el móvil se estiman las posiciones de cada uno de los receptores. En el sistema base, se obtiene la distancia entre las posiciones 1 y 2 estimadas. A la salida de este proceso, se realiza la corrección necesaria de manera de cumplir con la distancia real establecida al momento de posicionar ambos receptores (posicionamiento relativo). Por último, se difunde esta corrección para que cualquier receptor móvil pueda mejorar su precisión corrigiendo la posición estimada con la corrección recibida desde la base. Además, en el sistema móvil se calcula la distancia a cada uno de los receptores para medir la eficiencia del sistema en general.



**Figura 59.** Diagrama de flujo.

## Parametrización de la herramienta desarrollada

Se presenta la forma de configurar la herramienta acorde a la necesidad del usuario. La misma puede ser usada en diferentes aplicaciones y tanto *on-line* como *off-line* para lo cual las parametrizaciones se mantienen.



## Sistema base

A continuación se detallan los parámetros configurables de la herramienta mostrados en la figura 60.

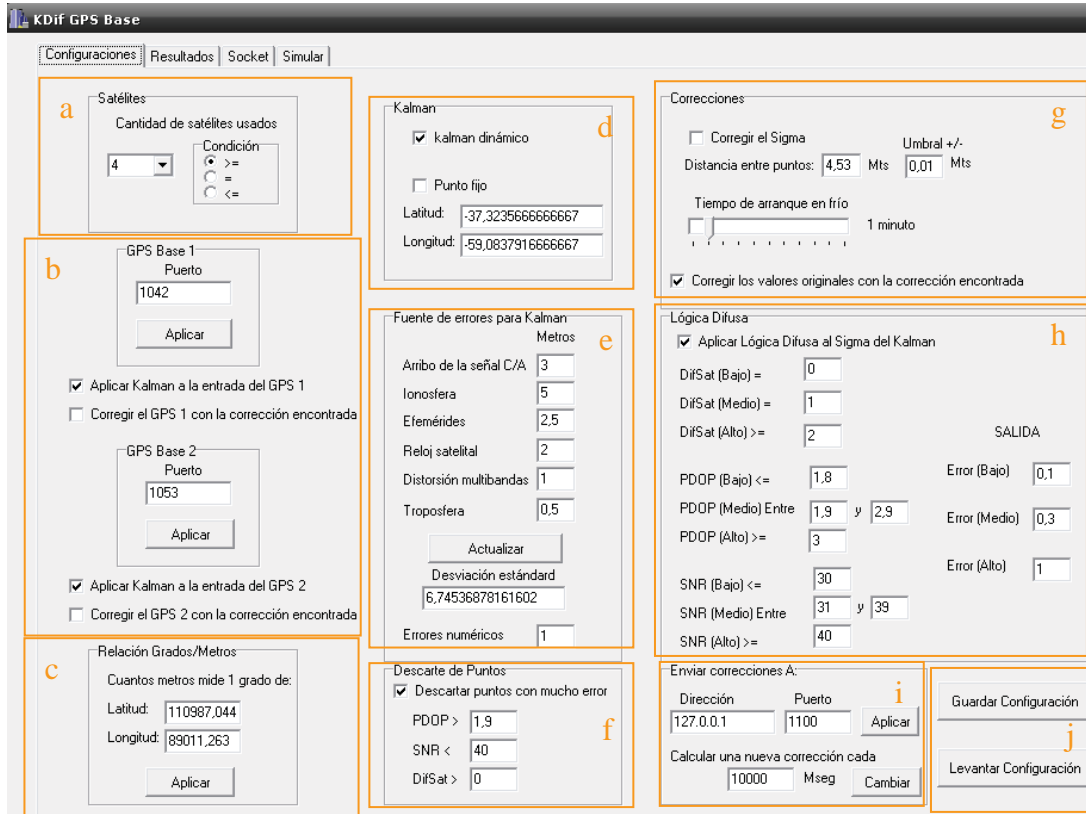


Figura 60. Pantalla de configuración de parámetros sistema base.

- El primer grupo, ubicado en la parte superior izquierda, está relacionado a la cantidad de satélites que se usan para obtener la solución de la posición. El objetivo es poder analizar sólo los registros que cumplan con una cantidad de satélites usados en la solución, o que tenga una cierta cantidad como mínimo o como máximo. Todo registro que no cumpla con esta restricción, es ignorado.
- Debajo de este grupo, se encuentran los relacionados a la adquisición de datos del GPS 1 y 2. Se puede configurar: el puerto por el que se atiende a cada uno, si aplicar o no filtro de Kalman y si se desean modificar los datos originales de cada GPS con las correcciones halladas.
- En la parte inferior izquierda, se encuentra la configuración correspondiente a lo que mide en metros un grado de latitud o longitud, ya que en diferentes lugares de la corteza terrestre varía debido a la asimetría de la tierra.
- Hacia el centro de la pantalla, en la parte superior, se ubica un grupo de opciones relacionado a qué tipo de filtro de Kalman aplicar (dinámico o estático). Si se

aplica un filtro dinámico, este se retroalimenta del error que existe entre el valor estimado y la medida tomada. Existe una opción que permite comparar la estimación con una posición fija bien conocida y la diferencia entonces retroalimenta el filtro. En cambio, en el estático sólo se estima un valor y no se tiene en cuenta la medida real luego de la estimación.

- e. Más abajo en la parte central, se configuran los diferentes tipos de errores necesarios para obtener la desviación estándar necesaria para poder aplicar el filtro de Kalman.
- f. En la región inferior central, hay un grupo de opciones específicas para el descarte de puntos. Aquí se ingresan los rangos permitidos en los cuales se aceptan mediciones o se descartan. Toda medición fuera de este rango es descartada.
- g. En la parte superior derecha, y dado que nos encontramos en la descripción del sistema base de referencia, se ubican las opciones correspondientes al posicionamiento relativo ya que se puede modificar la distancia entre los dos receptores. Adicionalmente, existe la posibilidad de modificar el umbral, que representa más/menos la tolerancia que se le da cuando se calcula la distancia entre los dos GPS y se contrasta con la real. Además, el tiempo de arranque en frío representa cuanto tiempo se toman muestras para luego estimar un valor. Existen dos opciones más; una referente a corregir el sigma lo que significa que cuando se estima una posición y se compara con la medición, la diferencia se agrega al sigma que viene dado como la desviación estándar de los errores del sistema GPS; la otra opción de corregir los valores originales tiene que ver con modificar los valores que entrega el sistema GPS, por si se desea almacenar estos resultados ya modificados.
- h. En la región central derecha, se parametriza la aplicación de lógica difusa. En el caso de aplicarla se configura el valor de cada parámetro. Los parámetros tomados en cuenta para la entrada al sistema difuso son:
  - PDOP (Positional Dilution of Precision) que representa un factor de calidad de la geometría de los satélites en vista que tiene cada receptor en un cierto instante. A menor valor, indica mejor geometría y mayor precisión en los cálculos de posición.

- SNR (Signal to Noise Ratio) relación señal ruido que indica la calidad de la señal recibida. A mayor valor, menor ruido y señal más limpia. Cada fabricante establece un valor y rango óptimos.
- Magnitud de la diferencia de satélites trackeados entre los tres receptores (los dos de la base y el móvil), ya que se parte de la hipótesis de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual a receptores cercanos, cuanto menor sea la diferencia de satélites trackeados por los tres receptores, más correlación va a tener el error encontrado. Por lo tanto, la corrección transmitida al móvil va a ser la misma que tiene dicho receptor ya que está totalmente correlacionada a la de los receptores de la estación base.

Los rangos de valores óptimos para los tres parámetros, a criterio del autor según la bibliografía indagada y los experimentos realizados, se muestran en las tablas 85, 86 y 87 respectivamente.

PDOP			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	1.9	Bueno
Medio	2	2.9	Medio
Alto	>= 3		Malo

**Tabla 85.** Rango de valores óptimos para el PDOP.

SNR			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	29	Malo
Medio	30	39	Medio
Alto	>= 40		Bueno

**Tabla 86.** Rango de valores óptimos para el SNR.

Diferencia de satélites			
	desde	hasta	estado
Bajo	0	0	Bueno
Medio	1	1	Medio
Alto	>= 2		Malo

**Tabla 87.** Rango de valores óptimos para la diferencia de satélites trackeados.

Además, es posible modificar los valores de salida. Este subsistema difuso calcula la ponderación que se le da a la ganancia del filtro de Kalman. En la tabla 88 se muestran los valores cualitativos (alto, medio y bajo) correspondientes a los diferentes parámetros (PDOP, SNR y diferencia de satélites) con los cuales se arman las reglas de inferencia. Los valores cuantitativos (0.2, 0.5 y 1) corresponden a la salida que produce el sistema difuso que pondera el resultado estimado por el filtro de Kalman. Los valores se eligen a criterio del autor según los experimentos que se llevan cabo.

Diferencia de satélites: <b>Bajo</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	0,5	0,5	1
	Alto	0,2	0,5	1
Diferencia de satélites: <b>Medio</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	1	1	1
	Alto	0,5	1	1
Diferencia de satélites: <b>Alto</b>				
		PDOP		
		Bajo	Medio	Alto
SNR	Bajo	1	1	1
	Medio	1	1	1
	Alto	1	1	1

*Tabla 88. Reglas de inferencia del sistema difuso.*

- c. Por último, en la parte inferior derecha, se ubican las opciones relacionadas al envío de las correcciones encontradas. Las correcciones calculadas por el sistema comunican por socket; la dirección y el puerto son configurables. También se establece cada cuanto tiempo generar una nueva corrección a ser enviada.
- d. Todas las opciones elegidas se pueden guardar o cargar para futuras ejecuciones del sistema mediante los botones para tal fin ubicados también en la parte inferior derecha.

Como se puede apreciar la configuración de parámetros cubre un amplio espectro. Los más sencillos tienen dos estados (activo o no) pero los demás están conformados por un

rango de valores. Para poder experimentar se genera un archivo de parametrización, donde se ingresa un parámetro y su valor. En algunos casos el número de combinaciones llega a algunos millones y en otros a miles. Se eligen algunos valores con cierta coherencia para el experimento y la ejecución lleva varios meses en un computador de escritorio con cuatro núcleos y 16Gb de RAM.

Dado que la herramienta está pensada para funcionar en diferentes lugares de características heterogéneas se usan relaciones y configuraciones para poder personalizar el uso de acuerdo a las necesidades. Las relaciones y configuraciones que se usan son:

- Relación Grado/Metros en Latitud: dada la asimetría, en diferentes lugares de la tierra la distancia que mide un grado de Latitud varía.
- Relación Grado/Metros en Longitud: ídem a Latitud
- Tiempo de arranque en frío: se considera un tiempo de arranque para que el sistema se estabilice. En este tiempo se recogen muestras del dispositivo y recién a su término se realiza una estimación. Esto tiene como objetivo reducir o amortiguar los errores sistemáticos y aleatorios del sistema GPS.
- Umbral de distancia de puntos: se puede determinar de manera precisa el intervalo total de la medida de distancia entre los dispositivos de la base. Como el posicionamiento es relativo y se conoce su distancia, se puede agregar un valor  $\pm$  ya que existe la posibilidad que el elemento de medida de distancia no sea suficientemente preciso. Además, reduce la carga computacional al no tener que procesar datos si la distancia se encuentra dentro del umbral permitido.

### ***Sistema móvil***

El sistema móvil presenta una pantalla de configuración similar a la del sistema base. Las diferencias radican en poder incrementar las iteraciones del filtro de Kalman a aplicarle a los datos originales del GPS 3 (o móvil), si está activada la opción de aplicar el filtro. Además, se elije si se quiere tener en cuenta la corrección recibida o no y si luego de aplicar la corrección se desea volver a aplicar el filtro a ese resultado. También, se configuran las distancias a los diferentes receptores GPS para luego evaluar el comportamiento del sistema. Además, el sistema móvil presenta una pantalla donde se observan tanto la recepción de los datos del dispositivo GPS, como así también las correcciones provenientes de la base de referencia. Por último, en una pantalla separada

se divisan los satélites que está trackeando cada receptor GPS en un instante para obtener la posición. El resto de las opciones son iguales a las del sistema base.

La parametrización presentada hasta aquí corresponde a cómo configurar el sistema para su análisis “en línea”. Si se desea trabajar en modo “fuera de línea” existe una pestaña “Simular”, como se aprecia en la figura 3 mostrada anteriormente, que permite analizar los datos y obtener los resultados correspondientes, los cuales son presentados en la pestaña “Resultados”.

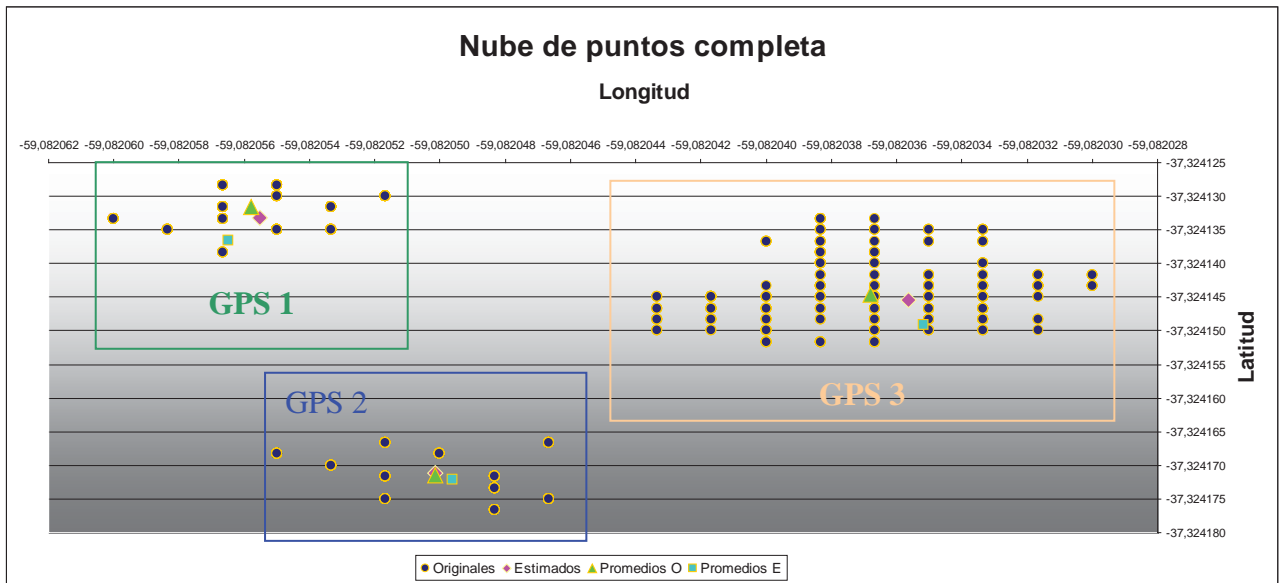
### ***Resultados derivados de la utilización de la herramienta desarrollada***

Se seleccionan diferentes conjuntos de datos a ser analizados. El primero es el obtenido en el arranque en frío del sistema. Está conformado por tres archivos -uno de cada GPS- con más de 20 minutos de muestras cada uno a razón de 1 por segundo lo que suma un total de 1200 muestras por cada receptor.

Otros conjuntos se generan al mover el GPS 3 al punto A, B y C.

Se realizan diferentes pruebas para ver cómo se comporta todo el sistema ante el cambio de algunos parámetros. Entre las diversas corridas se modifican los valores de las fuentes de error, la aplicación de lógica difusa o no, los valores de entrada al sistema difuso, los valores de salida, el tiempo de arranque en frío, umbrales para el descarte de puntos con mucho error, si aplicar filtro de Kalman a los valores originales de los GPS o a los valores estimados, entre otros.

La cantidad de puntos analizados en el arranque en frío es la misma para los 3 receptores. En la figura 61, se muestra cómo están desplegados los receptores al momento de la adquisición de datos. Se observa la gran dispersión de las muestras para los tres receptores. El valor estimado corresponde al obtenido por la herramienta al finalizar el tiempo de arranque en frío al igual que el original que es el valor que entrega el sistema GPS sin procesamiento alguno. Por otro lado, los promedios originales (O) y estimados (E) son calculados con todas las muestras del arranque en frío.



**Figura 61.** Dispersión de los datos del GPS 3 (GPS Móvil).

En las tablas 89, 90 y 91 se observa que en todos los casos las distancias calculadas al procesar los datos son más precisas que si no se realiza ningún procesamiento o si se implementa el promedio directamente.

	Posición GPS 1		Posición GPS 2		Distancia (metros)	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada
Estimado	-37,324128	-59,082059	-37,324169	-59,082056	4,53	4,53
Original	-37,324131	-59,082058	-37,324175	-59,082041	4,53	5,03
Promedio	-37,324131	-59,082055	-37,324171	-59,082050	4,53	4,44

**Tabla 89.** Comparativa de distancias mediante diferentes métodos.

	Posición GPS 1		Posición GPS 3		Distancia (metros)	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	calculada
Estimado	-37,324128	-59,082059	-37,324145	-59,082040	2,81	2,52
Original	-37,324131	-59,082058	-37,324145	-59,082038	2,81	2,31
Promedio	-37,324131	-59,082055	-37,324144	-59,082036	2,81	2,22

**Tabla 90.** Comparativa de distancias mediante diferentes método

	Posición GPS 3		Posición GPS 2		Distancia (metros)	
	Latitud	Longitud	Latitud	Longitud	real	Calculada
Estimado	-37,324145	-59,082040	-37,324169	-59,082056	2,77	3,06
Original	-37,324136	-59,082035	-37,324175	-59,082041	2,77	4,29
Promedio	-37,324144	-59,082036	-37,324171	-59,082050	2,77	3,19

**Tabla 91.** Comparativa de distancias mediante diferentes métodos.

En la tabla 92, se muestran los errores calculados luego del procesamiento y se observa que los valores correspondientes a los estimados por la herramienta, son menores a los demás valores obtenidos por otros medios.

GPS 1 - GPS 2			
	distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
	real	calculada	
estimada	4,53	4,53	0,00
original	4,53	5,03	0,50
promedio	4,53	4,44	0,08
GPS 1 - GPS 3			
	distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
	real	Calculada	
estimada	2,81	2,52	0,28
original	2,81	2,31	0,49
promedio	2,81	2,22	0,58
GPS 2 - GPS 3			
	distancia (metros)		Error Absoluto (metros)
	real	Calculada	
estimada	2,77	3,06	0,29
original	2,77	4,29	1,52
promedio	2,77	3,19	0,42

**Tabla 92.** Errores absolutos.

### ***Conclusiones derivadas del desarrollo de la herramienta que asiste al usuario***

Se desarrolla una herramienta que permite asistir a usuarios en el proceso de posicionar un objeto mediante el sistema GPS con el objetivo de obtener distancias más precisas. Se llega a obtener posiciones con un error máximo de  $\pm 1.25$  metros y un mínimo de  $\pm 0,27$  metros. El desarrollo es flexible, usable y aumenta notablemente la precisión de las posiciones obtenidas con el GPS sin mejoras. Se construye con receptores estándar lo



que lo hace económico, mantenible y al alcance de cualquier usuario con fines variados. Los principios están basados en funciones matemáticas y geométricas, filtros condicionales y análisis de información usando lógica difusa. Es posible agregar etapas de análisis de datos con diferentes algoritmos o técnicas, lo que lo hace extensible.

La elevación y el azimut de cada satélite trackeado son algunos de los parámetros a analizar para ver cómo está conformada la geometría (más allá del parámetro PDOP analizado aquí). Luego de obtener alguna información de estos parámetros se va a proceder a compararla con una “ideal” para ajustar la posición.

## Referencias Bibliográficas

1. Asdrúbal V. (2004) *De la técnica a la modernidad: Construcciones técnicas, ciencia, tecnología y modernidad*. Universidad de Antioquia, 263 pp.
2. Bisnath S. B. & Gao Y. (2009) *Innovation: Precise Point Positioning*. GPS WORLD Volumen 20 Number 4, pp. 43-50.
3. Bulusu N. & Jha S. (2005) *Wireless Sensor Networks – A Systems Perspective*. Artech House, 321 pp.
4. Chakrabarty K. & Iyengar S.S. (2005) *Scalable Infrastructure for Distributed Sensor Networks*. Birkhäuser, 194 pp.
5. Chen Y. & Kobayashi H. (2002) *Signal Strength Based Indoor Geolocation*. IEEE ICC, pp. 436–439.
6. Clarke B. (1998) *Aviator's Guide to GPS*. 3<sup>rd</sup> Edition, McGraw-Hill, 325 pp.
7. Cordeiro C. & Agrawal D. P. (2011) *Ad-Hoc & Sensor Networks – Theory and Applications*. 2<sup>nd</sup> Edition, World Scientific, 600 pp.
8. Correia P. (2002) *Guía práctica del GPS*. Marcombo, 186 pp.
9. Dardari D., Falletti E. & Luise M. (2012) *Sattellite and Terrestrial Radio Positioning Techniques: A Signal Processing Perspective*. 1<sup>st</sup> Edition, Elsevier, 458 pp.
10. Di Lecce V., Amato A. & Piuri V. (2008) *Neural Technologies For Increasing The GPS Position Accuracy*. International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems And Applications (CIMSA), Istanbul, Turkey, IEEE, pp. 4-8.
11. Eom H. & Lee M. (2010) *Position Error Correction for DGPS Based Localization using LSM and Kalman Filter*. International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Gyeonggi-do, Korea, IEEE, pp. 1576-1579.
12. Featherstone S. (2004) *Outdoor Guide to Using Your GPS*. Creative Publishing International, Inc., 192 pp.

13. Feldmann T., Bauch A., Piester D., Esteban H., Palacio J., Galindo F.J., Gotoh T., Maeno H., Weinbach U. & Schon S. (2009) *GPS carrier phase and precise point positioning time scale comparisons using different software packages*. Frequency Control Symposium, 2009 Joint with the 22nd European Frequency and Time Forum, IEEE, pp. 120-125.
14. Freedon W., Zuhair Nashed M. & Sonar T. (2010) *Handbook of Geomathematics*. Volume 1, Springer, 1350 pp.
15. Ghavami M., Michael L.B. & Kohno R. (2007) *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 334 pp.
16. Gibbs B. P. (2010) *Advanced Kalman Filtering, Least-Squares and Modeling: A Practical Handbook*. John Wiley & Sons, 640 pp.
17. Gleason S. & Gebre-Egziabher D. (2009) *Gnss Applications and Methods*. Artech House, 508 pp.
18. GPS World (serial online) (2002) *CSI Wireless Differential Software Patented*. Volume 13 Issue 8, EDS Foundation Index, Ipswich, MA. Accessed June 18, 2012. pp. 48.
19. Grewal M. S., Weill L. R. & Andrews, A. P. (2007) *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. 2<sup>nd</sup> Edition, John Wiley & Sons, 552 pp.
20. Grewal M. S. & Andrews A. P. (2008) *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*. 3rd Edition, John Wiley & Sons, 575 pp.
21. Hanif N.H.M., Haron M.A., Jusoh M.H., Al Junid S.A.M., Idros M.F.M., Osman F.N. & Othman Z. (2012) *Implementation of Real-Time Kinematic Data to Determine the Ionospheric Total Electron Content*. 3rd International Conference on Intelligent Systems Modelling and Simulation (ISMS), Kota Kinabalu, Malaysia, IEEE, pp. 238-243.
22. Hać A. (2003) *Wireless Sensor Network Designs*. University of Hawaii at Manoa, Honolulu, USA, John Wiley & Sons Ltd, 391 pp.
23. Ho C. (2011) *An Effective Approach in Improving A-GPS Accuracy to Enhance Hybrid Positioning Computation*. 17th International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA), Toyama, Japan, IEEE, pp. 126-130.
24. Ilčev S. D. (2005) *Global Mobile Satellite Communications for Maritime, Land and Aeronautical Applications*. Springer, 494 pp.

25. Ilyas M. & Mahgoub I. (2006) *Smart Dust: Sensor Networks Applications, Architecture and Design*. CRC/Taylor & Francis, 352 pp.
26. Ilyas M. & Mahgoub I. (2005) *Handbook of Sensor Networks: Compact Wireless and Wired Sensing Systems*. CRC Press, 864 pp.
27. Kalman R. E. (1960) *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*. Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering, 82 (Series D): 35-45, Research Institute for Advanced Study, Baltimore, Maryland.
28. Karl H. & Willig A. (2007) *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons Ltd, 524 pp.
29. Li J. & Wu M. (2009) *A Positioning Algorithm of AGPS*. International Conference on Signal Processing Systems, Singapore, IEEE, pp. 385-388.
30. Lipták B. G. (2005) *Instruments Engineers' Handbook: Process Control and Optimization, Volumen 2*. 4<sup>th</sup> Edition, CRC Press, 2464 pp.
31. López H. H. (2002) *Geociencias Topografía, Cartografía, GPS-GLONASS, Posgar 94*. Editorial Universitaria de Misiones, Posadas 2002, pp. 161-185.
32. Love A. W. (1994) *GPS, atomic clocks and relativity*. Potentials, Volume 13 Issue 2, IEEE, pp. 11-15.
33. Maini A. K. & Agrawal V. (2010) *Satellite Technology: Principles and Applications*. 2nd Edition, John Wiley & Sons, United Kingdom, 704 pp.
34. Misra P. & Enge P. (2010) *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*. New York, Ganhga-Jamuna Press, 590 pp.
35. Olmedillas J. C. (2012) *Introducción a los sistemas de navegación por satélite*. 1<sup>era</sup> edición en castellano, Editorial UOC, 182 pp.
36. Ott L. E. (1996) *The OMNISTAR Virtual Base System*. Position, Location and Navigation Symposium, IEEE, pp. 590-595.
37. Pallás Areny R. (2004) *Sensores y acondicionadores de señal*. 4<sup>a</sup> Edición, Marcombo, 494 pp.
38. Park Y. S., Pullen S. & Enge P. (2008) *Mitigation of Anomalous Ionosphere Threat to Enhance Utility of LAAS Differentially Corrected Positioning Service (DCPS)*. Position, Location and Navigation Symposium, IEEE, pp. 285-293.

39. Perdomo R. (2012) *Sensado remoto y agricultura de precisión*, curso dictado en la I Escuela de Verano de la Universidad Nacional de La Plata, 13-18 de Febrero de 2012.
40. Rao (2010) *Global Navigation Satellite Systems*. Tata McGraw-Hill Education, 478 pp.
41. Satheesh G. (2005) *Global Positioning Systems: Principles and Applications*. Mc-Graw Hill, 337 pp.
42. Srinivasan A. (2006) *Handbook of Precision Agriculture: Principles And Applications*. Routledge, New York, 683 pp.
43. Urrutia J. (2006) *Cartografía, orientación y GPS*. Etor-Ostoa, 294 pp.
44. Van Diggelen F. (2009) *A-GPS, Assisted GPS, GNSS, and SBAS*. Artech House, 380 pp.
45. Von Witzleben (1942) *Manual de táctica*. Traducido por Heriberto Kurt Brennier y Alberto Sánchez de Bock, Circulo Militar, Biblioteca del Oficial, pp. 13.
46. Xu G. (2007) *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 340 pp.
47. Zandbergen P. A. & Arnold L. L. (2011) *Positional accuracy of the Wide Area Augmentation System in consumer-grade GPS units*. Computers & Geosciences Volume 37 Issue 7, Elsevier, pp. 883-892.