



# COMPARATIVA Y REPRESENTACIÓN EN BASE A LA PRECISIÓN DE UN RECEPTOR EN COMBINACIÓN CON DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSMISIÓN GNSS

**Iria Dopico Fernández**

Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación UOC-URL

Tecnologías de radiocomunicación

**Gonzalo Seco Granados**

**Germán Cobo Rodríguez**

Enero de 2018



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-  
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)



A mi familia, a la real y a la que la vida me ha  
ido poniendo en el camino.

*“Would you tell me, please, which way I ought to go from here?”*  
*“That depends a good deal on where you want to get to,” said the Cat.*  
*“I don’t much care where—” said Alice.*  
*“Then it doesn’t matter which way you go,” said the Cat.*

**Lewis Carrol, Alice in Wonderland**



## Resumen

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis teórico comparativo de los parámetros de calidad de la precisión con la que se puede posicionar un receptor en base a la distribución de unos transmisores que pueden estar o no sincronizados. Se aborda mediante la creación de unas librerías y una interfaz gráfica que permitan el análisis de los parámetros de DOP (*Dilution of Precision*) según la calidad de los observables y la distribución de los transmisores.

Para ello, desde el conocimiento de cómo calculan los Sistemas Globales de Navegación GNSS la posición final, y siempre con posición del receptor desconocida, se opera sobre las ecuaciones de posición para obtener los parámetros DOP en los siguientes supuestos: con un solo sistema emisor, con varios sistemas y con presencia de estaciones de referencia de distancia o pseudodistancia. Para el análisis también se tiene en cuenta la necesidad de gestionar la calidad de las señales recibidas mediante una penalización o bonificación que se regula a través de una matriz de pesos ponderados.

Una vez cubierto el estudio teórico, se traslada a unas rutinas Matlab que replican los cálculos que las matrices de posición y geometría realizan en base a unos parámetros de entrada que simulan los supuestos anteriormente indicados.

Finalmente, también con Matlab, se realiza una interfaz gráfica sencilla que permita a un usuario final comparar y visualizar la variabilidad de los parámetros DOP bajo distintas situaciones: con un receptor estático o con un receptor en movimiento y en presencia de uno o varios sistemas emisores de coordenadas.

### Palabras clave

DOP, Dilution of Precision, GNSS, *offset*, pseudorrango, radio-balizas, TDOA, WDOP.

## Abstract

The main goal of this project is to perform a comparative analysis of the impact of several not-synchronized geopositioning systems over the quality of the position calculated by an end receiver.

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis teórico comparativo de los parámetros de calidad de la precisión con la que se puede posicionar un receptor en base a la distribución de unos transmisores y de la calidad de los observables de pseudorange de cada uno.

This objective is addressed by the creation of code libraries and a graphic interface that, together, allow the analysis of DOP (Dilution of Precision) parameters dependant of the transmitters and the quality of the observables. Based on the method for calculating final position in Global Navigations Satellite Systems (GNSS), analysis of the position equations has been done with the purpose of obtaining DOP expressions in the following scenarios: position information received from one GNSS emitter system, from several systems or from a reference station (radio-beacon) that propagates either distance or pseudorange information. All these calculations are done without taking into account the receiver's final position. The analysis also covers the importance of evaluating the quality of the received information with a weighted matrix to level up.

Once the theoretical approach has been covered, the results have been translated into Matlab routines that replicate the calculations made by the Position or Geometry matrixes.

Finally, and with Matlab, a simple graphic interface has been created so an end user can compare and visualize the variability in DOP parameters under the following conditions: with a receiver being static, with a receiver in movement or under the presence of one or several positioning systems.

## Keywords

DOP, Dilution of Precision, GNSS, offset, pseudorange, radio-beacons, TDOA, *Time Difference of Arrival*, WDOP.

## Contenido

Resumen.....	6
Abstract .....	7
Contenido .....	8
Índice de tablas y figuras.....	10
Tablas .....	10
Figuras .....	10
1 INTRODUCCIÓN.....	13
1.1 Contexto y justificación del trabajo .....	13
1.2 Objetivos del proyecto .....	13
1.3 Enfoque y método seguido .....	14
1.4 Planificación del Trabajo .....	15
1.4.1 Riesgos del proyecto .....	20
1.5 Breve índice de los productos obtenidos.....	21
1.6 Breve descripción de los capítulos de la memoria.....	21
2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GEOPOSICIONAMIENTO.....	23
2.1 Los sistemas de geoposicionamiento global.....	23
2.2 Cálculo de la posición en el receptor GNSS.....	27
2.2.1 El mensaje de navegación .....	27
2.2.2 Cálculo de la posición.....	28
2.3 Errores en el cálculo de la posición.....	31
2.3.1 Errores de geometría: DOP .....	31
2.3.2 Otros errores .....	33
Errores en los parámetros enviados en el mensaje de navegación.....	33
Incertidumbre respecto al medio de propagación .....	33
Interferencias y ruidos en el receptor.....	33
2.4 Posicionamiento diferencial y sistemas de cobertura aumentada.....	34
2.5 Los sistemas de geoposicionamiento local .....	36
3 MATLAB Y SUS SISTEMAS DE INTERFACES .....	38
MATLAB UI .....	38
4 DESARROLLO DEL PROYECTO: Impacto de los distintos sistemas satelitales en las medidas de precisión.....	39
4.1 Ecuaciones de posición .....	39
4.1.1 Caso general.....	39
4.1.2 Sistemas con varios tipos de offset.....	41



4.1.3	Balizas fijas con medidas de distancia.....	41
4.2	Cálculo de DOP .....	43
4.2.1	Estudio de la matriz de pesos (WDOP).....	45
4.2.2	Balizas con ángulo de llegada.....	46
4.3	Resumen funciones de rutinas de precisión .....	47
5	ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE VALORES DE DOP EN UN RECEPTOR BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN GNSS .....	49
5.1	Análisis estático.....	50
5.2	Análisis en movimiento .....	55
5.3	Análisis con varios sistemas en estático.....	60
5.4	Análisis con varios sistemas en movimiento.....	62
6	CONCLUSIONES .....	67
6.1	Alcance de los objetivos del proyecto.....	67
6.2	Cumplimiento real y trabajos futuros .....	67
6.3	Lecciones aprendidas .....	68
7	GLOSARIO .....	69
8	BIBLIOGRAFÍA.....	72
	Referencias.....	72
	Otra bibliografía .....	73
9	ANEXOS .....	75
9.1	Anexo 1: Guía de uso de la aplicación final.....	75
	Pasos.....	76

## Índice de tablas y figuras

### Tablas

<i>Tabla 1 Fechas clave del proyecto</i>	15
<i>Tabla 2 Tabla de hitos</i>	18
<i>Tabla 3 Horas estimadas vs reales</i>	19
<i>Tabla 4 Costes del proyecto</i>	19
<i>Tabla 5 Comparativa sistemas GNSS</i>	27
<i>Tabla 6 Diferencias temporales GNSS</i>	31
<i>Tabla 7 Valores de DOP</i>	33
<i>Tabla 8 Resumen de fuentes de error</i>	34
<i>Tabla 9 Cálculo de W</i>	45
<i>Tabla 10 Funciones de cálculo</i>	48
<i>Tabla 11 Funciones de interfaz</i>	48
<i>Tabla 12 Otras funciones</i>	48
<i>Tabla 13 Movimiento - Constelaciones</i>	57
<i>Tabla 14 Movimiento - Nuevas radio-balizas</i>	58

### Figuras

<i>Figura 1 Planificación inicial</i>	16
<i>Figura 2 Satélites artificiales a 2-ene-2018 a las 14:00h.</i>	23
<i>Figura 3 Formato y contenido del mensaje de navegación GPS [9]</i>	28
<i>Figura 4 Satélites visibles sobre Toledo el 2-ene-2018 a las 13:50h.</i>	30
<i>Figura 5 DOP Geométrica (GDOP)</i>	32
<i>Figura 6 Localización por AOA [13].</i>	36
<i>Figura 7 TDOA</i>	37
<i>Figura 8 Escenario AOA – 3D. Obtenido de [16]</i>	46
<i>Figura 9 Coordenadas transmisores y puntos de referencia</i>	49
<i>Figura 10 Pantalla de inicio</i>	49
<i>Figura 11 Estático – Un sistema con 4 emisores.</i>	51
<i>Figura 12 Estático - Un sistema con 5 emisores</i>	51
<i>Figura 13 Estático - Un sistema</i>	52
<i>Figura 14 Comparación DOP balizas</i>	52
<i>Figura 15 Estático – Dos sistemas</i>	53
<i>Figura 16 Estático - Satélite + terrestre</i>	54
<i>Figura 17 Estático - 3 satélite + 3 terrestre.</i>	54
<i>Figura 18 Estático - Simulación de GBAS</i>	55
<i>Figura 19 Ruta para simulación en movimiento.</i>	56
<i>Figura 20 Transmisores y coordenadas</i>	56
<i>Figura 21 Movimiento – DOP constelación 1.</i>	57
<i>Figura 22 Movimiento – DOP constelación 2.</i>	58
<i>Figura 23 Movimiento - Mapa nuevas radio-balizas</i>	59
<i>Figura 24 Movimiento - DOP Constelación 1 nuevas balizas.</i>	59
<i>Figura 25 Movimiento - DOP Constelación 1 con nuevas balizas y 4 transmisores</i>	60
<i>Figura 26 DOPs según combinación en un sistema</i>	61
<i>Figura 27 Diferencia de DOP entre constelaciones.</i>	61
<i>Figura 28 Impacto de radio-balizas de distancia absoluta</i>	62
<i>Figura 29 Varios sistemas – DOP.</i>	63
<i>Figura 30 En movimiento - varios sistemas - ruta 1</i>	64
<i>Ilustración 31 En movimiento - varios sistemas - ruta 2.</i>	65
<i>Figura 32 Matlab - librerías y versión</i>	75

<i>Figura 33 Directorio ficheros aplicación .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 34 Lanzar Script .....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 35 Ventana inicial de la aplicación .....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 36 DOP static: configuración .....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 37 DOP static: visualización.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 38 DOP route .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 39 System static: configuración.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 40 System static: representación.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 41 Systems movement: configuración.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 42 Systems movement - representación.....</i>	<i>83</i>



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto y justificación del trabajo

Los receptores de posicionamiento hoy en día son capaces de recibir información de distintos sistemas de geolocalización (satélites, radiobalizas, red de telefonía, etc.) pero estos sistemas pueden no compartir su escala temporal o incluso pueden no proporcionar información de cuándo se emitieron las señales, lo cual produce un impacto en un receptor, tanto estacionario como en desplazamiento.

Se pretende analizar el impacto que supone en un receptor el tratar con varios sistemas de geolocalización que puedan estar en distinta base de tiempos.

## 1.2 Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es realizar un análisis teórico comparativo de los parámetros de calidad de la precisión con la que se puede posicionar un receptor en base a la distribución de unos transmisores que puedan estar o no sincronizados. Esto se consigue simulando distintos sistemas de radionavegación satélite (GNSS) y otros transmisores previamente conocidos (radio-balizas).

De una manera más detallada, los objetivos del proyecto son:

1. Conocer los métodos en los que se basa la geolocalización con o sin servicios de aumentación.
2. Analizar distintos métodos de medida de precisión según los sistemas emisores disponibles.
3. Ampliar el cálculo de la posición mediante linealización y de los factores DOP (*Dilution of Precision*) cuando se utilizan sistemas con diferentes bases de tiempos.
4. Formular un desarrollo matemático para el caso de radiobalizas que emitan información de distancia, pseudodistancia o si realizan medidas de ángulo de llegada.
5. Desarrollar un método en Matlab para medir la calidad de los valores DOP en distintos sistemas de tiempos según los puntos anteriores.

6. Conocer las librerías de Matlab GUI.
7. Mostrar de una manera sencilla a un usuario el impacto de la convivencia de los distintos sistemas en un receptor estático o en movimiento permitiendo al usuario mediante una interfaz que cubra los puntos 3 y 4.

### 1.3 Enfoque y método seguido

El proyecto ha de incluir una serie de rutinas MATLAB que se basen en el análisis de la calidad de la precisión de la posición estimada para un vehículo receptor según distintos sistemas transmisores de información de geoposicionamiento. Según el alcance final, se tiene que poder comparar con uno, dos o tres sistemas transmisores (emulando la convivencia de GPS, Glonass y GPS). Además, se tendrá en cuenta su posición relativa con respecto a ciertos puntos conocidos (balizas o estaciones de referencia).

La consulta de los valores finales será accesible mediante una interfaz sencilla desarrollada en el entorno de cálculo y programación Matlab.

La estrategia se ha basado en desarrollar un producto nuevo que busque mostrar la diferencia en los parámetros de precisión según los sistemas escogidos.

El proyecto se ha dividido principalmente en dos partes: la primera consistente en una traslación de los cálculos matemáticos obtenidos a partir de las ecuaciones de posición a unas rutinas programáticas que, según la información recogida, calculan la incertidumbre en la precisión de las medidas. La segunda fase se ha centrado en crear una interfaz para una mayor comprensión del problema planteado y en integrar el trabajo de la primera fase con la segunda.

Se ha querido hacer un producto incremental en el que pudiese recortarse o añadir funcionalidad en base a la disponibilidad temporal. Ha sido la inclusión del cálculo de la posición por ángulo de llegada (AOA) el área propuesta como parte ampliada final, con el objetivo de primer el entregar un producto terminado frente a dejar un producto inacabado. Por problemas en la comprensión del enunciado este punto ha quedado fuera del alcance y se propondrá en la sección de trabajos futuros.

## 1.4 Planificación del Trabajo

Los hitos principales del proyecto son:

PEC 1 – Entrega de planificación e inicio del proyecto	9 de octubre de 2017
PEC 2 – Entrega de rutinas de análisis (fase 1)	9 de noviembre de 2017
PEC 3 – Entrega de Interfaz (fase 2)	13 de diciembre de 2017
PEC 4 – Entrega de memoria y presentación y documentación de cierre	15 de enero de 2018
Período de aceptación	24-26 de enero de 2018

*Tabla 1 Fechas clave del proyecto*

Siguiendo la teoría de PMBOK [1], se ha dividido el proyecto en las fases de Elección del proyecto, Planificación, Ejecución, Seguimiento y Control y Cierre.

La elección del tema del proyecto marcó el inicio de planificación aunque la temática se había discutido meses antes del inicio de proyecto.

La fase de Planificación concluyó con el Hito PEC 1 – Entrega de planificación e inicio del proyecto e incluyó la puesta en común del contenido del proyecto y los requisitos de entrega finales además de ser una primera toma de contacto.

La fase de ejecución ha supuesto el grueso del desarrollo del proyecto y ha estado marcada por los hitos PEC 2 – Entrega de rutinas de análisis (fase 1) y PEC 3 – Entrega de Interfaz (fase 2). Con cada entrega, la fase de seguimiento y control se ha ido realizando mediante la construcción de documentación relativa al estado del proyecto en cada momento, de los pasos a seguir y de las actualizaciones de la planificación en cada instante.

Finalmente, la fase de cierre es la de entrega y aceptación. La fase de entrega está completada, mientras que la de aceptación depende de agentes externos y se añade como hito y no como tarea.

Además de utilizar las bases de PMBOK para la gestión del proyecto, se ha el concepto de la metodología *Agile* [2] utilizada en proyectos de software. Se ha pretendido tener un producto mínimo (MVP- Producto viable mínimo) que permitiese entregar funcionalidades básicas pero completas en vez de un proyecto demasiado amplio pero incompleto.

Esto se puede observar en tareas de la fase de Ejecución-1 como:

- Desarrollo básico
- Desarrollo Balizas
- Desarrollo posicionamiento ampliado

Se muestra el diagrama de Gantt inicial del proyecto:

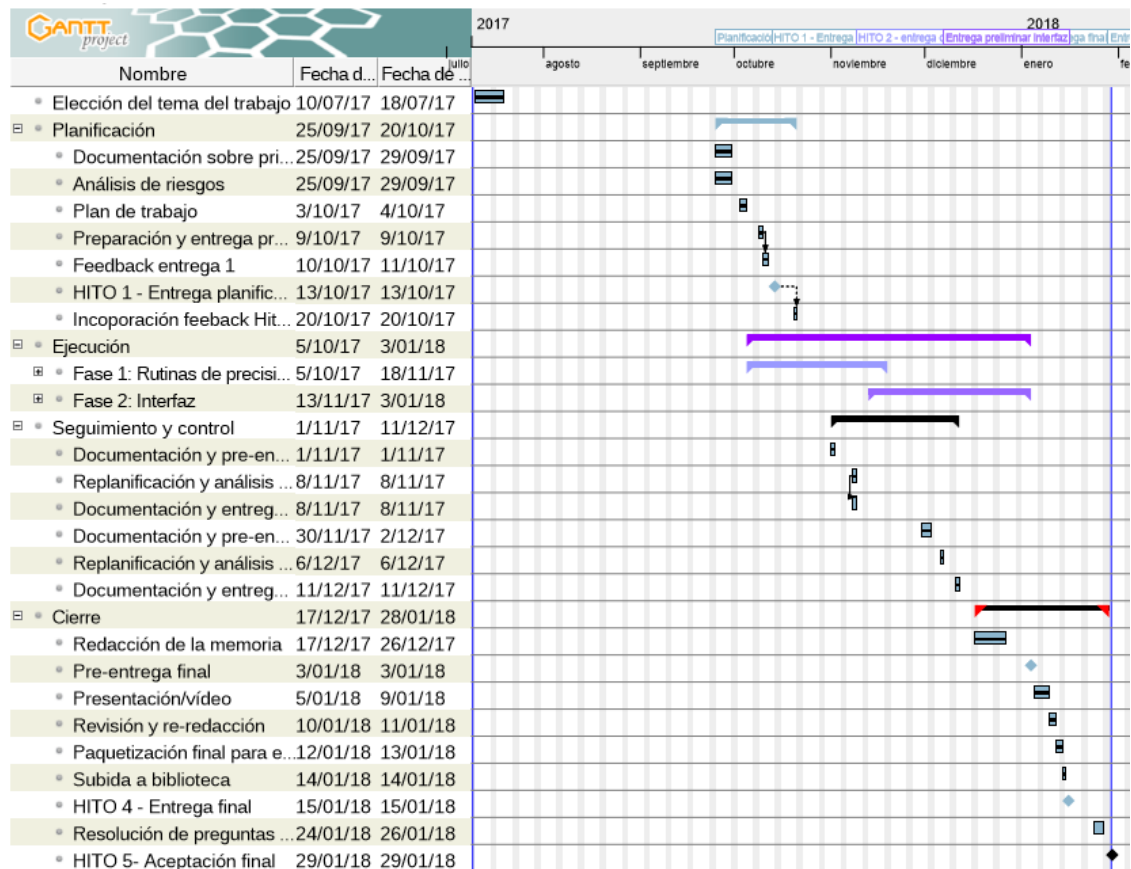


Figura 1 Planificación inicial

El cálculo inicial de horas aportado en la documentación preliminar era de 292 horas para el proyectando, con la intención de dejar un gran margen de tiempo para imprevistos por ser el alcance del proyecto muy amplio. El cálculo final ha resultado en unas 301 horas. La desviación no parece muy amplia, pero ha de tenerse en cuenta que se ha reducido el alcance del proyecto por no poder concretarse una última área de desarrollo.

También se incluye una tabla de hitos con una descripción de tareas, estimación inicial y desviación sobre la planificación inicial.



Etapa	Nombre	Fecha de inicio		Fecha de fin		Duración (días)	Esfuerzo estimado (horas)	Horas reales
		estimada	real	estimada	real			
<b>INICIO</b>	Elección del tema del trabajo	10/07/2017		18/07/2017		9	4	4
<b>PLANIFICACIÓN</b>	<b>Planificación</b>	<b>25/09/2017</b>		<b>20/10/2017</b>		<b>26</b>	<b>25</b>	<b>26</b>
	Documentación sobre primeros pasos	25/09/2017		29/09/2017		5	8	8
	Análisis de riesgos	25/09/2017		29/09/2017		5	3	3
	Plan de trabajo	03/10/2017		04/10/2017		2	5	5
	Preparación y entrega preliminar de planificación	09/10/2017		09/10/2017		1	3	3
	Feedback entrega 1	09/10/2017	10/10/2017	10/10/2017	10/10/2017	2	3	4
	<b>HITO 1 - Entrega planificación</b>	<b>13/10/2017</b>		<b>13/10/2017</b>		-	-	-
	Incorporación feedback Hito 1	20/10/2017		20/10/2017		1	3	3
<b>SEGUIMIENTO Y CONTROL</b>	<b>Seguimiento y control</b>	<b>01/11/2017</b>		<b>11/12/2017</b>		<b>41</b>	<b>34</b>	<b>26</b>
	Documentación y pre-entrega hito 2	01/11/2017	02/11/2017	01/11/2017	02/11/2017	1	6	2
	Replanificación y análisis del estado del proyecto	08/11/2017		08/11/2017		1	3	4
	Documentación y entrega hito 2	08/11/2017		08/11/2017		1	3	5
	Documentación y pre-entrega hito 3	30/11/2017		02/12/2017		1	6	4
	Replanificación y análisis del estado del proyecto	06/12/2017		06/12/2017		1	4	3
	Documentación y entrega hito 3	11/12/2017		11/12/2017		1	12	8
<b>EJECUCIÓN</b>	<b>Ejecución</b>	<b>25/09/2017</b>		<b>03/01/2018</b>		<b>101</b>	<b>168</b>	<b>163</b>
	<b>Fase 1: Rutinas de precisión</b>	<b>05/10/2017</b>		<b>18/11/2017</b>		<b>45</b>	<b>73</b>	<b>77</b>
	Documentación previa y repaso de contenidos	05/10/2017		10/10/2017		6	12	15
	Análisis y elección sistemas GNSS	16/10/2017		16/10/2017		1	6	3
	Desarrollo básico	18/10/2017	19/10/2017	27/10/2017	06/11/2017	10	20	20
	Desarrollo Balizas	30/10/2017	05/11/2017	01/11/2017	09/11/2017	3	8	13
	Desarrollo posicionamiento ampliado	01/11/2017	08/11/2017	02/11/2017	09/11/2017	2	4	8
	Ampliación alcance + feedback	03/11/2017	04/11/2017	07/11/2017	07/11/2017	5	12	4
	<b>HITO 2 - Entrega de rutinas</b>	09/11/2017		09/11/2017		0	4	4
	Incorporación feedback hito 2	18/11/2017		18/11/2017		1	7	10
<b>Fase 2: Interfaz</b>	<b>28/10/2017</b>		<b>03/01/2017</b>		<b>68</b>	<b>95</b>	<b>86</b>	

	Estudio de uso de Matlab GUI	13/11/2017	18/11/2017	6	12	11
	Diseño de pantallas	13/11/2017 05/11/2017	13/11/2017	1	4	3
	Modelo básico + pruebas incrementales	19/11/2017	29/11/2017	11	18	22
	Consulta sobre usabilidad	30/11/2017	30/11/2017	1	6	2
	Ampliación según alcance fase 1	01/12/2017	06/12/2017	6	12	20
	Preparación y entrega preliminar de interfaz	06/12/2017	07/12/2017	2	4	2
	Introducción mejoras y ampliación alcance	07/12/2017	13/12/2017 23/12/2017	6	12	8
	Entrega preliminar interfaz	07/12/2017	07/12/2017	0		
	Incorporación feedback preliminar hito 3	10/12/2017	10/12/2017	1	7	0
	<b>HITO 3 - Entrega interfaz</b>	<b>13/12/2017</b>	<b>13/12/2017</b>	<b>0</b>		
	Incorporación feedback hito 3 y fin del desarrollo	27/12/2017 2/01/2018	03/01/2018 7/01/2018	8	20	18
<b>CIERRE</b>	<b>Cierre</b>	<b>17/12/2017</b>	<b>28/01/2018</b>	<b>43</b>	<b>65</b>	<b>82</b>
	Redacción de la memoria	17/12/2017	26/12/2017 6/1/2018	10	25	38
	Pre-entrega final	03/01/2018	03/01/2018	0	4	4
	Presentación/vídeo	05/01/2018	09/01/2018	5	15	15
	Revisión y re-redacción	10/01/2018	11/01/2018	2	8	12
	Paquetización final para entregables	12/01/2018	13/01/2018	2	4	4
	Subida a biblioteca	14/01/2018	14/01/2018	1	3	3
	<b>HITO 4 - Entrega final</b>	<b>15/01/2018</b>	<b>15/01/2018</b>	<b>0</b>		
	Resolución de preguntas del Tribunal	24/01/2018	26/01/2018	3	6	6
	<b>HITO 5 - Aceptación final</b>	<b>29/01/2018</b>	<b>29/01/2018</b>	<b>0</b>		

Tabla 2 Tabla de hitos

Si se compara la planificación inicial con el cálculo final, se obtiene la siguiente tabla:

Fase	Horas estimadas	Horas reales	Variación (en horas)
Inicio	4	4	0
Planificación	25	26	+1
Ejecución	168	163	-5
<i>Fase 1</i>	<i>73</i>	<i>77</i>	<i>+4</i>
<i>Fase 2</i>	<i>95</i>	<i>86</i>	<i>-9</i>
Seguimiento y Control	34	26	-8
Cierre	65	82	+17
<b>Total</b>	<b>296</b>	<b>301</b>	<b>+5</b>

Tabla 3 Horas estimadas vs reales

En cuanto al cálculo de recursos, se dividen en personal y materiales de la siguiente manera:

Personal	Coste/hora <sup>1</sup>	Horas	Total (€)
Consultor Senior	54,44 €	25	1363.75
Consultor Junior	45,21 €	301	13608.21
Material	Coste	Tasa amortización	Total
Equipo de trabajo	1100 €	4 meses de proyecto Uso al 75% = $1100 \cdot (4/48) \cdot 0.75$	68.75
Espacio de trabajo (co-working) <sup>2</sup>	200 €/mes	4 meses	800.00
Office 365 personal	69 €/año	5 meses de proyecto Uso al 100% = $69 \cdot (4/12)$	23.00
Matlab Student <sup>3</sup>	35€	Uso específico para el proyecto	35.00
GanttProject	0€		0.00
<b>Total proyecto (€)</b>			<b>15898.71</b>

Tabla 4 Costes del proyecto

Las siguientes consideraciones se han tenido en cuenta:

- Se hace una aproximación basada en un entorno profesional real.
- Para el caso de personal se considera al Director del Proyecto personal colaborador en el rol de Consultor Senior. A pesar de su doble papel de colaborador y parte aceptante,

<sup>1</sup> Tarifas ejemplo obtenidas de Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España (ISDEFE) [consultado el 3-1-2018]: <https://www.isdefe.es/ckfinder/userfiles/files/Tarifas%20ISDEFE%202016.pdf>

<sup>2</sup> Aproximación de tarifa fruto de la lectura del artículo **Somos Malasaña: Todos los coworking de Malasaña: lista y precios** (enero,2016) [consultado el 3-1-2018]: <https://www.somosmalasana.com/todos-los-coworking-de-malasana-lista-y-precios/>

<sup>3</sup> Tarifa para licencia Matlab Student R2017b [consultado el 3-1-2018]: <https://es.mathworks.com/store/link/products/student/ML>

se le asigna una estimación temporal en base a la etapa de inicio y cada tarea de feedback.

- No se calculan sobrecostes por horas extraordinarias.
- Para los recursos ofimáticos, se toman 4 años (48 meses) de periodo de amortización [3].

#### 1.4.1 Riesgos del proyecto

A continuación, se detallan los riesgos inicialmente previstos para este proyecto.

PRO1 - Falta de delimitación del alcance	Riesgo: Bajo	Impacto: Medio
Contingencia: realizar el proyecto de forma incremental y reajustar los tiempos		

PERS1 - Enfermedad del proyectando	Media	Muy alto
Contingencia: Ampliar el tiempo (esfuerzo) de dedicación en días posteriores Tener reservados días de vacaciones Dejar días buffer de margen Según la seriedad de la enfermedad, justificar aplazamiento		

TEMP1 - Planificación optimista	Baja	Media
Contingencia: Ser consciente de la planificación Dimensionar un proyecto con un producto final de distintos alcances, según una planificación optimista u otra más realista		

PRO2 - Fallo del equipo informático	Bajo	Muy alto
Contingencia: Almacenar resultados en la nube Contratar un seguro Disponer de un segundo entorno con Matlab instalado y acceso a la documentación		

PERS2 - No disponibilidad del centro de estudios o del tutor por cambios en el régimen jurídico del Centro	Desconocida	Muy alto
Contingencia: No existe. Por interés del proyectando no interesa la paralización del mismo. Se propone como contingencia dejar delimitado el ámbito del proyecto lo máximo posible y continuar hasta que haya más información disminuyendo la dependencia con el tutor/parte aceptante.		

Durante la fase de desarrollo inicial y antes de la entrega del hito 2: PEC2 - Entrega de rutinas, se detectó un riesgo adicional. Su impacto se considera similar a otro ya detectado (PRO1) siendo la solución la misma: tiempo y comunicación.

PRO3 - Fallo en la toma de requisitos	Riesgo: Bajo	Impacto: Medio
Contingencia: Aumentar la comunicación con el cliente/tutor.		

### 1.5 Breve índice de los productos obtenidos

- Memoria: En este documento se detalla la organización del proyecto, la información teórica necesaria y un breve análisis basado en las observaciones realizadas con el uso de la aplicación resultante. Incluye la guía de uso de la aplicación.
- Una aplicación final formada por:
  - o Librerías: es el código Matlab resultante del análisis realizado y que ejerce como base para la representación gráfica final.
  - o Interfaz: en código Matlab, las clases que con ayuda de las librerías se puede interactuar y realizar los análisis deseados.

### 1.6 Breve descripción de los capítulos de la memoria

Este primer capítulo cubre la introducción a la temática del proyecto, cómo se ha abordado y la planificación empleado, tanto en recursos como en riesgos previstos.

En el segundo capítulo se realiza una aproximación teórica a lo que posteriormente se quiere analizar: se enumeran los sistemas de geoposicionamiento actuales, tanto por satélite como con

apoyo terrestre, y se explican los fundamentos de su funcionamiento y del cálculo del posicionamiento por diferencias en tiempo y distancia. También se realiza una introducción a los parámetros DOP y a los otros errores presentes en el cálculo de la posición final de un receptor.

El tercer capítulo explica qué es Matlab, el entorno de desarrollo que se ha utilizado para las rutinas y la interfaz gráfica de este proyecto.

El capítulo 4 se adentra en las formulaciones matemáticas que se han realizado para ser trasladadas a rutinas programáticas.

El capítulo 5 se adentra en utilizar el programa final que utiliza las rutinas del capítulo anterior y analizar los valores DOP según la selección de algunos parámetros por el usuario en la interfaz disponible.

El capítulo 6 analiza el Trabajo de Fin de Máster como un proyecto y aborda posibles trabajos futuros.

Los capítulos 7 y 8 son el glosario y la bibliografía, respectivamente.

Y finalmente, como anexo, se muestra una breve guía de uso de la aplicación.

## 2 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE GEOPOSICIONAMIENTO

El planeta Tierra está rodeado de satélites artificiales con múltiples aplicaciones: meteorología (EumetSat), localización (sistema GPS), telecomunicaciones (EutelSat, HispaSat), usos privados (Deimos, PlanetLabs), usos científicos, etc. Todos estos satélites conviven en órbitas reguladas [4] desde el área de radiofrecuencia de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU-R) y proporcionan información que el receptor adecuado sabrá procesar y podrá explotar.

En un día cualquiera, podemos encontrar la siguiente distribución de satélites:



Figura 2 Satélites artificiales a 2-ene-2018 a las 14:00h.  
Obtenido de <https://in-the-sky.org/>

### 2.1 Los sistemas de geoposicionamiento global

Los sistemas de geoposicionamiento global son sistemas que permiten la localización de un elemento en el espacio. Están formados por constelaciones de satélites que transmiten su posición en un instante dado junto con otra información adicional.

El sistema más popular es GPS (*Global Positioning System*), pero existen otros sistemas como Glonass, Galileo o BeiDou. De manera genérica nos referiremos a ellos como sistemas globales de satélites (GNSS).

Todos los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) están formados por tres segmentos: el espacial, el de control y el de usuario:

- El segmento espacial está compuesto por el grupo de satélites en órbita, conocido como constelación. Estos se identifican mediante la transmisión de su señal de radionavegación, que para el caso de GPS puede ser mediante:
  - I. Posición en el plano orbital
  - II. Código SVN proporcionado por el gobierno de los Estados Unidos
  - III. Código PRN (*pseudorandom noise*), qué es un código aleatorio e identificador único.
- El segmento de control está formado por los elementos del sistema encargados de monitorizar y controlar el funcionamiento correcto de la constelación de satélites. Está compuesto por estaciones que monitorizan las órbitas de los satélites, mantienen la sincronización del sistema y reposicionan los satélites en caso de ser necesario. También recogen información del estado de la señal y la distribuyen.
- El segmento de usuario es el receptor final, que puede ser civil, comercial o militar. Ejemplos de esto es el navegador de un coche o un misil balístico.

La pertenencia de cada sistema a distintos gobiernos y las limitaciones derivadas de esto, se ha diluido a día de hoy y la colaboración entre organismos ha aumentado con la intención de poder beneficiarse a nivel global de la cobertura de la combinación de todos los sistemas.

A continuación, se realiza una pequeña descripción de los principales sistemas de navegación por satélite y también se incluye una tabla donde se detalla información de los más importantes.

### *GPS*

GPS (*Global Positioning System*), anteriormente conocido como NAVSTAR (*NAVigation Satellite Time and Ranging*) GPS pertenece al Departamento de Defensa de los Estados Unidos (DOD). El proyecto es heredero de otro anterior, TRANSIT. Fue concebido en 1963 en plena Guerra Fría durante la escalada atómica con la idea de ganar precisión a la hora de dirigir misiles. Está completamente operativo desde 1995 y fue en 1983 cuando pasó a permitirse su uso civil. Se ha seguido manteniendo desde entonces y su uso público es ampliamente conocido. Todos los receptores GNSS del uso comercial soportan GPS.



### GLONASS

Como respuesta soviética al GPS, está Glonass (*Global Navigation Satellite System*), el sistema de radionavegación del gobierno ruso. Su desarrollo comenzó en la URSS en 1976 y fue sucesivamente completando la constelación hasta 1995. Sin embargo, con la crisis posterior a la caída de la URSS, fue perdiendo capacidades por falta de satélites de reemplazo. En 2001 el programa retomó prioridad gubernamental y en 2010 logró recuperar la cobertura en todo el territorio ruso. En 2011 consiguió la cobertura global al tener 24 satélites en órbita. La descripción de sus órbitas proporciona una mejor precisión en latitudes nortes que GPS.

En cuanto al segmento de usuario, la existencia de receptores Glonass está menos extendido, pero desde 2011 fabricantes de chips como Qualcomm en su gama Snapdragon han sacado al mercado receptores conjuntos de GPS y Glonass [5].

### GALILEO

Galileo es una iniciativa europea para la cobertura mundial de navegación por satélite. Concebido por la desconfianza a la dependencia de los sistemas rusos y americano en una posible escalada de tensión, se anunció en 2003 la creación de Galileo. Está contemplado para que emita en dos frecuencias y permita una mayor precisión que GPS y Glonass.

Es el único de los nombrados anteriormente que está bajo control civil, puesto que pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA). Afectado por problemas de financiación, ha sufrido retrasos, pero a finales de 2016 lanzó su último satélite y se estableció como operativo.

En el segmento de usuario, compañías clave como Intel, Qualcomm y U-blox ya tienen en el mercado equipamiento compatible con Galileo [6].

### BeiDou

BeiDou (*BeiDou Navigation Satellite System*) es un sistema de posicionamiento orientado para China y alrededores. La segunda generación es conocida como COMPASS o Beidou-2, consta de una combinación de satélites en órbitas medias (MEOs) y otros en órbitas bajas (GEOs) con la intención de proporcionar precisión aumentada en el área de observación de los mismos. Inicialmente de cobertura regional, tiene previsto expandirse hasta cobertura global con su tercera generación BDS-3.

### Otros sistemas

Además de los ya nombrados, existen otros sistemas más locales o menos maduros. Algunos se listan a continuación:

- IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*), nombrado NAVIC (*Navigation Indian Constellation*) desde 2016, es el sistema de satélites de cobertura regional sobre la India y sus alrededores. Está formado por un mínimo de 7 satélites, siendo 3 geoestacionarios. Se espera que sea operacional para 2018 y proporcionará dos niveles de servicio: estándar y de mayor precisión.
- *Quasi-Zenith Satellite System (QZSS)* es el sistema de geolocalización de cobertura regional encargado por el gobierno de Japón en 2002. Está previsto que cubra Asia oriental y Oceanía y que se apoye en otros sistemas GNSS. La intención es crear una constelación combinada de satélites en altas órbitas (HEO) y satélites geoestacionarios. Actualmente está fase de despliegue y se pretende que esté disponible en su fase inicial en 2018 [7].

Se realiza una tabla resumen de los sistemas más populares:

	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>GALILEO</b>	<b>BeiDou / COMPASS</b>
<b>Constelación</b>	24 satélites	24 satélites	30 satélites	30 satélites + 5 GEO
<b>Fechas funcionamiento</b>	Parcial en 1993, total en 1995	1995-2002 2010-hoy	Parcial desde 2016, total previsto para 2019	Parcial desde 2011, total previsto para 2020
<b>Precisión</b>	7.8 m público (SPS) 5.9 m militar (PPS)	7.4 m público (SP) 4.5 m militar (HP)	1 m público 0.01 m avanzado	10 m público 0.1 m militar
<b>Cobertura</b>	Global	Global	Global	China para Beidou-1 Global para Beidou-2/Compass
<b>Planos orbitales</b>	6 planos	3 planos	3 planos	3 planos MEO
<b>Satélites por plano</b>	4 satélites	8 satélites	10 satélites	9 satélites
<b>Inclinación</b>	55º	68.4º	56º	55.5º
<b>Período</b>	12h	11h 15m	14h	12h 53m
<b>Altura órbita</b>	26650 km	19100 km	23222 km	21150 km

<b>Reloj</b>	Cesio y rubidio	Cesio	Hidrógeno y rubidio [8]	Hidrógeno
<b>Propietarios</b>	Estados Unidos	Rusia	Unión Europea	China

*Tabla 5 Comparativa sistemas GNSS*

## 2.2 Cálculo de la posición en el receptor GNSS

El receptor GNSS, en una etapa conocida como adquisición de código, busca los satélites que tiene visibles y en relación a la información recibida de cada satélite, realiza una primera estimación de la posición de usuario. Lo hace comparando el tiempo de retardo que tarda la señal transmitida por los satélites en llegar al receptor con valores incluidos dentro del mensaje de navegación. Con estos datos, y mediante un ejercicio de triangulación, se obtienen las coordenadas finales.

### 2.2.1 El mensaje de navegación

Se muestra la estructura del mensaje de navegación GPS como ejemplo de los contenidos que incluyen los mensajes de navegación de cualquier sistema GNSS:

- Tiempo de transmisión del satélite y posición del satélite.
- Efemérides.
- Salud del satélite y corrección del reloj embebido.
- Efectos de retardo de propagación.
- Relación temporal con UTC.
- Estado de la constelación.

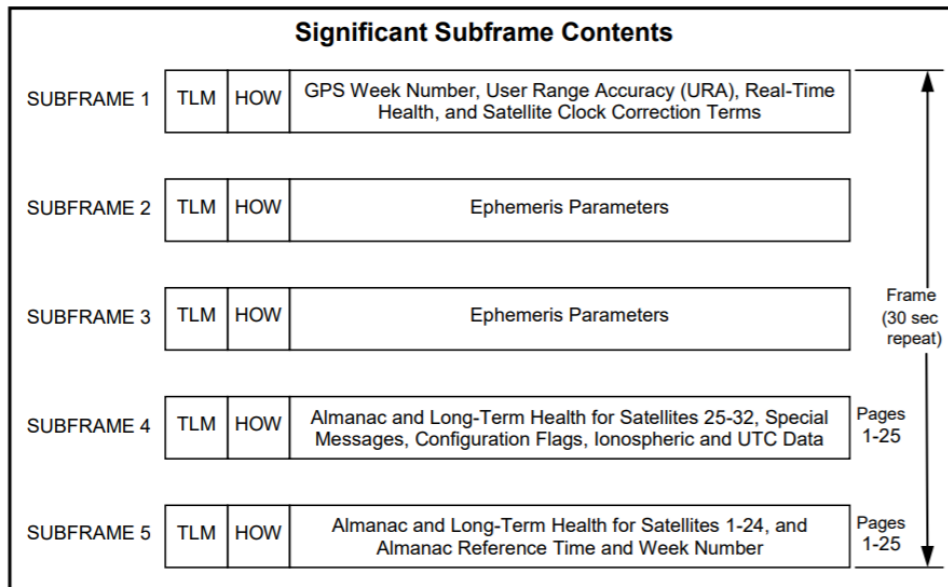


Figura 3 Formato y contenido del mensaje de navegación GPS [9]

### 2.2.2 Cálculo de la posición

El cálculo de la posición parte de un parámetro conocido como pseudodistancia o pseudorange, que es el valor bruto de distancia obtenido en una primera aproximación de la distancia entre el satélite y el receptor. Este no tiene en cuenta la posible diferencia de tiempos entre los sistemas o u otros errores introducidos principalmente por la propagación de la señal.

Para obtener este valor se siguen los siguientes pasos:

1. Se obtiene la posición de cada satélite a raíz de la información recibida en las efemérides del mensaje de navegación.
2. Se estima el valor del pseudorange  $P(t)$  partiendo de la expresión

$$P(t) = c(t_r(t) - t_s(t - \tau)) \quad (1)$$

dónde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío,  $t_r(t)$  el instante de recepción de la señal en el receptor y  $t_s(t)$  el instante de emisión de la señal en el satélite.  $t$  y  $\tau$  son valores desconocidos.

Recaltar que  $t_r$  y  $t_s$ , además de depender de relojes distintos, no están observados en el mismo instante.

La diferencia entre estos dos valores se relaciona de la siguiente manera:

$$t_{r(t)} = t + \delta t_r(t) \text{ y } t_s(t - \tau) = (t - \tau) + \delta t_s(t - \tau), \quad (2)$$

con  $\delta t_r$  y  $\delta t_s$  los sesgos (*offsets*) de los relojes en el satélite y en el receptor respecto a la escala GPST, que se explica más adelante.

Si en  $P(t)$  se incluyen los factores de *offset* más el término de error  $\varepsilon_p(t)$ , se llega a la expresión

$$\begin{aligned} P(t) &= c(t + \delta t_r(t) - (t - \tau) + \delta t_s(t - \tau)) + \varepsilon_p(t) \\ &= c\tau + c(\delta t_r(t) - \delta t_s(t - \tau)) + \varepsilon_p(t), \end{aligned} \quad (3)$$

El término  $c\tau$  es el que considera el tiempo de propagación de la señal entre el satélite y el receptor y se puede expresar también como  $c\tau = r(t, t - \tau) + I\rho(t) + T\rho(t)$ , donde  $r(t, t - \tau)$  es la distancia geométrica entre el usuario en  $t$  y el satélite en  $t - \tau$  e  $I\rho$  y  $T\rho$  son los retardos positivos por efectos Ionosféricos y Troposféricos.

Tras estas consideraciones, se llega a la expresión fundamental de la Pseudodistancia:

$$P = r + c(\delta t_r - \delta t_s) + I\rho + T\rho + \varepsilon_p \quad (4)$$

3. Por último, se calcula la posición del receptor con la expresión conocida como solución de navegación a través de las ecuaciones de posición. Si hay disponibles más de 4 satélites, que es el caso que contemplamos para poder manejar los errores de *offset*, se realiza ajuste por mínimos cuadrados.

Se parte de una expresión de  $P$  corregida,  $P_c$ , que contempla los efectos de  $I\rho + T\rho + \varepsilon_p$ . Con la información disponible en el mensaje de navegación se tienen los valores de retardo de la ionosfera además de aproximaciones del *offset* del reloj del satélite  $\delta t_{si}$ . Es decir, tenemos esta expresión de los Pseudorrangos corregidos,  $P_c$ :

$$P_c(k) = r(k) + c\delta t_r + \varepsilon_{p,c} \quad (5)$$

Con el vector  $\mathbf{x}(k) = [x(k), y(k), z(k)]^T$  como la posición del satélite  $k$ -ésimo en el instante de transmisión y  $\mathbf{x}_r = [x_r, y_r, z_r]^T$  la posición del receptor en el instante de medida, se calcula el vector de posición  $r(k)$

$$r(k) = \|\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_r\| = \sqrt{(x(k) - x_s)^2 - (y(k) - y_s)^2 - (z(k) - z_s)^2}, \quad (6)$$

y, por tanto

$$P_c(k) = \sqrt{(x(k) - x_s)^2 - (y(k) - y_s)^2 - (z(k) - z_s)^2} + c\delta t_r + \varepsilon_{p,c} \quad (7)$$

Donde se presenta con una expresión con cuatro incógnitas: el *offset* del reloj  $c\delta t_r$  y las tres coordenadas de la posición. Por lo que es necesario un sistema de al menos cuatro satélites para resolver la ecuación de posición en tres dimensiones.

La expresión para la resolución de la posición final es por tanto:

$$\begin{bmatrix} P_c(1) \\ P_c(2) \\ \dots \\ P_c(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1(x_r) \\ r_2(x_r) \\ \dots \\ r_k(x_r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} c\delta t_r \quad (8)$$

Cada pseudorange se obtiene de los distintos satélites de geoposicionamiento observables en un instante dado. En el capítulo 4. Desarrollo del proyecto se ahonda en estas expresiones.

La disponibilidad suele ser alta en entornos abiertos y los *softwares* de recepción tienen la capacidad de escoger los más adecuados.

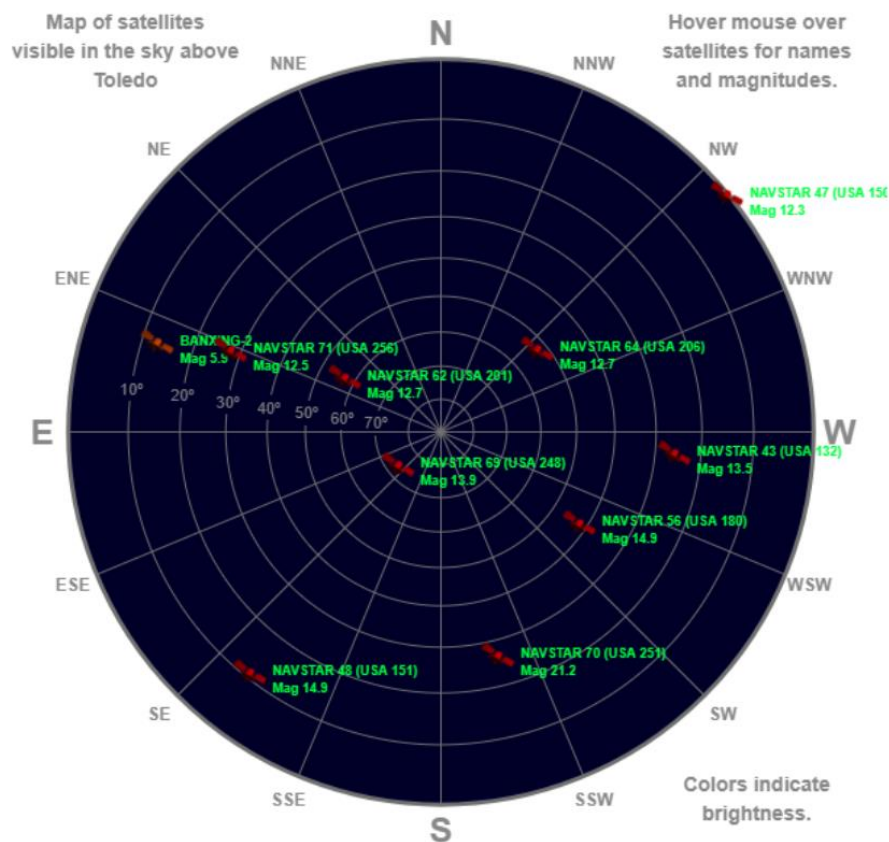


Figura 4 Satélites visibles sobre Toledo el 2-ene-2018 a las 13:50h.  
Obtenido de <https://in-the-sky.org>

### 2.2.2.1 Los sistemas de tiempos: el offset

A la hora de calcular una posición, es necesario tener en cuenta que puede haber deriva entre las distintas referencias que se hace al tiempo.

Los diferentes momentos en los que se hace referencia a un valor temporal durante el cálculo de la posición es durante la lectura del reloj en receptor, los parámetros del mensaje de navegación en base al reloj embebido en el satélite y la puesta en común de ambos con la escala Tiempo GPS (GPST), que es una media temporal de los elementos del segmento espacial y terrestre. Actualmente todos los sistemas de geolocalización por satélite transmiten su valor temporal más el valor en referencia a GPST.

Se detallan las referencias de tiempos en cada uno de los sistemas principales:

- Tiempo GPS (GPST): es una escala definida por el segmento de control GPS y en base a los relojes atómicos en el sistema. Comenzó a las 00h del 6 de enero del 1980, cuando la diferencia entre el Tiempo Atómico Universal (TAI) y UTC era de 19s, con

lo que ese es su valor de offset con UTC. GPST está sincronizado con UTC con un margen de error máximo de hasta 1 microsegundo.

- Tiempo Glonass (GLONASST): es la diferencia entre el tiempo proporcionado por el sincronizador de Glonass. La deriva con UTC está acotada en 1 milisegundo + 3horas. La escala de tiempo Glonass incluye *leap second*, como UTC y al contrario de GPS, Galileo o Beidou.

La razón del valor de 3 horas es por estar el Horario de Moscú en UTC+3.

- Tiempo del sistema Galileo (GST): está sincronizado con el Tiempo Atómico Internacional con una deriva de menos de 60 nanosegundos. A fecha diciembre de 2017, TAI está 37 segundos por delante de UTC. Además, siempre está 19 segundos por delante de GPST [10].
- Tiempo BeiDou (BDT): está sincronizado con UTC hasta en 100ns.

Sistema de tiempos	Referencia	Valor máx. de $\tau$
GPST	$UTC + 19s +  \tau $	1us
GLONASST	$UTC + 3h +  \tau $	1ms
Galileo	$TAI +  \tau $	60ns
BDT	$UTC +  \tau $	100ns

Tabla 6 Diferencias temporales GNSS

## 2.3 Errores en el cálculo de la posición

La precisión de la posición final depende de dos factores, los errores en las medidas y de un término dependiente de la geometría de la disposición de los satélites en el momento de la observación.

### 2.3.1 Errores de geometría: DOP

Los errores en el cálculo de la posición por factores geométricos se agrupan bajo el concepto *Dilution of precision* (DOP).

DOP hace referencia a la amplitud del área solución en el problema de triangulación que es el cálculo de la precisión y analizan, mediante variables estadísticas como la varianza y la desviación estándar, el efecto de las posiciones de los satélites en los resultados de la medida final. Sus valores reflejan un margen de confianza sobre la medida final.

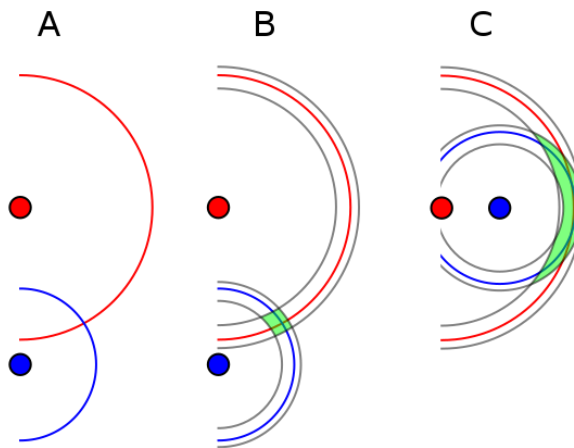


Figura 5 DOP Geométrica (GDOP)

Estos valores se estudian a partir del desarrollo y la linealización del problema de navegación planteando desde las ecuaciones de navegación y que se detalla en la sección 4.2 Cálculo de DOP.

Los parámetros DOP que se puede analizar son:

- *Position DOP* (PDOP): indica la relación en la desviación típica de los elementos de la posición  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ .
- *Geometric DOP* (GDOP): muestra la relación en la desviación típica de la posición  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  y el factor retardo.
- *Time DOP* (TDOP): analiza cómo afecta a la precisión el offset del sistema ( $\sigma_t$ ).
- HDOP (*Horizontal DOP*) y VDOP (*Vertical DOP*) analizan cómo afecta a las medidas finales la disposición de los satélites en términos de horizontalidad y verticalidad.

Los valores de DOP se minimizan conforme más satélites hay disponibles. En el caso de GDOP, este indicador es mejor cuanto más esparcidos estén los satélites y aumenta conforme más juntos estén.

La precisión horizontal suele ser mejor debido a que los satélites están todos a alturas uniformes respecto al usuario.

Los valores DOP se pueden calcular sin conocer la posición del receptor, solo partiendo de la posición de los satélites y una posición aproximada del receptor.



En la tabla a continuación se explican lo qué significan los valores DOP en términos de precisión:

<i>Valor de DOP</i>	<i>Calificación</i>	<i>Significado</i>
<1	Ideal	Usado por niveles que requieren muy alta precisión
1-2	Excelente	Valido para la mayoría de las aplicaciones
2-5	Bueno	El umbral mínimo para aplicaciones comerciales, ya se presentan errores
5-10	Moderado	Valor válido para realizar cálculos, posicionamiento aproximado
10-20	Regular	Valores válidos solo para estimaciones holgadas, deberían ser descartados
>20	Pobre	El margen de error es ya de 300m.

*Tabla 7 Valores de DOP*

### 2.3.2 Otros errores

Se indican otros errores presentes en el problema de resolución de posición.

#### Errores en los parámetros enviados en el mensaje de navegación

Estos son los contenidos en el reloj de satélite y las efemérides. Aumentan conforme los datos son más antiguos. Se palia mediante un mayor seguimiento en estaciones de control terrestres.

#### Incertidumbre respecto al medio de propagación

Estos son los efectos de la ionosfera y troposfera. Mediante modelos como Klobuchar o NeQuick, es posible estimar el efecto de la ionización en la señal.

El efecto de refracción en la troposfera es posible modelarlo según parámetros meteorológicos locales.

#### Interferencias y ruidos en el receptor.

El ruido es un problema típico de cualquier instrumento electrónico receptor, afectados principalmente el efecto del ruido térmico. No es un problema exclusivo de los receptores GNSS.

Lo que sí afecta especialmente al GPS son las interferencias, que puede ser las interferencias entre las señales recibidas de satélites o la problemática de los entornos urbanos, dónde los efectos *near-far*<sup>4</sup> y multicamino<sup>5</sup> se multiplican.

A modo resumen se incluye una tabla con el efecto de los errores en la distancia final [11]:

<i>Fuente de error</i>	<i>Error (desviación típica en metros)</i>
Reloj del satélite	1.5
Efemérides	1.5
Ionosfera (modelos para una frecuencia)	2,50-25
Troposfera	0.20.40
Ruido en pseudorrango	0.25-0.50
Ruido en la fase	0.0001-0.0002
Multicamino en el pseudorrango (entorno benigno)	0.25-0.50
Multicamino en la fase (entorno benigno)	0.005-0.001

*Tabla 8 Resumen de fuentes de error*

## 2.4 Posicionamiento diferencial y sistemas de cobertura aumentada

Existe un modo de cálculo del posicionamiento conocido como técnica diferencial, siendo una de ellas DGPS (*Differential GPS*). La idea es que todos los receptores en la misma área reciben una señal similar y pueden beneficiarse de una señal corregida.

Las técnicas diferenciales explotan el hecho de que los errores asociados al satélite y a los efectos de la atmósfera son iguales para todas las medidas realizadas en el mismo momento, se puede estimar estos efectos y aplicarlos al cálculo de la posición del receptor. Con tener una estación conocida de referencia, ni siquiera es necesario conocer la posición del receptor para calcular estos efectos. De hecho, la pieza clave de DGPS es la estación de referencia, que conoce su posición, tiene capacidad de cálculo y además dispone de un transmisor para difundir las correcciones de la señal GPS

El funcionamiento básico es que un receptor GPS calcula su posición mediante la señal recibida de los satélites GPS y la compara con su posición conocida sin errores. En la comparación es

---

4 *Near-far* hace referencia a la recepción de dos señales con distintas potencias por la problemática de las condiciones de propagación en interiores.

5 El efecto multicamino es un fenómeno de recepción de la misma señal por distintos caminos, de manera directa y reflejada con distintos retardos, algo característico de entornos urbanos.

capaz de calcular los errores y enviar los parámetros de ajuste tanto a los satélites geoestacionarios que dan soporte al sistema como a los receptores cercanos.

Este concepto es en gran parte la base de los sistemas de disponibilidad aumentada GBAS (*Ground-Based Augmentation Systems*) y SBAS (*Satellite-Based Augmentation Systems*), que, con la intención de aumentar la precisión y la disponibilidad de las señales, refuerzan de manera regional la constelación satelital mediante emisores terrestres conocidos (GBAS) o satélites adicionales (SBAS) y minimizan la dependencia con otros sistemas. Estas necesidades son fruto de la antigua existencia del parámetro GPS *Selective Availability*<sup>6</sup> y su efecto en la calidad de la señal GPS, bajo el gobierno americano [12] y de la intención de obtener una calidad más persistente en la calidad de recepción para usos comerciales que requieran mayor disponibilidad y precisión como en el caso del transporte aéreo.

Algunos sistemas SBAS son:

- **WAAS** (*Wide Augmentation Area System*) en Estados Unidos, es un sistema que complementa localmente el servicio de GPS. Empezó a dar servicio en 2003 y proporciona valor añadido a la señal SPS (*Standard Positioning Service*) en el área de Norteamérica mediante una red de estaciones terrestres y una constelación adicional de cuatro satélites geoestacionarios. Su público objetivo es la aviación civil

Las estaciones de referencia (WRS) recogen la señal de los satélites GPS y las envían a estaciones máster (WMS) que generan el mensaje de aumentación con correcciones sobre la señal GPS. Esta señal ya corregida se envía a los satélites geoestacionarios de la red WAAS para que lo utilicen los usuarios de la red aumentada.

- **EGNOS** es el servicio de cobertura aumentada de Europa. También se centra en mejorar la señal GPS en términos de corrección de errores en las medidas de señal y proporciona información sobre la integridad de las señales. Con esta información, los receptores GPS pueden calcular medidas más exactas de la señal recibidas.

Da soporte a los servicios *Open Service* (OS), *Safety of Life* (SoL) y *Commercial Data Distribution Service* (CDDS). El primero proporciona capacidades aumentadas al público

---

<sup>6</sup> *Selective Availability* (SA) era como se conocía a la capacidad intencionada de mejorar o degradar la señal GPS pública con intenciones estratégicas o de seguridad. En mayo del año 2000, el Gobierno de Estados Unidos desactivó este servicio con la intención de que el GPS pudiera ser más fiable en términos de uso comercial y civil. Los satélites lanzados a partir del 2007 ni siquiera incluyen capacidad para este servicio [20].

general, SoL permite localización precisa en casos de emergencia y CDDS es un servicio para aplicaciones comerciales que requieran mayor rendimiento.

Al igual que WAAS, EGNOS está formado por estaciones terrestres y cuatro satélites geoestacionarios, que proporcionan principalmente sobre Europa. La siguiente generación de EGNOS (EGNOS V3) ya proporcionará servicios aumentados para Galileo.

- **MSAS** (*Multi-functional Satellite Augmentation System*) es el servicio de incremento de prestaciones para Japón. En el caso de Japón la dependencia en estos sistemas es alta dadas las órbitas de sus satélites y sus eminentes entornos urbanos. También refuerza la red GPS. Disponible de 2007, está formada por estaciones terrestres y 2 satélites geoestacionarios.

## 2.5 Los sistemas de geoposicionamiento local

Para el caso de GPS diferencial y otras técnicas basadas en estaciones de referencia o balizas, existen otros modos de localización.

Estos se aplican de una manera más amplia en otros ámbitos, como puede ser la localización en interiores mediante redes de sensores.

Uno de ellos es la medida por ángulo de llegada (AOA). Este método mide la diferencia angular entre el receptor y el transmisor y mediante intersección de líneas estima un punto o un área para el receptor. La geometría de la antena juega un papel muy importante en este caso y ha de ser conocida para el receptor.

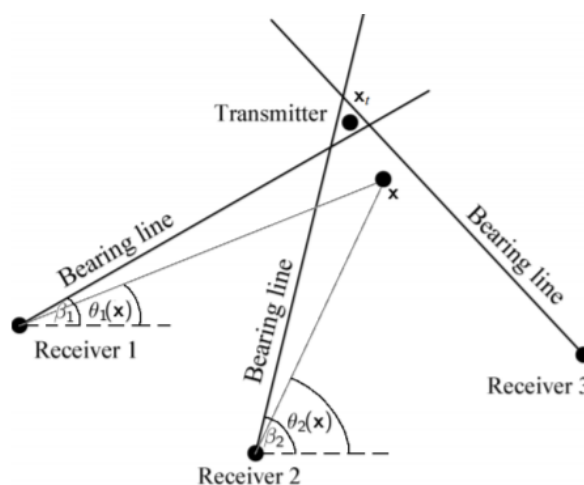


Figura 6 Localización por AOA [13]

Otro caso son medidas en base a distancia. Este caso es similar al expuesto para el geoposicionamiento por satélite; mediante el cálculo de la diferencia entre el momento de envío de la señal y el momento de recepción, teniendo en cuenta el tiempo de propagación y asumiendo mismo sistema de tiempos, se puede calcular la distancia.

Una versión optimizada de este algoritmo es *Time-Distance of arrival* (TDOA) o multilaterización, que según las hipérbolas producidas por los receptores estima un área de recepción.

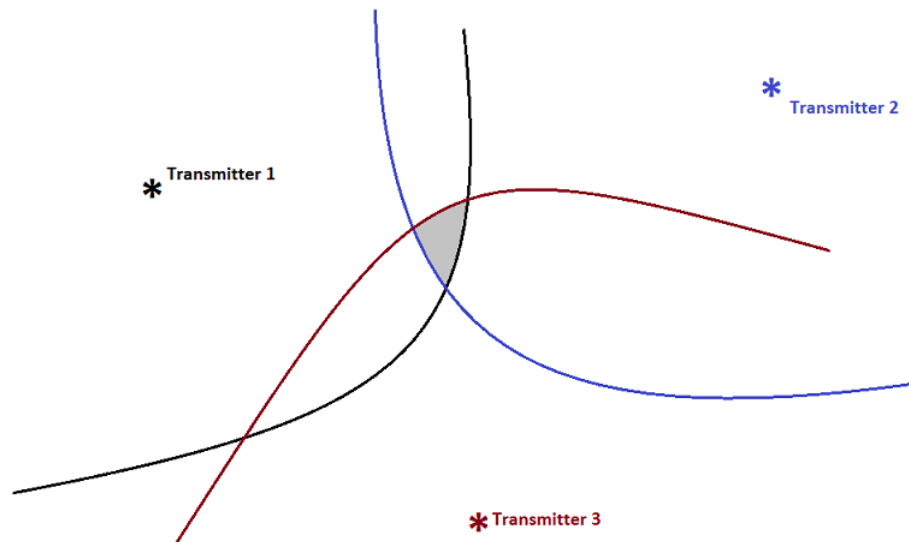


Figura 7 TDOA

Otra aproximación es estimar la distancia en base a la diferencia de potencias recibidas (*signal strength indicator*, RSS), pero los factores ambientales como la difracción pueden alterar mucho estos resultados.

### 3 MATLAB Y SUS SISTEMAS DE INTERFACES

Matlab [14] es una herramienta de análisis matemático extendida en el ámbito académico.

Es un instalable que requiere licencia y es compatible principalmente con Windows. Además, es entorno de trabajo y un lenguaje de programación que permite realizar cálculos complejos con grandes cantidades de datos. Dispone de librerías adicionales (*Toolboxes*), algunas requieren pago adicional, que se adaptan a distintos ámbitos de aplicación.

#### MATLAB UI

Matlab permite la creación de interfaces gráficas de usuario (GUI) [15] para la interacción con las librerías ya disponibles o creadas por el usuario.

Permiten la inclusión de controles típicos como botones y desplegados y la inclusión de gráficas.

También proporciona la posibilidad de mediante un entorno de desarrollo de interfaz gráfica de usuario, GUIDE, realizar rápidamente pequeñas aplicaciones gráficas, pero con personalización limitada. Esta opción se realiza incluyendo mediante *drag-and-drop* los elementos deseados sobre un área de trabajo. Con cada acción, el programa genera automáticamente el código de control.

Para un mayor control o para interfaces más complejas, es posible crear y disponer de los elementos de manera programática de manera similar a otras herramientas de desarrollo como C# o Java Swing. Soporta edición HTML para la personalización visual de los elementos.

## 4 DESARROLLO DEL PROYECTO: Impacto de los distintos sistemas satelitales en las medidas de precisión

Como ya se ha explicado anteriormente, uno de los objetivos del ámbito de proyecto es desarrollar un programa en Matlab que permita comparar la calidad de la señal en distintos sistemas de tiempos.

Los parámetros que se van a analizar son los DOP (*dilution of precision*), ya introducidos en el apartado 2.3.1.

Sin embargo, para llegar a las expresiones finales que puedan incluirse en el programa, es necesario partir de las coordenadas de los transmisores y trabajar sobre la expresión de pseudorrangos o pseudodistancias.

### 4.1 Ecuaciones de posición

Esta sección cubre la adaptación de la ecuación de posición mediante linealización con el objetivo de poder resolver el problema planteado.

#### 4.1.1 Caso general

Como ya ha explicado anteriormente, para el cálculo de la posición se parte de un sistema de ecuaciones tal que así:

$$\begin{bmatrix} Pc(1) \\ Pc(2) \\ \dots \\ Pc(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1(x_r) \\ r_2(x_r) \\ \dots \\ r_k(x_r) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \dots \\ 1 \end{bmatrix} c\delta t_r \quad (9)$$

Con  $P_c(1)$  siendo el Pseudorango corregido del satélite 1, hasta el satélite k-ésimo y  $r_1(x_r)$  la distancia entre el satélite y el receptor

$$r_1(k) = \|\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_{s1}\| = \sqrt{(x_r(k) - x_{s1})^2 - (y_r(k) - y_{s1})^2 - (z_r(k) - z_{s1})^2} \quad (10)$$

Si se trabaja sobre una matriz de satélites con coordenadas conocidas con la siguiente equivalencia en notación:

$$Sat = \begin{bmatrix} Sat(1,1) & Sat(1,2) & Sat(1,3) \\ Sat(2,1) & Sat(1,2) & Sat(2,3) \\ Sat(3,1) & Sat(1,2) & Sat(3,3) \\ \dots & \dots & \dots \\ Sat(k,1) & Sat(k,2) & Sat(k,3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s1} & y_{s1} & z_{s1} \\ x_{s2} & y_{s2} & z_{s2} \\ x_{s3} & y_{s3} & z_{s3} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{sk} & y_{sk} & z_{sk} \end{bmatrix} \quad (11)$$

La expresión anterior de Pseudorange es:

$$\begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ \dots \\ Pk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_r(k) - x_{s1})^2 - (y_r(k) - y_{s1})^2 - (z_r(k) - z_{s1})^2} \\ \sqrt{(x_r(k) - x_{s2})^2 - (y_r(k) - y_{s1})^2 - (z_r(k) - z_{s2})^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x_r(k) - x_{sk})^2 - (y_r(k) - y_{sk})^2 - (z_r(k) - z_{sk})^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cdt_r \\ \dots \\ cdt_r \end{bmatrix} \quad (12)$$

Puesto que, para el caso de resolver  $x$ ,  $y$ ,  $z$  y  $t_r$  se está ante un sistema sobredeterminado, se recurre a la resolución por mínimos cuadrados. Para ello, se plantea la ecuación **linealizada en torno al punto  $P(x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})$** , que representa una estación de referencia

$$\begin{bmatrix} P1 \\ P2 \\ \dots \\ Pk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 - \left( \frac{(x_{s1} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_1} + \frac{(y_{s1} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_1} + \frac{(z_{s1} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_1} \right) \\ d_2 - \left( \frac{(x_{s2} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_2} + \frac{(y_{s2} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_2} + \frac{(z_{s2} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_2} \right) \\ \dots \\ d_k - \left( \frac{(x_{sk} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_k} + \frac{(y_{sk} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_k} + \frac{(z_{sk} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_k} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} cdt_r \\ \dots \\ cdt_r \end{bmatrix} \quad (13)$$

Con valores de distancia  $d_i$ ,

$$d_1 = \|x_{pr}(k) - x_{s1}\| = \sqrt{(x_{pr}(k) - x_{s1})^2 - (y_{pr}(k) - y_{s1})^2 - (z_{pr}(k) - z_{s1})^2} \quad (14)$$

Y de manera análoga:  $d_2 = \|x_{pr}(k) - x_{s2}\|$  hasta  $d_k = \|x_{pr}(k) - x_{sk}\|$

Operando sobre la expresión anterior:

$$\begin{bmatrix} P1 - d_1 \\ P2 - d_2 \\ \dots \\ Pk - d_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_{s1} - x_{pr})}{d_1} & -\frac{(y_{s1} - y_{pr})}{d_1} & -\frac{(z_{s1} - z_{pr})}{d_1} & 1 \\ -\frac{(x_{s2} - x_{pr})}{d_2} & -\frac{(y_{s2} - y_{pr})}{d_2} & -\frac{(z_{s2} - z_{pr})}{d_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{(x_{sk} - x_{pr})}{d_k} & -\frac{(y_{sk} - y_{pr})}{d_k} & -\frac{(z_{sk} - z_{pr})}{d_k} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r - x_{pr} \\ y_r - y_{pr} \\ z_r - z_{pr} \\ cdt_r \end{bmatrix} \quad (15)$$



$$\text{Dónde } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_{s1}-x_{pr})}{d_1} & -\frac{(y_{s1}-y_{pr})}{d_1} & -\frac{(z_{s1}-z_{pr})}{d_1} & 1 \\ -\frac{(x_{s2}-x_{pr})}{d_2} & -\frac{(y_{s2}-y_{pr})}{d_2} & -\frac{(z_{s2}-z_{pr})}{d_2} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\frac{(x_{sk}-x_{pr})}{d_k} & -\frac{(y_{sk}-y_{pr})}{d_k} & -\frac{(z_{sk}-z_{pr})}{d_k} & 1 \end{bmatrix} \text{ es la matriz de coeficientes para el}$$

caso general y que en ocasiones se indica cómo  $\Delta P c = \mathbf{H} \cdot \Delta \mathbf{c}$  o  $\Delta \mathbf{x} = \mathbf{H}^{-1} \cdot \Delta P \mathbf{c}$ .

#### 4.1.2 Sistemas con varios tipos de offset

En este apartado se parte de la expresión anterior para el caso particular en el que un equipo de usuario reciba una señal de satélites de dos sistemas GNSS distintos. A modo ilustrativo, la señal recibida de los satélites S1 y S2 pertenecerían a un sistema GNSS1 y *offset1* y los satélites S3, S4 y S5 pertenecerían a un sistema GNSS2 con *offset2*.

$$\begin{bmatrix} P1 - d_1 \\ P2 - d_2 \\ \dots \\ Pk - d_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_{s1}-x_{pr})}{d_1} & -\frac{(y_{s1}-y_{pr})}{d_1} & -\frac{(z_{s1}-z_{pr})}{d_1} & 1 & 0 \\ -\frac{(x_{s2}-x_{pr})}{d_2} & -\frac{(y_{s2}-y_{pr})}{d_2} & -\frac{(z_{s2}-z_{pr})}{d_2} & 1 & 0 \\ -\frac{(x_{s3}-x_{pr})}{d_3} & -\frac{(y_{s3}-y_{pr})}{d_3} & -\frac{(z_{s3}-z_{pr})}{d_3} & 0 & 1 \\ -\frac{(x_{s4}-x_{pr})}{d_4} & -\frac{(y_{s4}-y_{pr})}{d_4} & -\frac{(z_{s4}-z_{pr})}{d_4} & 0 & 1 \\ -\frac{(x_{s5}-x_{pr})}{d_5} & -\frac{(y_{s5}-y_{pr})}{d_5} & -\frac{(z_{s5}-z_{pr})}{d_5} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r - x_{pr} \\ y_r - y_{pr} \\ z_r - z_{pr} \\ cdt_{r1} \\ cdt_{r1} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Se muestra que la ecuación de posición simplemente marca con un 1 el sistema GNSS al que pertenece y que la matriz de coeficientes tendrá tantas columnas como sistemas temporales o GNSS haya presentes.

#### 4.1.3 Balizas fijas con medidas de distancia

En este apartado se estudia cómo queda la ecuación de posición para el caso de sistemas aumentados o sistemas de geoposicionamiento local (apartado 2.5), apoyados en estaciones emisoras de referencia o radio-balizas.

Se aborda el caso de estaciones de posición fija y conocida que puede que realiza medidas de distancia absoluta (sin referencia temporal) o de pseudodistancia.

- Si las estaciones proporcionan medidas de pseudodistancia, el razonamiento es el mismo que en el caso de los satélites y se tendrán en cuenta como un sistema GNSS adicional.
- Si realizan medidas de distancia y no de pseudodistancia, dado que en la ecuación de navegación se trabaja con Pseudodistancia corregidas para tener en cuenta las imprecisiones y tiempos de transmisión, se ha de sustituir  $P_k$  (ya corregida) por  $P$  no corregida.

Como ya se ha indicado, la expresión fundamental de Pseudorrango es

$$P = r + c(\delta t_r - \delta t_s) + I\rho + T\rho + \varepsilon_p, \quad (17)$$

que por razones del ámbito de estudio se está simplificando a  $P = r + c(\delta t_r - \delta t_s)$

El concepto pseudodistancia viene del factor de offset  $c(\delta t_r - \delta t_s)$ . Si se está trabajando en distancia absoluta, se ha de eliminar el factor de offset de la ecuación general de navegación, que queda de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ \dots \\ Rk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_r(k) - x_{b1})^2 - (y_r(k) - y_{b1})^2 - (z_r(k) - z_{b1})^2} \\ \sqrt{(x_r(k) - x_{b2})^2 - (y_r(k) - y_{b1})^2 - (z_r(k) - z_{b2})^2} \\ \dots \\ \sqrt{(x_r(k) - x_{bk})^2 - (y_r(k) - y_{bk})^2 - (z_r(k) - z_{bk})^2} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Se hace hincapié en la notación que se están tratando radio-balizas y el caso de distancia absoluta mediante la sustitución de  $x_{s1}$  por  $x_{b1}$  y  $P$ (pseudorrango) por  $R$  (de rango).

Continuando el desarrollo con linealización en torno al punto de referencia  $P(x_{pr}, y_{pr}, z_{pr})$ :

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ \dots \\ Rk \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 - \left( \frac{(x_{b1} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_1} + \frac{(y_{b1} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_1} + \frac{(z_{b1} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_1} \right) \\ d_2 - \left( \frac{(x_{b2} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_2} + \frac{(y_{b2} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_2} + \frac{(z_{b2} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_2} \right) \\ \dots \\ d_k - \left( \frac{(x_{bk} - x_{pr})(x_r - x_{pr})}{d_k} + \frac{(y_{bk} - y_{pr})(y_r - y_{pr})}{d_k} + \frac{(z_{bk} - z_{pr})(z_r - z_{pr})}{d_k} \right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

Con valores de  $d_i$ ,

$$d_1 = \|\mathbf{x}_{pr}(k) - \mathbf{x}_{s1}\| = \sqrt{(x_{pr}(k) - x_{b1})^2 - (y_{pr}(k) - y_{b1})^2 - (z_{pr}(k) - z_{b1})^2} \quad (20)$$

Y de manera análoga  $d_2 = \|\mathbf{x}_{pr}(k) - \mathbf{x}_{b2}\|$  hasta  $d_k = \|\mathbf{x}_{pr}(k) - \mathbf{x}_{bk}\|$

Si se continua con el desarrollo, se llega a una expresión sin factor de offset puesto que tenemos distancia absoluta:

$$\begin{bmatrix} R1 - d_1 \\ R2 - d_2 \\ \dots \\ Rk - d_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(x_{b1}-x_{pr})}{d_1} & -\frac{(y_{b1}-y_{pr})}{d_1} & -\frac{(z_{b1}-z_{pr})}{d_1} \\ -\frac{(x_{b2}-x_{pr})}{d_2} & -\frac{(y_{b2}-y_{pr})}{d_2} & -\frac{(z_{b2}-z_{pr})}{d_2} \\ \dots & \dots & \dots \\ -\frac{(x_{bk}-x_{pr})}{d_k} & -\frac{(y_{bk}-y_{pr})}{d_k} & -\frac{(z_{sk}-z_{pr})}{d_k} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r - x_{pr} \\ y_r - y_{pr} \\ z_r - z_{pr} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} x_r - x_{pr} \\ y_r - y_{pr} \\ z_r - z_{pr} \end{bmatrix} \quad (21)$$

En la matriz de coeficientes  $\mathbf{H}$ , la columna de unos desaparece puesto que el factor retardo ya no se ha de considerar.

## 4.2 Cálculo de DOP

DOP analiza la desviación de las medidas para la posición y el tiempo. Los valores DOP se obtienen de la matriz de geometría  $\mathbf{G}$ , fruto de la relación de las matrices de coeficientes, es decir, de la relación de los transmisores consigo mismos.

$$\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})^{-1}. \quad (22)$$

Como se ha observado en el apartado a lo largo del apartado 4.1, las expresiones de la matriz de coeficientes  $\mathbf{H}$  toman distintas formas según la combinación de transmisores con la que se trabaje. Por ello, la matriz  $\mathbf{G}$  caracteriza la geometría de cada constelación que la forma.

La ecuación de navegación busca optimizar mediante mínimos cuadrados (para el caso de desarrollo de Taylor). La expresión resultante es

$$f(\Delta c) = (\Delta \mathbf{p}c - \mathbf{H}\Delta c)^T \cdot \mathbf{W} \cdot (\Delta \mathbf{p}c - \mathbf{H}\Delta c). \quad (23)$$

Aparece el término la matriz  $\mathbf{W}$ , que hace referencia a una matriz ponderada que permite optimizar el cálculo según una serie de criterios.

La solución de la expresión anterior es

$$(\Delta \hat{c}) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_u \\ cd\hat{t}_u \end{bmatrix} = (\Delta \mathbf{p}c - \mathbf{H}\Delta c)^T \cdot \mathbf{W} \cdot (\Delta \mathbf{p}c - \mathbf{H}\Delta c) \quad (24)$$

Se suponen errores en la variación del pseudorrango  $\Delta p_c$  con media cero y covarianza  $c_p$ . En consecuencia, los errores en la estimación de las coordenadas y en el *offset* también tienen media cero y su matriz de covarianza es  $C_{pos}$

$$c_{pos} = cov \left( \begin{bmatrix} \Delta \hat{x}_u \\ cd\hat{t}_u \end{bmatrix} \right) = (H^T \cdot W \cdot H)^{-1} \cdot H^T \cdot W \cdot C_p \cdot W \cdot H (H^T \cdot W \cdot H)^{-1} \quad (25)$$

Según la matriz de ponderación escogida y asumiendo pseudorrangos incorrelados, se llega a la conclusión de que  $C_{pos} = \sigma_{uere}^2 (H^T \cdot H)^{-1}$  donde hay un término de covarianza que es estrictamente función de la geometría. Se identifica como  $G = (H^T \cdot H)^{-1}$  y permite calcular los factores DOP.  $\sigma_{uere}^2$  es el error equivalente en distancia al usuario y afecta igual a todos los satélites.

La matriz  $G$  representa por lo tanto lo siguiente:

$$G = (H^T \cdot W \cdot H)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Cuando no se especifica, o se omite,  $W$  es una matriz diagonal de unos.

En la expresión de la matriz de geometrías  $G$ , los factores DOP quedan contenidos de la siguiente manera:

- *Position Dilution of Precision (PDOP)* =  $\sqrt{G_{1,1} + G_{2,2} + G_{3,3}}$
- *Time DOP (TDOP)* =  $G_{4,4}$ . En casos de sistemas con varios offsets, estará contenido en los distintos valores desde la posición 4 hasta el fin de la matriz.
- *Geometric DOP (GDOP)* =  $\sqrt{G_{1,1} + G_{2,2} + G_{3,3} + G_{4,4}}$ . Este valor variaría según los distintos *offsets* recibidos.

En resumen, para una expresión general, se calculan los siguientes valores:

$$PDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2} \quad (27)$$

$$HDOP = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2} \quad (28)$$

$$VDOP = \sqrt{\sigma_{zz}^2} \quad (29)$$

$$TDOP_i = \sqrt{\sigma_{ti}^2} \quad (30)$$

$$GDOP = \sqrt{PDOP^2 + TDOP^2} \quad (31)$$

#### 4.2.1 Estudio de la matriz de pesos (WDOP)

En la vida real, los receptores son capaces de analizar si la señal que reciben es suficiente buena y según ello tenerla en cuenta o desestimarla. Una forma de considerar la calidad de las señales recibidas y su impacto en los factores DOP es asignar una penalización o una bonificación a aquellos emisores que no cumplan ciertos parámetros.

Para ello, en la ecuación de relaciones de geometría  $\mathbf{G} = (\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{H})^{-1}$  el valor de la matriz diagonal de pesos  $\mathbf{W}$  se pueden adaptar para que asigne coeficientes en base a distintos criterios. Para este proyecto se han seleccionado los siguientes:

- *WeightDistance*: Penalización por satélite más lejano. Bonificación al más cercano. Se ha representado con las siglas WDDOP.
- *WeightElevation*: Penalización por satélite con mayor elevación, se indica con las siglas WEDOP.
- *WeightTiming*: En caso de estar antes varios sistemas de tiempos, penalización al sistema con mayor offset, que se representa con las siglas WTDOP.

Esto permite obtener nuevos valores de PDOP, HDOP, VDOP, TDOP que potencian o minimizan las medidas que puedan verse afectadas por la elección del sistema de satélites.

Los valores asignados a la matriz  $\mathbf{W}$  han sido:

<i>WeightDistance</i>	Se realiza el cálculo de distancia entre cada transmisor y el punto de referencia utilizado	Al más cercano se le aplica un valor 2 en la posición de su peso en la matriz $\mathbf{W}$ Al más lejano uno de 0.25
<i>WeightElevation</i>	En términos de elevación y azimut, se escoge aquel con mayor elevación	Se penaliza el transmisor con mayor elevación con un valor de 0.5
<i>WeightTiming</i>	Si la matriz $\mathbf{G}$ tiene más de 4 columnas, es decir, hay más de 1 sistema de tiempos, se comparan los valores $\sigma_{tt}^2$	Se le asigna un valor de 0.25 en su posición en la matriz de pesos $\mathbf{W}$

Tabla 9 Cálculo de  $\mathbf{W}$

#### 4.2.2 Balizas con ángulo de llegada

Las técnicas de localización *Angle of Arrival* (AOA) permiten estimar la posición sin la necesidad de sincronismo entre los distintos elementos de la red de geoposicionamiento.

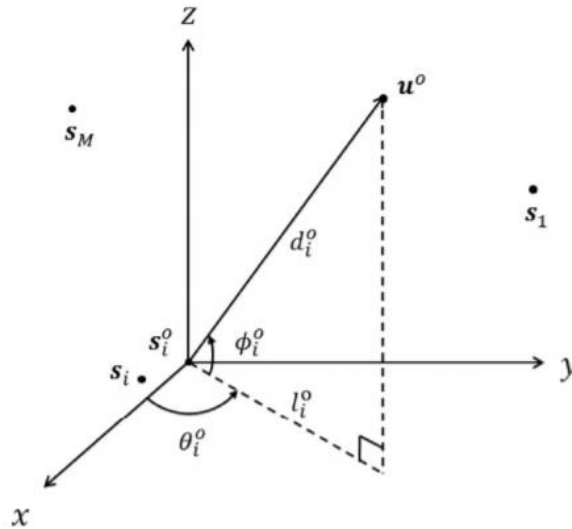


Figura 8 Escenario AOA – 3D. Obtenido de [16]

Cada señal emitida en los alrededores del punto P tiene dos ángulos, elevación  $\theta$  y azimut  $\phi$ , dependientes a la hora de calcular la posición. La relación entre los ángulos según [16] es la siguiente:

$$\theta_i = \tan^{-1} \left( \frac{y_r - y_{bi}}{x_r - x_{bi}} \right) \quad (32)$$

$$\phi_i = \tan^{-1} \left( \frac{\sqrt{(x_r - x_{bi})^2 + (y_r - y_{bi})^2}}{z_r - z_{bi}} \right), \quad (33)$$

De [17] se obtiene como expresiones finales

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \Delta\phi_1 \\ \Delta\phi_2 \\ \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\phi_{b1}}{\partial x} & \frac{\partial\phi_{b1}}{\partial y} & \frac{\partial\phi_{b1}}{\partial z} \\ \frac{\partial\phi_{b2}}{\partial x} & \frac{\partial\phi_{b2}}{\partial y} & \frac{\partial\phi_{b2}}{\partial z} \\ \frac{\partial\theta_{b1}}{\partial x} & \frac{\partial\theta_{b1}}{\partial y} & \frac{\partial\theta_{b1}}{\partial z} \\ \frac{\partial\theta_{b2}}{\partial x} & \frac{\partial\theta_{b2}}{\partial y} & \frac{\partial\theta_{b2}}{\partial z} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{P}, \quad (34)$$

Donde M es el pseudoángulo (en vez de pseudorango en este caso).

La expresión que relaciona el error en la posición y en los ángulos de llegada es:

$$\sigma_p^2 = \text{tr}(\mathbf{H}' \cdot \mathbf{H})^{-1} \cdot \sigma_M^2 \quad (35)$$

Con  $\sigma_M$  la desviación estándar del ángulo medido

$$\text{Y operando, PDOP} = \frac{\sigma_p}{\sigma_M} = \frac{\sqrt{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}}{\sigma_M} \quad (36)$$

Con términos  $\frac{\delta\theta_i}{\delta u} = \left[ \frac{-\sin\theta_i}{d_i \cos\phi_i} \quad \frac{\cos\theta_i}{d_i \cos\phi_i} \quad 0 \right]^T$  y  $\frac{\delta\phi_i}{\delta u} = \left[ \frac{-\sin\phi_i \cos\theta_i}{d_i} \quad \frac{-\sin\phi_i \sin\theta_i}{d_i} \quad \frac{\cos\phi_i}{d_i} \right]^T$  y la distancia  $d_i$  entre los puntos  $x, y, z$  de cada estación radio-baliza y el receptor.

$$d_i = \sqrt{(x_{bi} - x_r)^2 + (y_{bi} - y_r)^2 + (z_{bi} - z_r)^2}; \quad (37)$$

La ecuación de posición en términos angulares por tanto es:

$$\begin{bmatrix} \Delta\phi 1 \\ \Delta\phi 2 \\ \Delta\theta 1 \\ \Delta\theta 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P1' \\ P2' \\ \dots \\ P5' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\sin\theta_{b1}}{d_1 \cos\phi_{b1}} & \frac{\cos\theta_{b1}}{d_1 \cos\phi_{b1}} & 0 \\ \frac{-\sin\theta_{b2}}{d_2 \cos\phi_{b2}} & \frac{\cos\theta_{b2}}{d_2 \cos\phi_{b2}} & 0 \\ \frac{-\sin\phi_{b1} \cos\theta_{b1}}{d_1} & \frac{-\sin\phi_{b1} \sin\theta_{b1}}{d_1} & \frac{\cos\phi_{b1}}{d_1} \\ \frac{-\sin\phi_{b2} \cos\theta_{b2}}{d_2} & \frac{-\sin\phi_{b2} \sin\theta_{b2}}{d_2} & \frac{\cos\phi_{b2}}{d_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \end{bmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \\ \Delta z_r \end{bmatrix} \quad (38)$$

PDOP en este caso se calcula como la relación entre la desviación estándar del error en la posición con respecto al error del ángulo:

$$PDOP_{AOA} = \frac{\sigma_p}{\sigma_M} = \frac{\sqrt{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}}{\sigma_M} \quad (39)$$

$$HDOP_{AOA} = \frac{\sqrt{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}}{\sigma_M} \quad (40)$$

$$VDOP_{AOA} = \frac{\sqrt{\sigma_{zz}}}{\sigma_M} \quad (41)$$

$$GDOP_{AOA} = \sqrt{PDOP_{AOA}^2 + TDOP_{AOA}^2} \quad (42)$$

#### 4.3 Resumen funciones de rutinas de precisión

A continuación, se listan los ficheros de Matlab que agrupan las rutinas y otras funciones fruto de este estudio y que permiten realizar el análisis posterior.

<b>Rutina</b>	<b>Descripción</b>
<i>HMatrix_Dynamic</i>	Dada una matriz de coordenadas de x transmisores Sat del varios sistemas distintos y un punto de linealización (xp, yp, zp) devuelve la matriz de coeficientes linealizada
<i>calculateW</i>	Según el tipo de DOP (DOP, WEDOP, WDDOP o WTDOP) llama a la función correspondiente para calcular la matriz ponderada W
<i>WDOP_calculation</i>	Dada una matriz de pesos, calcula y devuelve valores para distintos valores de DOP: PDOP, HDOP, VDOP, TDOP y GDOP.
<i>WeightElevation</i>	Dada una constelación, calcula y devuelve una matriz de pesos W que penaliza al transmisor con mayor elevación
<i>WeightDistance</i>	Dada una constelación, calcula y devuelve una matriz de pesos W que penaliza al transmisor más lejano a un punto de referencia dado y asigna mayor peso al más cercano
<i>WeightTiming</i>	Dada una constelación, calcula y devuelve una matriz de pesos W que penaliza al transmisor con mayor offset

*Tabla 10 Funciones de cálculo*

<b>Rutina</b>	<b>Descripción</b>
<i>drawCircle</i>	Dibuja un círculo con los datos indicados
<i>drawXDOPresults</i>	Dibuja los resultados de xDOP en formato circular. Genera una tabla con dichos valores
<i>drawXDOPmovements</i>	Dada una ruta caracterizada por una serie de puntos, calcula los valores DOP y los muestra para cada punto en modo gráfico horizontal. Genera una tabla con dichos valores.
<i>drawXDOPsystems</i>	Dadas tres constelaciones de transmisores, genera una comparación en modo histograma de valores de precisión para cada uno. Indica en una tabla los resultados.
<i>drawXDOPSystemsMovement</i>	Dadas tres constelaciones de transmisores y una ruta definida por una serie de puntos, representa genera una comparación en modo diagrama de puntos de valores de precisión para cada uno.

*Tabla 11 Funciones de interfaz*

*Otros ficheros funciones*

<b>Rutina</b>	<b>Descripción</b>
<i>LaunchUIDOP.mxl</i>	Script de ejecución que lanza al programa
<i>ui_GNSS</i>	Función que muestra los datos y recoge las interacciones del usuario
<i>trimRefPoint</i>	Función que coge un string tipo celda y recorta su primer y último carácter
<i>DOP_explanation</i>	Función que devuelve un string con una descripción de Ideal a Pobre, según el valor de xdop proporcionado

*Tabla 12 Otras funciones*



## 5 ANÁLISIS Y COMPARATIVA DE VALORES DE DOP EN UN RECEPTOR BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN GNSS

Como ya se ha comentado, el objetivo principal de este proyecto es trasladar a rutinas programáticas la capacidad de calcular y mostrar los factores DOP para una serie de situaciones.

Se parte de un código que proporciona una lista fija cuatro satélites, cuatro estaciones fijas y de tres puntos de referencia para que, en el momento adecuado, el usuario escoja. Estos valores están albergados en el script principal 'LaunchUIDOP.mlx'.

```
%%Define transmitters (sats)
Sats = [47.57, 8.54, 20576208;
        28.54, 9.75, 20795704;
        24.17, 9.01, 20260600;
        51.68, -20.92, 19747300];

%%Define transmitters (beacons)
Beacons= [ 40.92, -37.35, 20034300;
           40.54, -3.59, 780;
           40.54, -4.21, 708;
           40.54, -3.15, 700];

%%Define Taylor Points
RefPoints=[40.2, -3.5, 720;
           40.18, -3.45, 715;
           40.25, -3.89, 713];
```

Figura 9 Coordenadas transmisores y puntos de referencia

Tras lanzar el programa, el usuario se encuentra con la siguiente pantalla, que le permite a realizar las comparaciones necesarias:

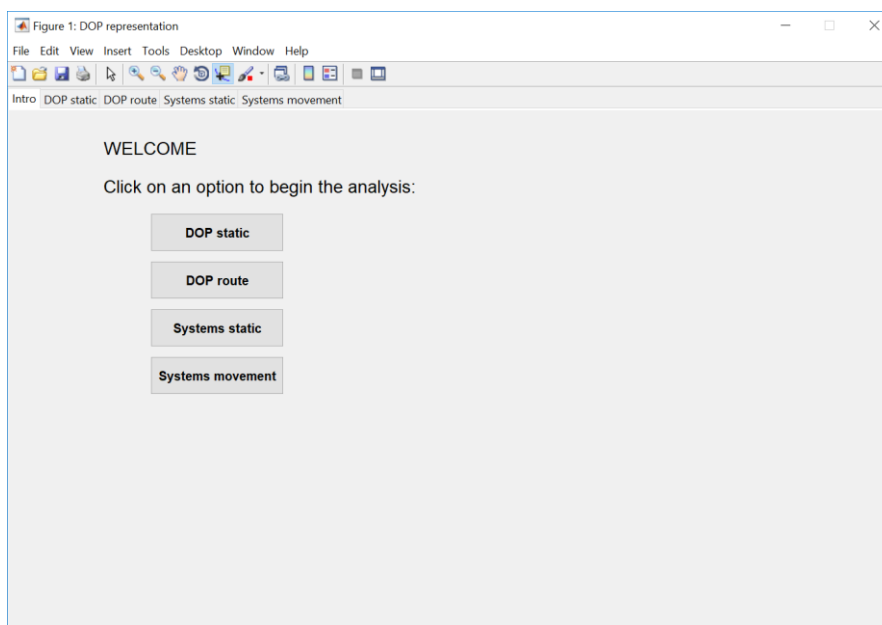


Figura 10 Pantalla de inicio

Siguiendo el orden de la pantalla de inicio, se analizan los factores DOP bajo los escenarios que se irán detallando.

## 5.1 Análisis estático

El objetivo de esta pantalla es facilitar la comprensión de la variabilidad de DOP en un receptor estático para luego poder trasladar estos conceptos a receptores en movimiento.

### *Sobre la interfaz*

La primera pantalla presenta una tabla que contiene una serie de coordenadas de transmisores. Estos pueden seleccionarse en las columnas T1, T2, T3 o ninguna.

Las cabeceras T1, T2 y T3 indican que el transmisor seleccionado puede pertenecer a un sistema con *offset* 1, 2 o 3. La columna *Beacon offset* también emula a un sistema transmisor de pseudodistancia, pero se ha separado para recalcar la simulación de sistemas de apoyo basados en radio-balizas (*beacons*) de pseudodistancia. En la práctica estas columnas representan las columnas de unos de la matriz **H** ampliada para el caso de varias constelaciones. La última columna, *Beacon no time*, permite seleccionar y emular transmisores de distancia.

En la gráfica de la derecha, los puntos verdes representan la posición de los transmisores seleccionados y el punto rojo indica la posición del punto de referencia a utilizar en el proceso de linealización.

Se comienza por comparar los valores de DOP en un caso de cuatro satélites para cuatro incógnitas ( $x, y, z$  y  $t$ ) frente a un sistema sobredimensionado.

Se puede observar que si bien los valores de calidad de la señal ya eran buenos (entre 1 y 3 para PDOP, HDOP y VDOP) estos se ajustan más en el caso del sistema sobredeterminado:

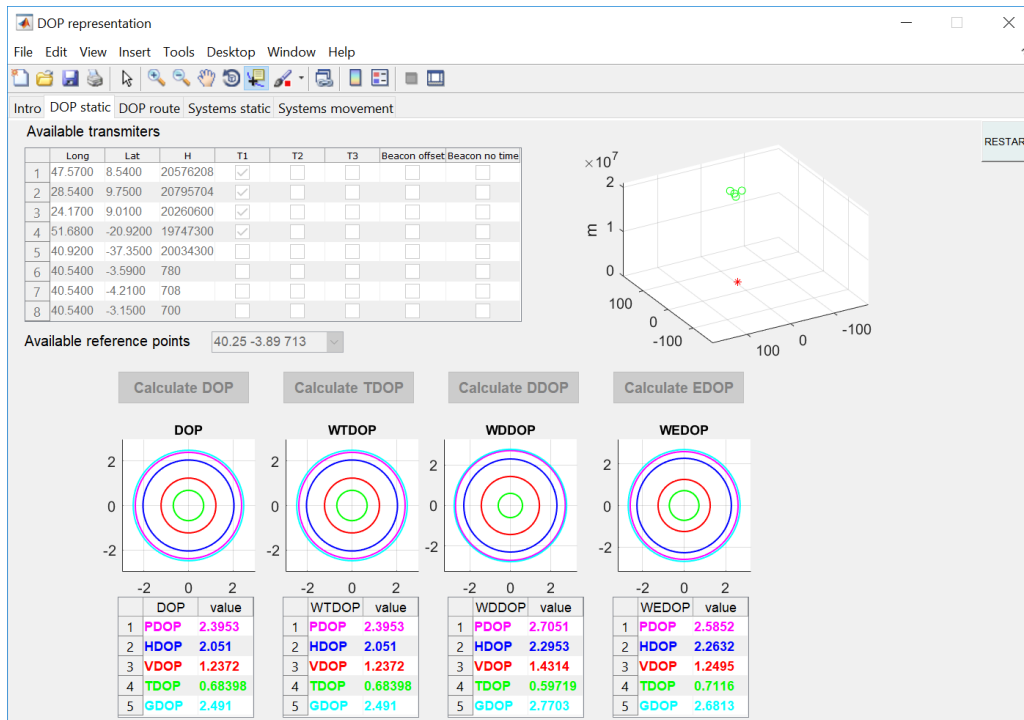


Figura 11 Estático – Un sistema con 4 emisores

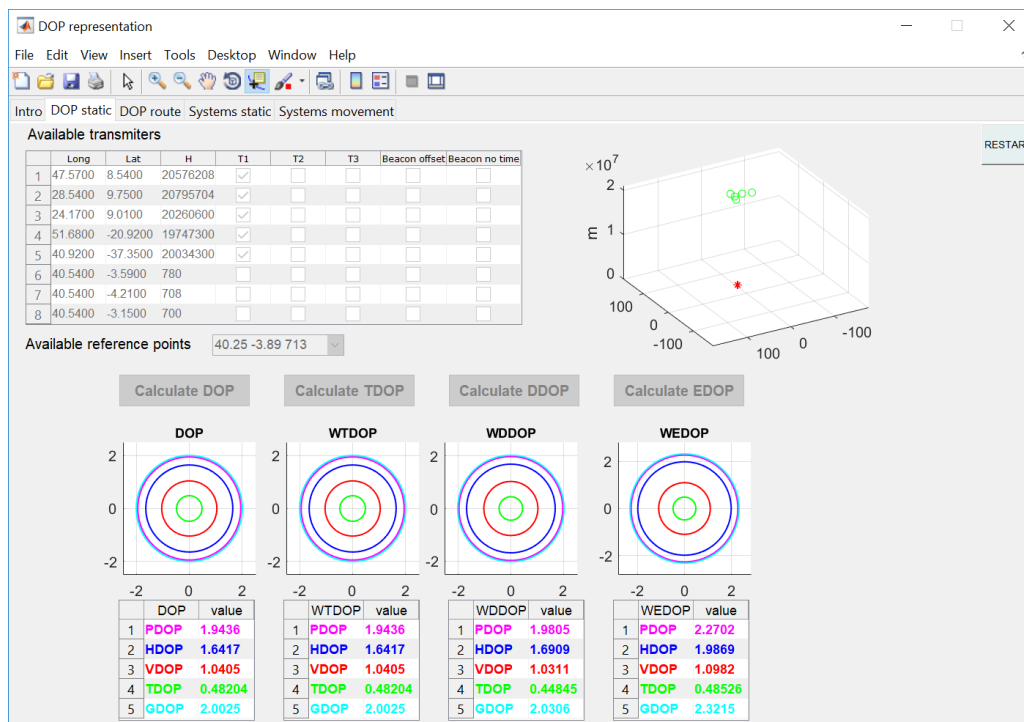


Figura 12 Estático - Un sistema con 5 emisores

Si se varía el punto de referencia de la Figura 13 y se compara con siguiente figura (Figura 14), se ve que los valores se mantienen aparentemente iguales. La variabilidad es tan pequeña entre ambos puntos en comparación con la distancia a los satélites que no es un factor determinante.

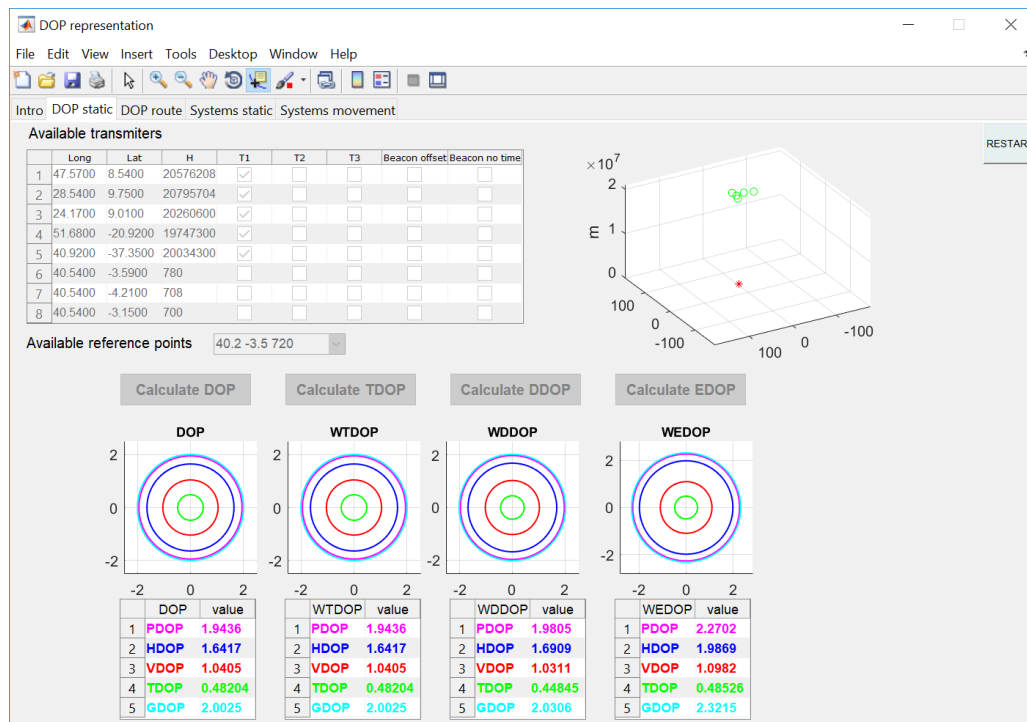


Figura 13 Estático - Un sistema

Esto puede comprobarse comparando un solo sistema de emisión, pero con alturas más cercanas a antenas terrestres que a satélites. En estos casos, la elección del punto de referencia sí es apreciable en términos de DOP, aunque por estar en sistemas sobredeterminados los factores DOP siguen teniendo valores aceptables:

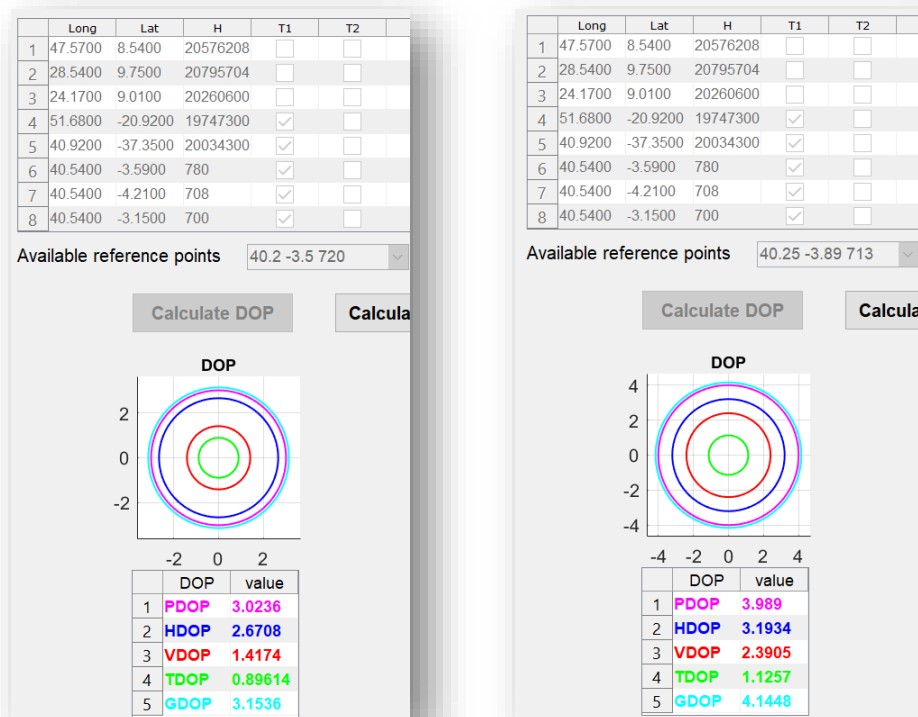


Figura 14 Comparación DOP balizas

Para el caso del entorno multiconstelación en el que se emule un receptor que reciba señales de distintos sistemas de radionavegación, se toma como referencia el tercer punto del desplegable y se comparan los valores DOP en presencia de dos o tres sistemas GNSS (figura 16).

Aun teniendo las mismas coordenadas de transmisión que para el caso de 5 satélites (Figura 13), si estos pertenecen a dos sistemas con *offsets* distintos y sin aplicar corrección, las medidas pasan a ser poco fiables con valores de DOP por encima de 10, consecuencia de perder la redundancia en el cálculo de la señal tomada desde el sistema dimensionado. En este caso se tienen 5 incógnitas ( $x, y, z, \text{tiempo}_{\text{sistema1}}$  y  $\text{tiempo}_{\text{sistema2}}$ ):

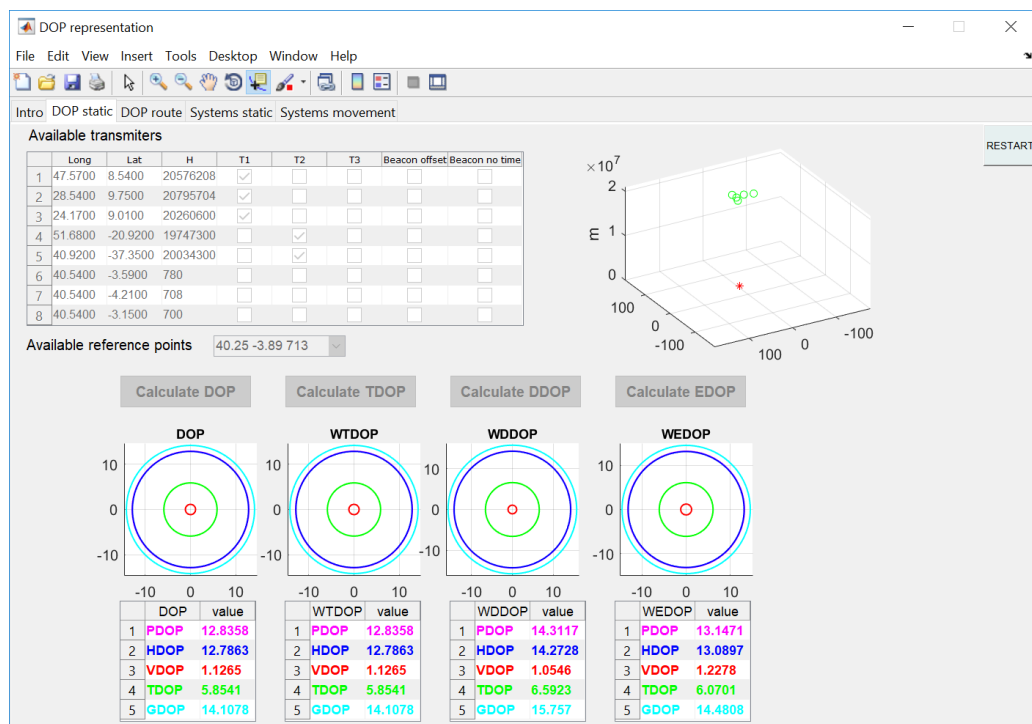


Figura 15 Estático – Dos sistemas

Se contempla un caso similar, pero utilizando radiobalizas (*beacons*) como segundo sistema para imitar el apoyo en un sistema GBAS terrestre. Se compara qué ocurre si estas radio-balizas utilizan otra referencia temporal. Los valores de DOP aumentan por estar utilizando para el cálculo el *offset1* (GNSS – receptor) y el *offset2* (radio-baliza – receptor) con valores absolutos en distancia muy distintos:

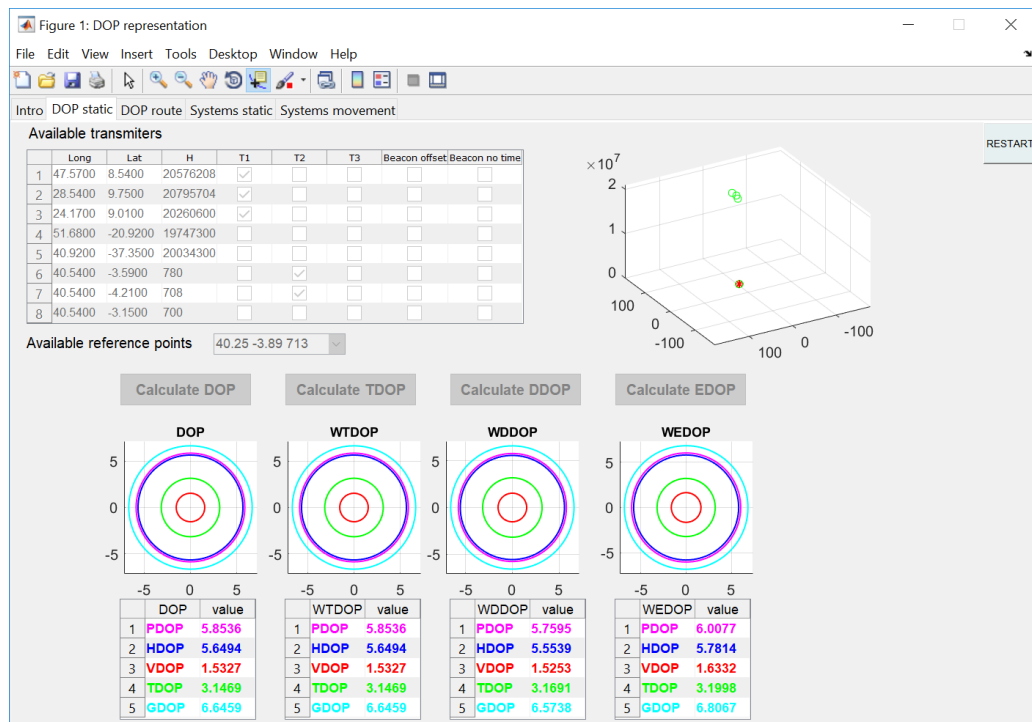


Figura 16 Estático - Satélite + terrestre

Si ahora se incluye una tercera estación de referencia, los valores mejoran algo, pero no drásticamente:

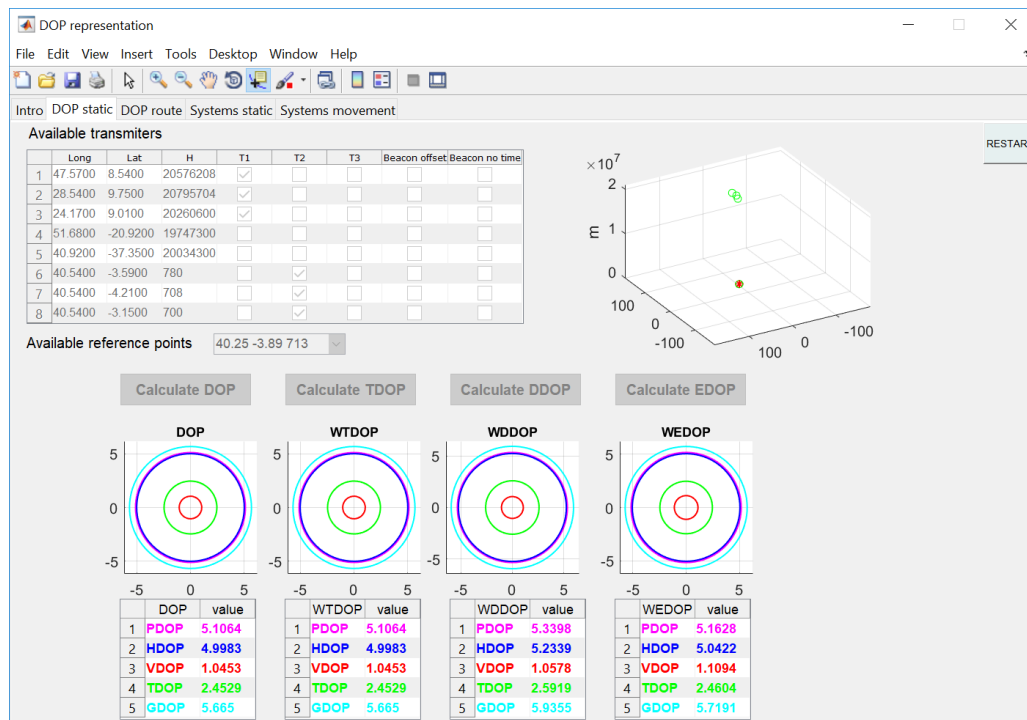


Figura 17 Estático - 3 satélite + 3 terrestre

Por último, para simular un caso de dos sistemas emisores, cada uno con su propio sistema de refuerzo GBAS:

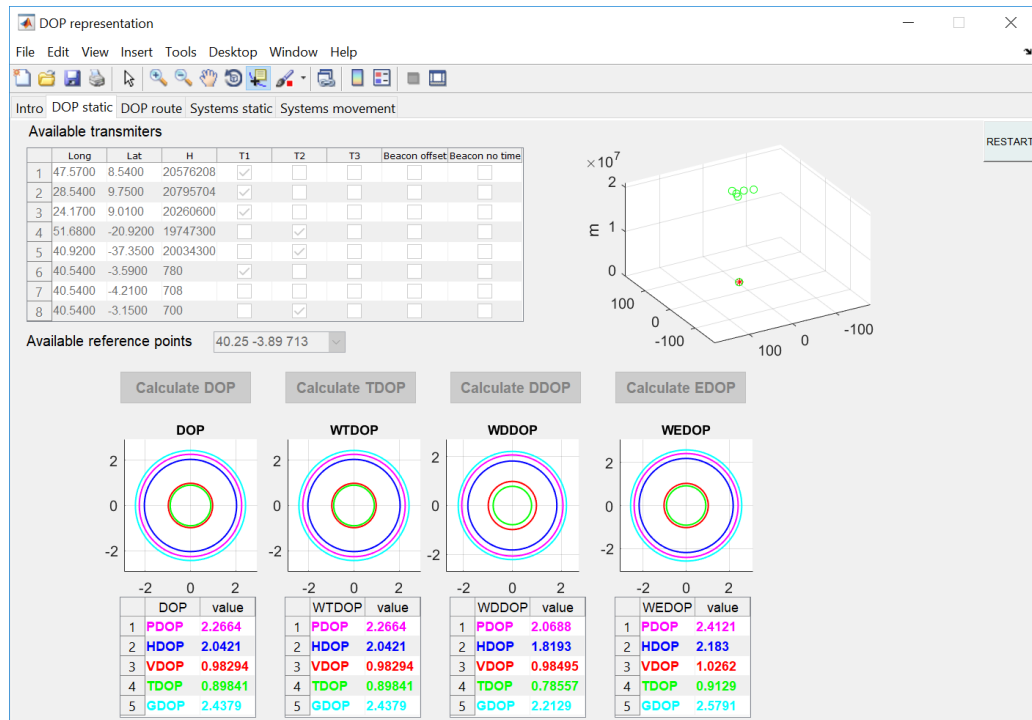


Figura 18 Estático - Simulación de GBAS

Que comparado con el caso de 5 transmisores para dos satélites (Figura 16) proporciona valores de precisión mucho más altos y dentro de los parámetros de confianza.

## 5.2 Análisis en movimiento

Para simular el movimiento del vehículo, se ha simulado el paso del vehículo por distintas estaciones de referencia. La ruta contiene los siguientes puntos:



Figura 19 Ruta para simulación en movimiento.  
Imagen obtenida de <https://www.geoplaner.com/>

Tanto estas como los transmisores se han fijado programáticamente en la función ui\_GNSS para simulación de movimiento:

```
% Tab 2 - Movement data- Constellations
%set by default
satsToStudy= [47.57, 8.54, 20576208 1 0;
              28.54, 9.75, 20795704 0 1;
              24.17, 9.01, 20260600 0 1;
              51.68, -20.92, 19747300 1 0;
              40.92, -37.35, 20034300 0 1];

%Default route
route= [45.467 -2.724, 650;
        43.321 -3.024, 850;
        41.467 -3.324, 1050;
        41.274, -3.5052, 1190;
        41.0279, -3.638, 1042;
        40.598, -3.5936, 6391];
```

Figura 20 Transmisores y coordenadas

Para ahondar en la comparativa, se realiza un análisis utilizando distintas constelaciones y varios puntos de referencia. Cada una de las dos constelaciones simula la exposición a un solo sistema GNSS o un receptor multi-constelación:

Coordenadas de transmisores			Constelación 1 (2 GNSS)	Constelación 2 (1 GNSS)
47.57	8.54	20576208	1 0	1 0
28.54	9.75	20795704	0 1	1 0
24.17	9.01	20260600	0 1	1 0



51.68	-20.92,	19747300	1 0	1 0
40.92	-37.35	20034300	0 1	1 0

Tabla 13 Movimiento - Constelaciones

Sin embargo, de cara a realizar un análisis mayor, se muestran los resultados incluyendo la Constelación 2 también:

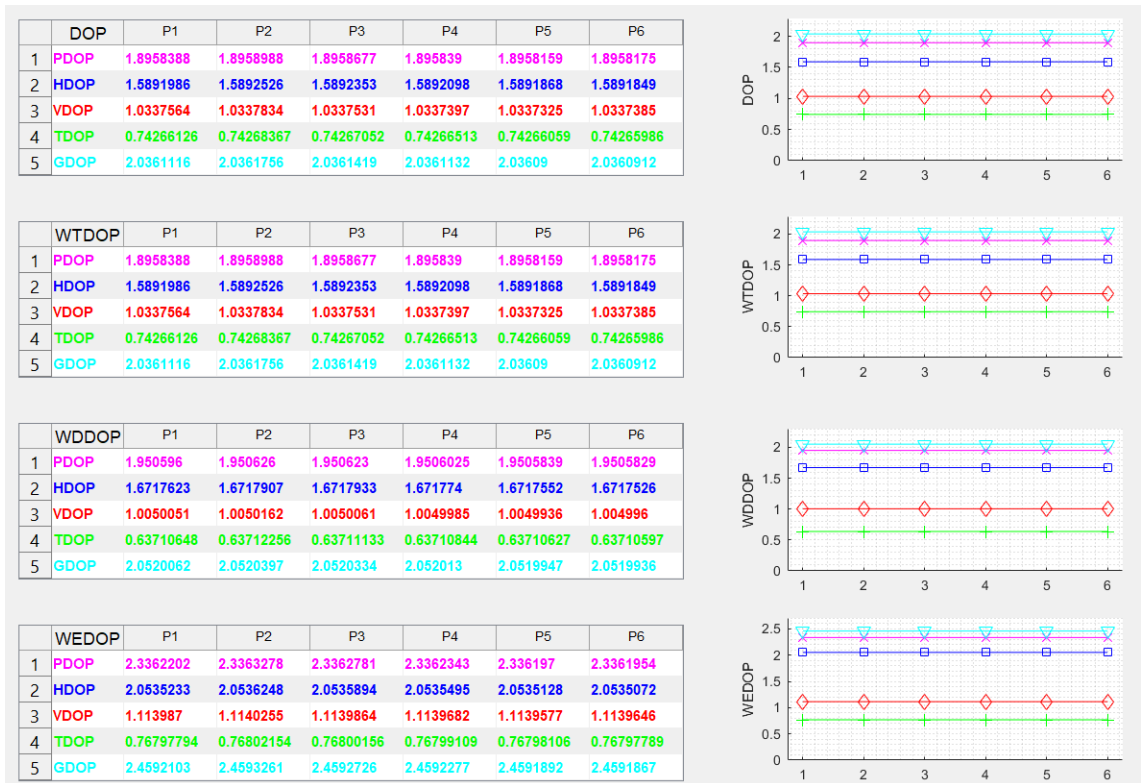


Figura 21 Movimiento – DOP constelación 1

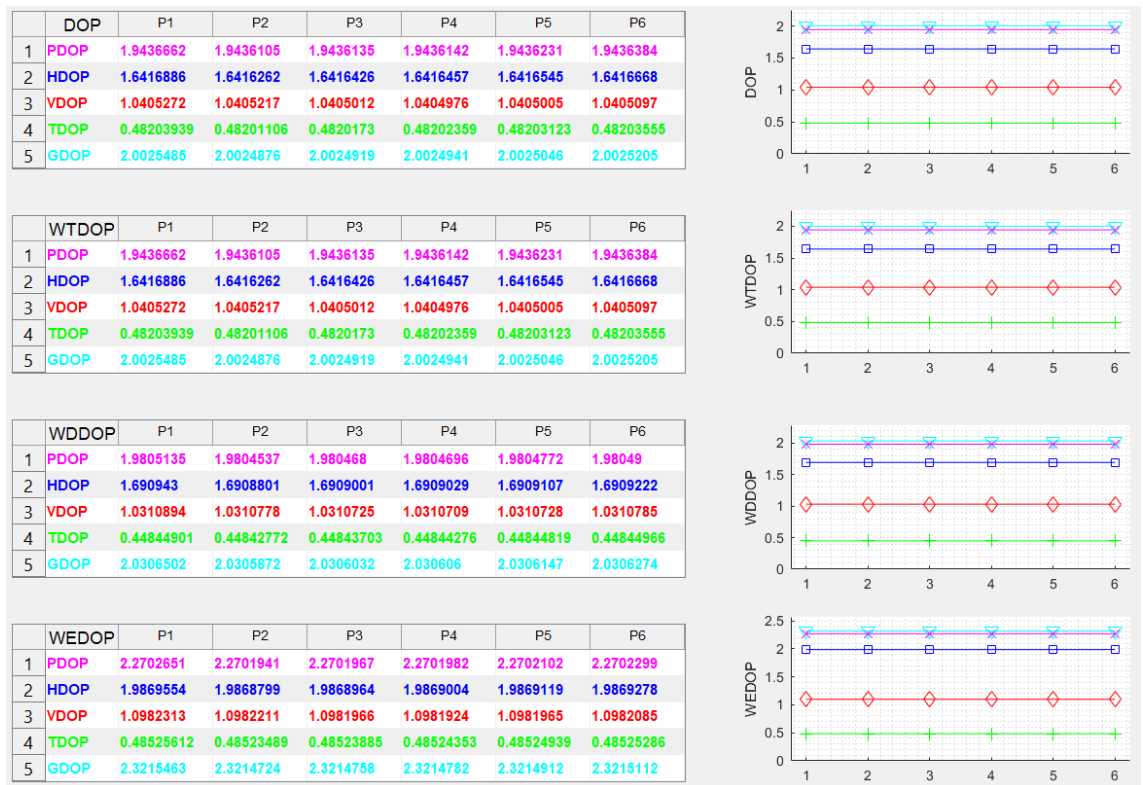


Figura 22 Movimiento – DOP constelación 2

El estudio de valores demuestra valores dentro de los umbrales de confianza por no estar muy lejanos de la situación reflejada en la figura 13 (Constelación 2) y la figura 16 (similar a Constelación 1).

Si ahora se toman puntos de referencia alejados de la carretera y menos cercanos entre sí.

Coordenadas nuevas estaciones de referencia	Nueva ruta de referencia
Punto F: 40.61593º, 3.63554º, 673.7m	40.616º, -3.635º, 673m 40.817º, -3.616º, 896m
Punto G: 40.81756º, 3.61625º, 896.5m	40.817º, -3.616º, 896m 41.508º, -3.715º, 991m
Punto H: 41.50817º, 3.71512º, 991.3m	41.508º, -3.715º, 991m 41.508º, -3.715º, 991m

Tabla 14 Movimiento - Nuevas radio-balizas

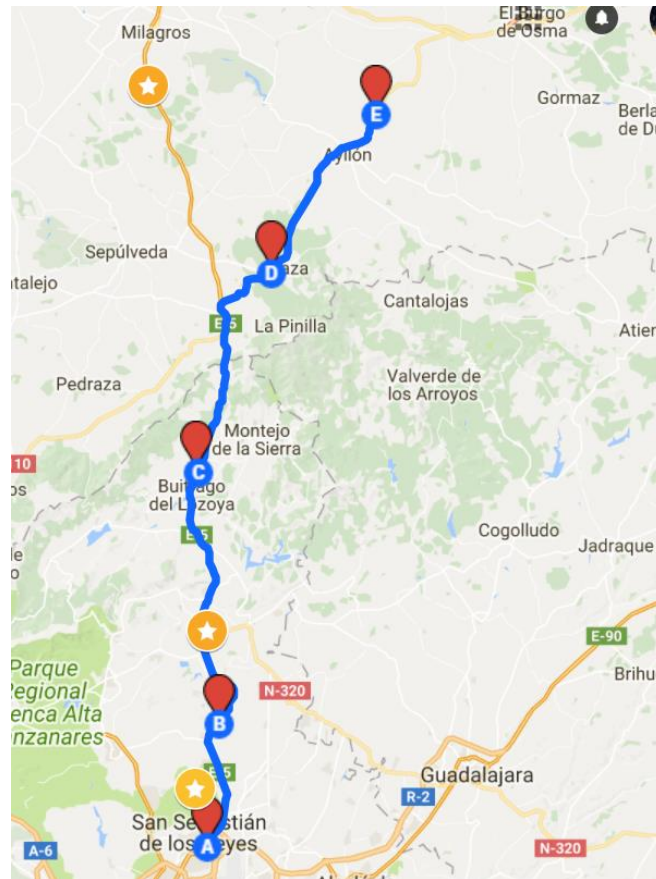


Figura 23 Movimiento - Mapa nuevas radio-balizas

Se observa que para la Constelación 1, los valores siguen siendo confiables:

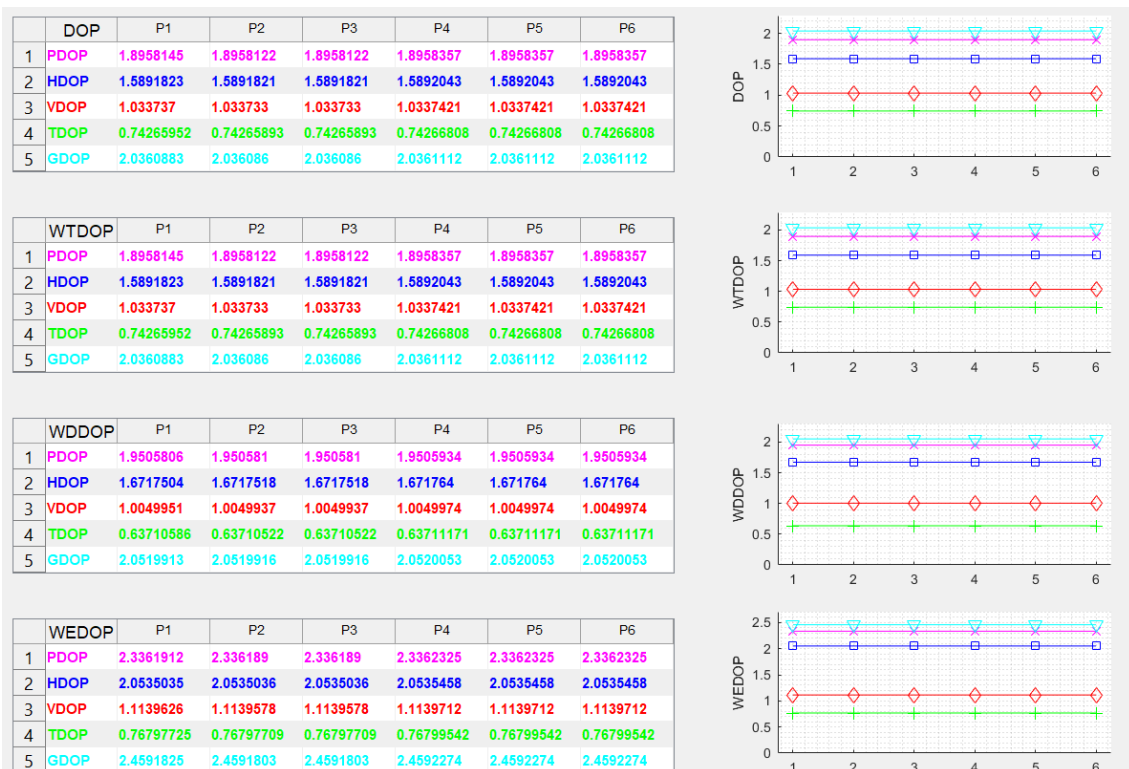


Figura 24 Movimiento - DOP Constelación 1 nuevas balizas

Si se utiliza una tercera constelación, siendo esta la Constelación 1 pero eliminando el cuarto transmisor la calidad de la señal baja pero aun dentro de unos parámetros buenos:

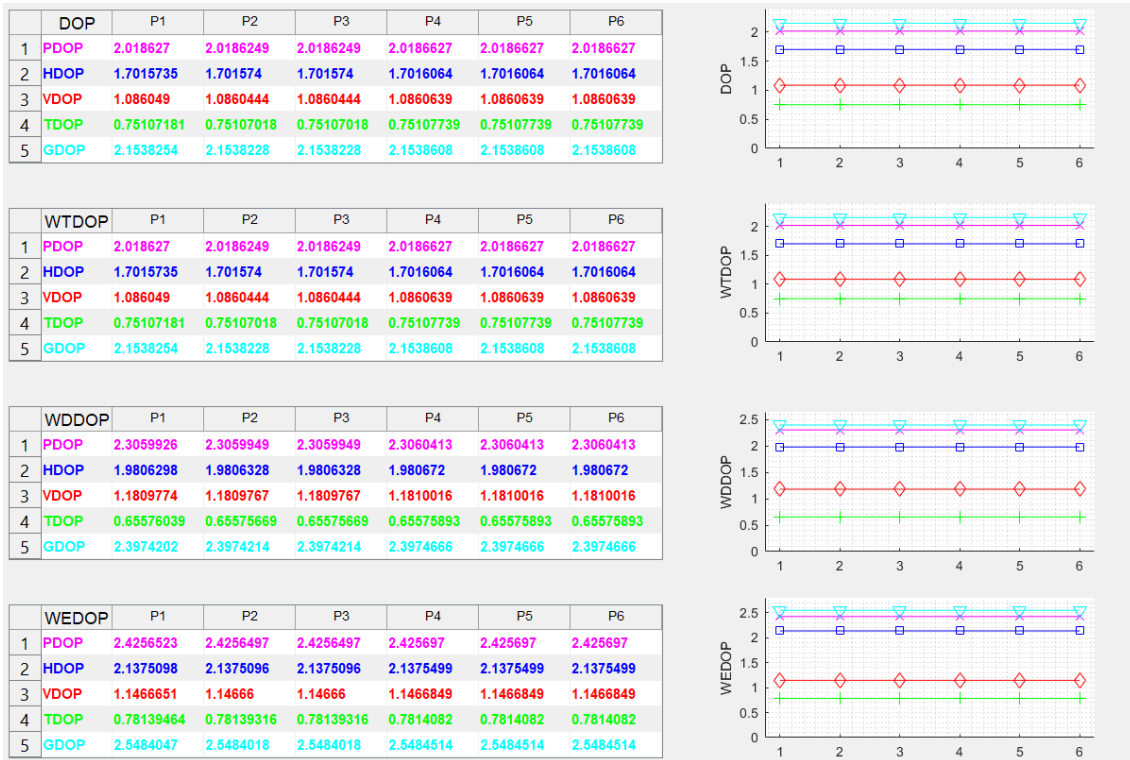


Figura 25 Movimiento - DOP Constelación 1 con nuevas balizas y 4 transmisores

### 5.3 Análisis con varios sistemas en estático

En la pantalla 3, una interfaz similar a la del análisis de sistemas en estático (pantalla 1) permite comparar varias constelaciones a la vez.

El primer caso de análisis es comparar la calidad de la señal en un receptor con:

- Cuatro transmisores de un mismo sistema,
- Cinco transmisores de un mismo sistema,
- Y una combinación de cuatro 4 señales provenientes de transmisores tipo satélite a la que se añade una terrestre.

La Figura 29 muestra que según el parámetro DOP a analizar puede ser mejor un sistema sobredeterminado que uno con apoyo, pero en cuestión de decimales. Esto es debido a que la distribución de la constelación es un factor determinante para los puntos finales de precisión.

Se aprecia que la variación entre los valores no es muy significativa:

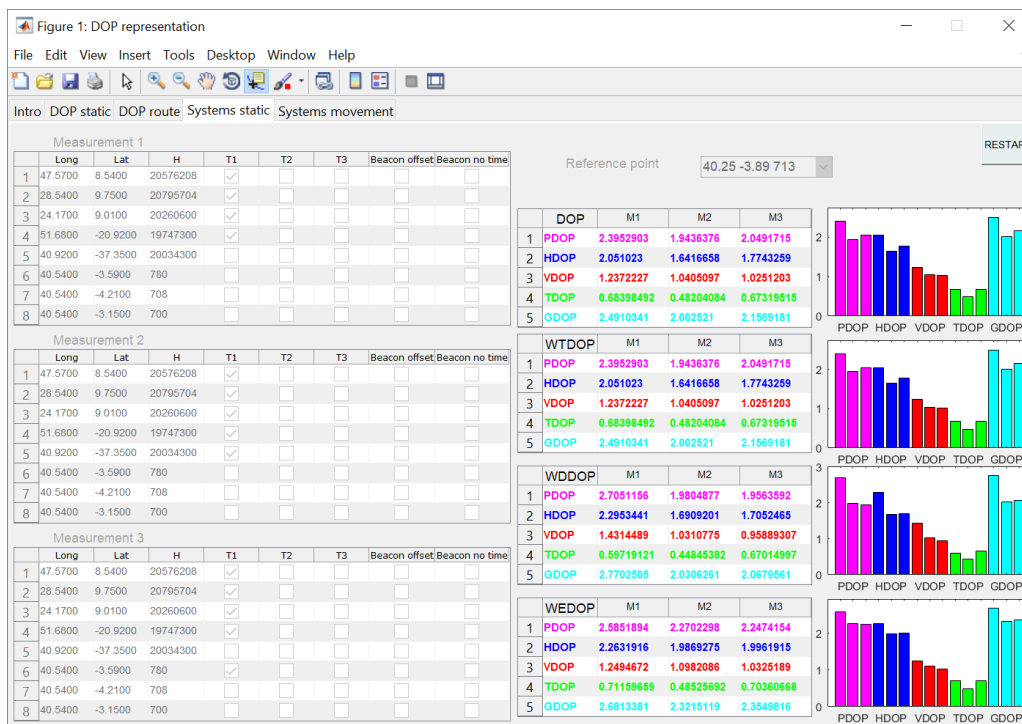


Figura 26 DOPs según combinación en un sistema

Si ahora, tomando la figura 28, se comparan dos sistemas con los mismos satélites, pero distribuidos de manera distinta, se ve cómo afecta su distribución en el espacio a los valores de DOP. Como ninguno de los sistemas tiene cuatro elementos, los valores resultantes son bastante pobres, aunque la tercera constelación es la que proporciona mejores valores:

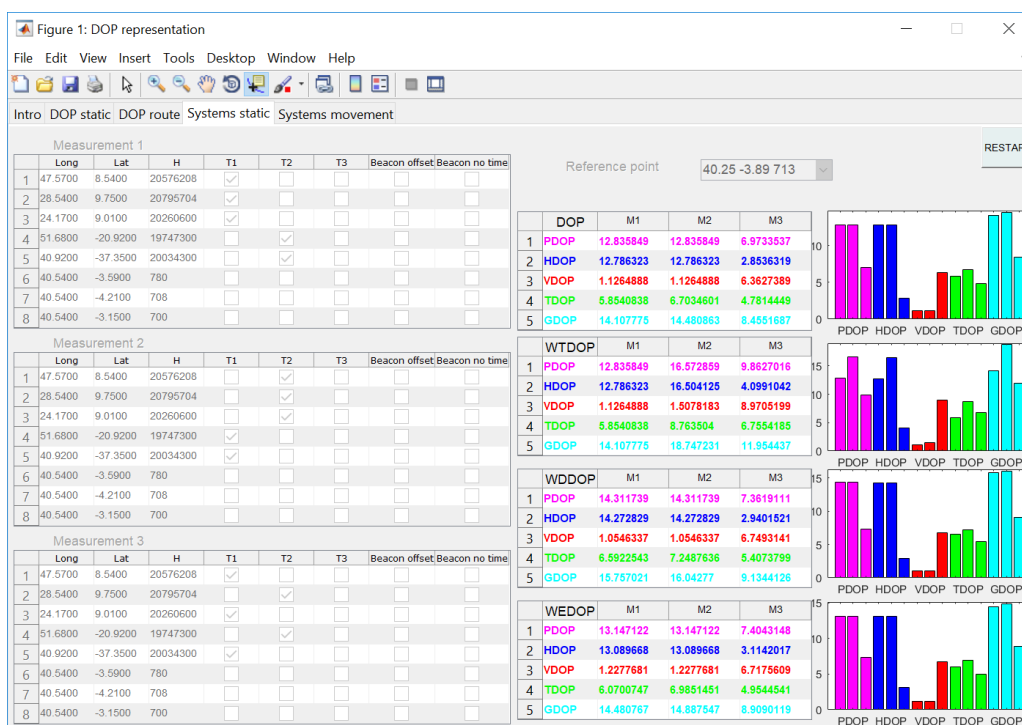


Figura 27 Diferencia de DOP entre constelaciones

Finalmente, se tiene en cuenta la existencia de radiobalizas de posición. En este caso se compara cómo afecta la presencia de radiobalizas de pseudorange, de rango (o distancia) o la mezcla de ambas a una señal recibida de un solo sistema satelital.

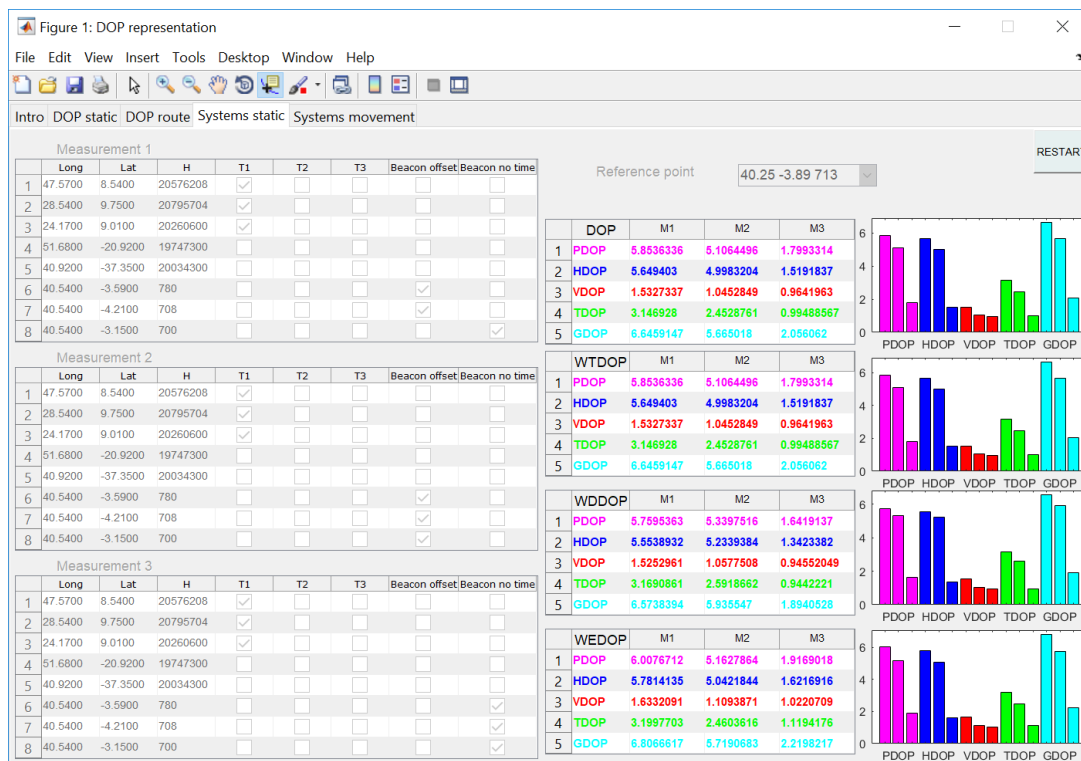


Figura 28 Impacto de radio-balizas de distancia absoluta

La constelación 3, reforzada solo por balizas de rango proporciona los mejores valores, dentro del rango de valor excelente.

#### 5.4 Análisis con varios sistemas en movimiento

Por último, para una ruta dada, se quiere estudiar el impacto de distintos sistemas sobre los parámetros de calidad.

Se utilizan los mismos datos del apartado 5.2 Análisis en movimiento para comparar los valores de DOP.

Se escoge una primera constelación con un solo sistema satelital, una segunda híbrida de dos sistemas satelitales con refuerzo terrestre de pseudorange y una tercera constelación también híbrida pero que se apoya en estaciones de referencia de rango.

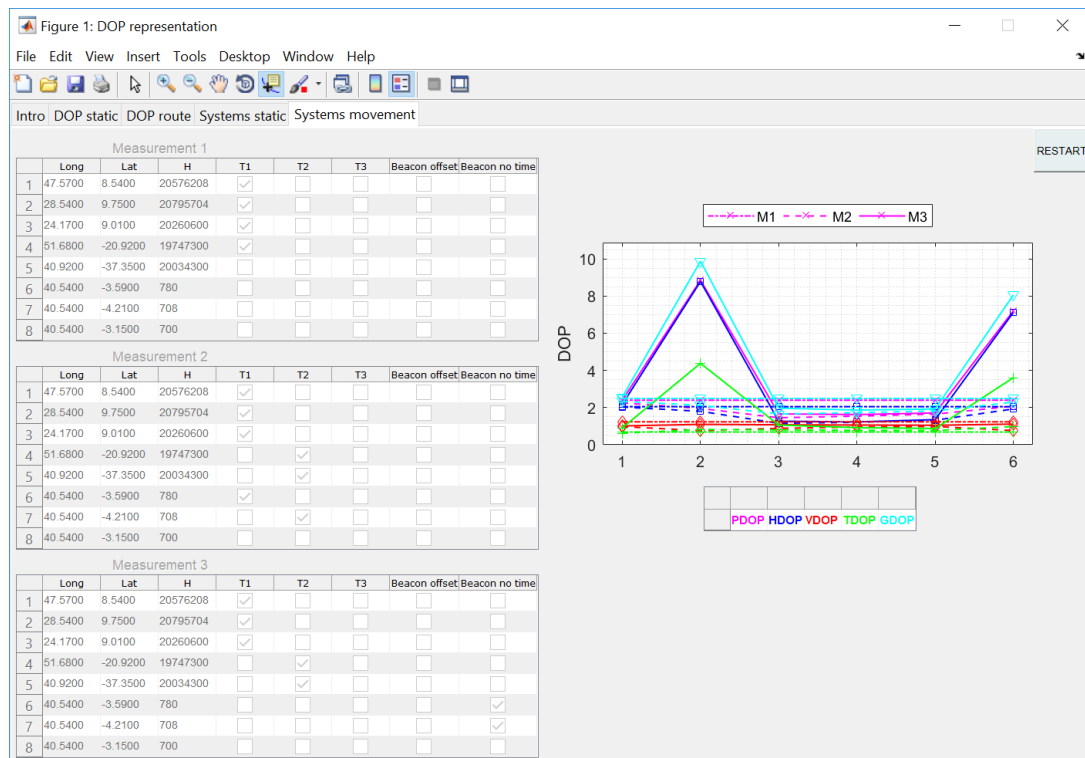


Figura 29 Varios sistemas – DOP

Aunque a primera vista no se aprecie, los valores de DOP, WTDOP, WDDOP y WEDOP varían.

Los mayores valores de dispersión son para la tercera constelación, lo que tiene lógica por ser la más dependiente de la distancia real a las radiobalizas de las constelaciones emisoras. La mejor constelación es la primera.

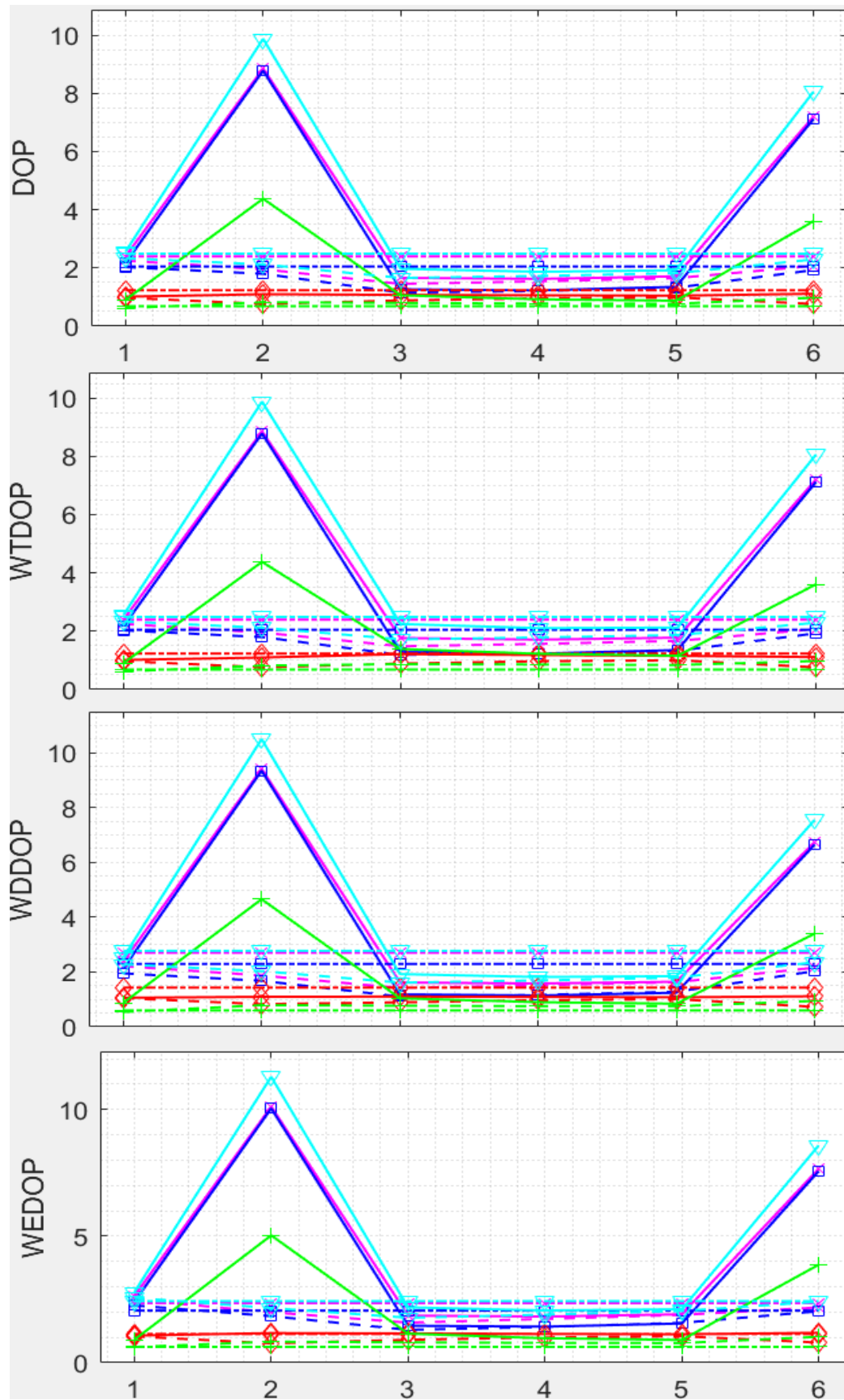


Figura 30 En movimiento - varios sistemas - ruta 1



Si se realiza el mismo análisis con la ruta 2 propuesta en el apartado 5.2 Análisis en movimiento, para las mismas constelaciones anteriores, se obtiene:

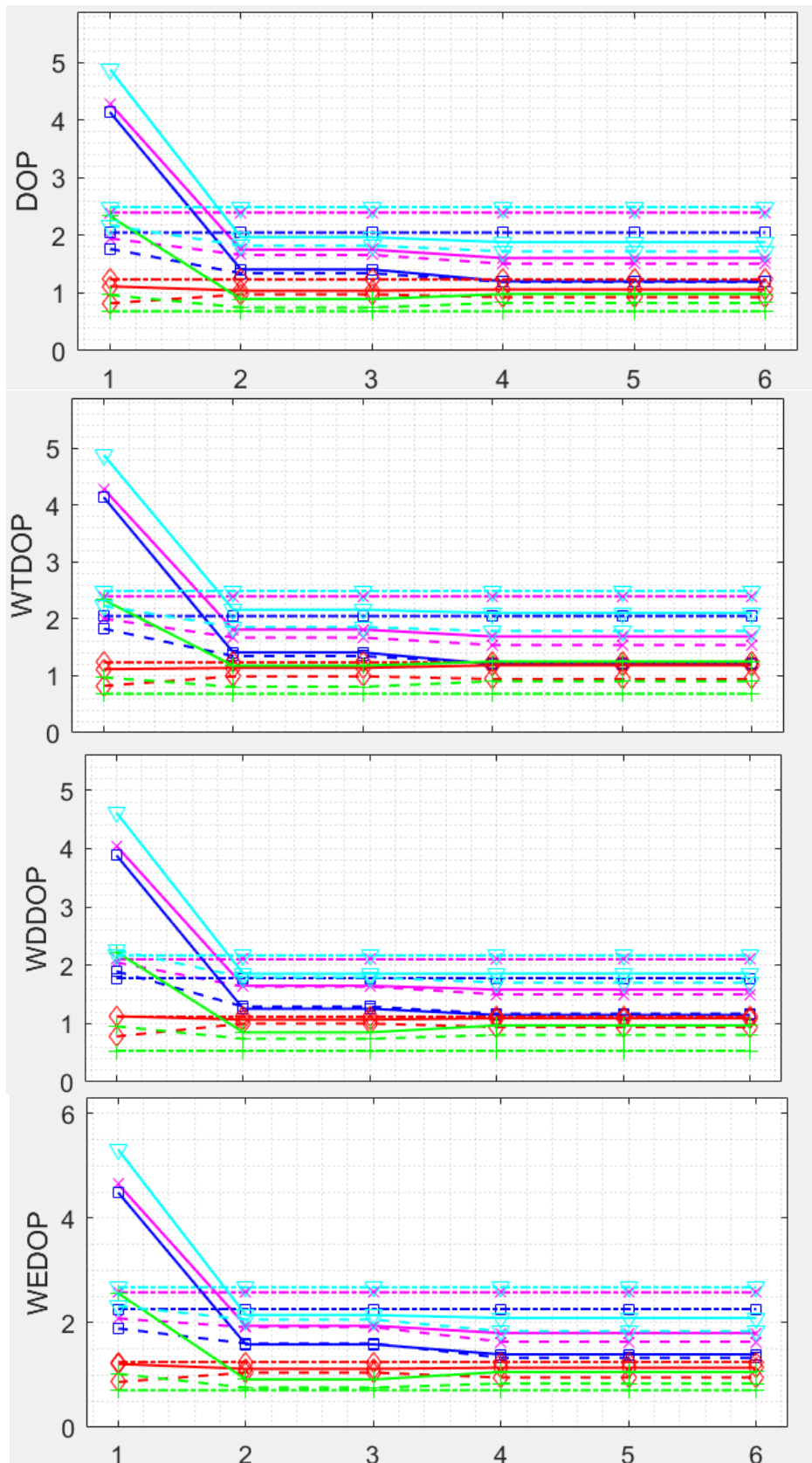


Ilustración 31 En movimiento - varios sistemas - ruta 2

Los resultados son coherentes con los análisis anteriores, también con una variabilidad mínima y donde se ve que el impacto de la primera radio-baliza de seguimiento (punto de referencia en la ruta) es la que más penaliza.

## 6 CONCLUSIONES

Las conclusiones sobre el análisis los observables y su impacto en las medidas de DOP se ha cubierto en la sección anterior. En esta se cubren las conclusiones del Trabajo de Fin de Máster como proyecto.

### 6.1 Alcance de los objetivos del proyecto

Se han cubierto los objetivos propuestos por el proyecto: se presenta una interfaz sencilla que permite al usuario seleccionar las posiciones de los transmisores, la presencia de distintas y las medidas de bases de tiempos de los transmisores y si los transmisores utilizan distancia o pseudodistancia.

La visualización propuesta permite analizar las variabilidades en la calidad de los observables. Además, se han añadido la propuesta de ampliar este análisis en base a criterios que afectan a la constelación como son elevación, distancia y diferencia de tiempos para intuir cómo afectan a los resultados finales.

Ha quedado sin cubrir la inclusión del sistema de cálculo por ángulo de llegadas para radiobalizas, si bien se ha cubierto la extensión del cálculo.

### 6.2 Cumplimiento real y trabajos futuros

Si se analiza la planificación, los objetivos básicos han quedado cubiertos y la deriva en tiempo es mínima. Las entregas intermedias se han realizado a tiempo y con las funcionalidades básicas cubiertas.

Como trabajos futuros, se propone:

- Finalizar el área de ángulo de llegada en incluirlo en rutinas y adaptar la interfaz en consecuencia.
- Adaptar las matrices ponderadas con pesos adaptados a la distribución específica de cada constelación permitiendo cálculos de WDOP específicos para cada constelación.
- Con respecto a la interfaz se presentan multitud de posibilidades:
  - o Modificar la interfaz para una presentación más clara.

- Presentar al usuario la capacidad de introducir los satélites.
- Mediante Matlab *RESTful web services* consultar los transmisores tipo satélite visibles en el área y presentárselos al usuario para escogerlos.

### 6.3 Lecciones aprendidas

En cuanto a qué se ha aprendido en base a gestión de proyectos, se nombran los siguientes puntos:

- Una buena estimación de riesgos es muy importante. Ha sido clave el considerar desde un principio que se partía una planificación ligeramente optimista y que se contaba con un solo recurso. En una planificación con un solo recurso los factores ajenos al proyecto tienen un impacto no salvable por un equipo y los problemas en avance por falta de conocimiento o comprensión suponen mayor bloqueo.
- Se ha detectado una necesidad de aumentar la comunicación en la fase inicial, la equivalente a la toma de requisitos, para no introducir retrasos en fases posteriores.
- El desarrollo incremental basado en MVP ha resultado ser una buena aproximación para poder presentar un entregable maduro y utilizable pero acotado en cuanto a funcionalidad.
- El tiempo invertido en la fase inicial de planificación en documentación permite presentar los entregables y adaptarlos con mayor facilidad en las fases finales.
- La fase de cierre requiere de un gran colchón de tiempo por tener que absorber el cierre de documentación, los trabajos pendientes, las mejoras y abordarse en momentos en los que el equipo de trabajo puede ver su rendimiento afectado.

## 7 GLOSARIO

- AOA: *Angle of Arrival*. Ángulo de llegada.
- Beacon: radio-baliza.
- BDS: *BeiDou Navigation Satellite System*.
- BDT: Tiempo BeiDou.
- CHA: *Channel of Standard Accuracy*. En Glonass, otro modo de conocer a la señal SP (*standard precision*).
- CS/CDDS: *Commercial Service. Commercial Data Distribution Service*. En Galileo, el servicio comercial.
- CSA: *Channel of High Accuracy*. En Glonass, otro modo de referirse a la señal HP (*high precision*).
- DoD: *Department of Defense*. Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
- DOP: *Dilution of Precision*. Atenuación de la precisión.
- EDOP: *Elevation DOP*. Atenuación en la elevación.
- EGNOS *European Geostationary Navigation Overlay Service*; Servicio Europeo de navegación de cobertura geoestacionaria.
- ESA: *European Space Agency*. Agencia Espacial Europea.
- GBAS: *Ground-Based Augmentation Systems*.
- GLONASST: *GLONASS Time*. Tiempo GLONASS.
- GNSS: *Global Navigation Satellite System*. Sistema Global de Navegación por satélite.
- GUI: *Graphic User Interface*. Interfaz gráfica de usuario.
- GPS: *Global Positioning System*. Sistema de posicionamiento global.
- GPST: *GPS Time*. Tiempo GPS.

- HDOP: DOP Horizontal.
- HEO: *Highly Elliptical Orbit*. Órbita satelital muy excéntrica (elíptica).
- HP: *High precision*.
- IRNSS: Indian Regional Navigation Satellite System. Sistema regional de geoposicionamiento por satélite para la India.
- ITU-R: la Unión Internacional de Telecomunicaciones, sector de Radiocomunicaciones.
- MATLAB: Matrix Laboratory.
- MEO: *Medium Earth Orbit*. Órbita media terrestre, en torno a los 10000 km.
- MSAS: *Multi-functional Satellite Augmentation System*. Sistema de aumentación por satélite operativo en Asia.
- MVP: *Minimum Viable Product*. Producto mínimo viable.
- NAVIC: *Navigation Indian Constellation*. Sistema de cobertura regional de la India, anteriormente conocido como IRNSS.
- OS: *Open Service*. En Galileo, la señal de servicio abierto.
- PEC: Prueba de Evaluación Continuada.
- PPS: *Precise Positioning Service*. En GPS, el servicio de mayor calidad y nivel de servicio.
- PRN: *Pseudorandom Noise Number*. Identificador de los códigos que utiliza un satélite GPS.
- QZSS: *Quasi-Zenith Satellite System*.
- RSS: *Received Signal Strength*.
- SA: *Selective Availability*. Una de las características de servicio de GPS.
- SBAS: *Satellite-Based Augmentation System*. Sistema de aumentación basado en satélites.
- SoL: *Safety-of-Life*. En Galileo, el servicio para aplicaciones críticas.

- *SP: Standard Precision.*
- *SPS: Standard Positioning Service.* En GPS, el servicio estándar en cuanto a calidad y nivel de servicio.
- *SVN: Space Vehicle Number.* Identificador único de cada satélite GPS.
- *TAI: Tiempo Atómico Internacional.*
- *TDOA: Time Difference of Arrival.*
- *TDOP: Time DOP.* DOP temporal.
- *USERE: User Equivalent Range Error.* Error equivalente a la distancia del usuario.
- *URSS: Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.*
- *UTC: Tiempo universal coordinado.*
- *WAAS: Wide Area Augmentation System.* Sistema de Aumentación Basado en Satélites.
- *WDOP: Weighted DOP.* DOP calculado en base a unos valores bonificados o penalizados.
- *WEDOP: Weighted Elevation DOP.* Cálculo de DOP en base a comparación de elevaciones.
- *WMS: WAAS Master Station.*
- *WRS: Wide-area Reference Station.* En el Sistema WAAS, estaciones de referencia para grandes áreas.
- *WTDOP: Weighted Time DOP.* Cálculo de DOP en base a comparación de tiempos.
- *XDOP: Indica cualquiera de los parámetros DOP: GDOP, HDOP, TDOP, VDOP, PDOP.*

## 8 BIBLIOGRAFÍA

### Referencias

- [1] Project Management Institute, «PMBOK Guide: A Guide to the Project Management Body of Knowledge, 2013,» 2013.
- [2] K. BECK, M. BEEDLE y A. VAN BENNEKUM, *The Agile Manifesto*, 2001.
- [3] «Agencia Tributaria,» [En línea]. Disponible en: <http://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/ Segmentos /Empresas y profesionales/Empresas/Impuesto sobre Sociedades/Periodos impositivos a partir de 1 1 2015/Base imponible/Amortizacion/Tabla de coeficientes de amortizacion lineal .shtml>. [Último acceso: 3 1 2018].
- [4] «ITU.int,» [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/en/ITU-R/information/Pages/default.aspx>. [Último acceso: 02 01 2018].
- [5] P. JACOBOWITZ, «Qualcomm-OnQ Blog,» 15 diciembre 2011. [En línea]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2011/12/15/gps-and-glonass-dual-core-location-your-phone>. [Último acceso: 28 diciembre 2017].
- [6] ESA, «Use Galileo,» [En línea]. Disponible en: <http://www.usegalileo.eu/EN/inner.html#data=smartphone>. [Último acceso: 30 12 2017].
- [7] C. HENRY, *Space News:Japan mulls seven-satellite QZSS system as a GPS backup*. 15 05 2017.
- [8] «ESA,» [En línea]. Disponible en: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_s\\_clocks](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks). [Último acceso: 12 2017].
- [9] DOD USA, «GPS.gov,» 2008. [En línea]. Disponible en: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>. [Último acceso: 26 12 2017].
- [10] «LeapSecond.com,» [En línea]. Disponible en: <http://leapsecond.com/java/gpsclock.htm>. [Último acceso: 9 11 2017].
- [11] L.-S. JA, J. LOPEZ VICARIO y G. SECO GRANADOS. *Módulo 4: El sistema GPS*. FUOC. Fundació para la Universitat Oberta de Catalunya..
- [12] «EGNOS,» [En línea]. Disponible en: <https://www.egnos-portal.eu/discover-egnos/about-egnos/what-sbas>. [Último acceso: 25 12 2017].
- [13] L. MAZUREK. *Localization in Wireless Sensor Networks. Part 2: Localization Techniques*. Oslo, 2011.



- [14] «Matlab,» [En línea]. Disponible en:  
<https://es.mathworks.com/products/matlab.html>. [Último acceso: 20 12 2017].
- [15] «GUI de Matlab,» [En línea]. Disponible en:  
<https://es.mathworks.com/discovery/matlab-gui.html>. [Último acceso: 20 12 2017].
- [16] Y. WANG y K. HO. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, nº 12: «An Asymptotically Efficient Estimator in Closed-Form for 3-D AOA Localization Using a Sensor Network» 12 2015.
- [17] A. ARAFA, S. DAMINYA, R. KLUKAS y J. HOLZMAN. *Opt. Express* 23, pp. 7775-7776: «Angle-of-arrival reception for optical wireless location technology». 2015.

### Otra bibliografía

- A. DEMPSTER, *Electronics Letters*, vol. 42, nº 5, pp. 291-292:«Dilution of precision in angle-of-arrival positioning systems,» 2 Marzo 2006
- DOD USA, *Release No: 1126-07*, 2017. [En línea]. Disponible en:  
<https://www.gps.gov/technical/ps/2007-PPS-performance-standard.pdf>.
- B. EISFELLET y G. AMERES, «Performance of GPS, GLONASS and Galileo,» de *Photogrammetric Week '07*, Munich, 2007.
- «ESA Navipedia,» [En línea]. Disponible en:  
[http://www.navipedia.net/index.php/Time\\_References\\_in\\_GNSS](http://www.navipedia.net/index.php/Time_References_in_GNSS). [Último acceso: 11 2017].
- HUANG, YAO, CUI y LU, «Angle-of-Arrival Assisted GNSS Collaborative Positioning,» *Sensors*, nº 16(6):918, 2016.
- «Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, Korolyov, Russia,» [En línea]. Disponible en: <https://www.glonass-iac.ru/en/guide/>. [Último acceso: 12 2017].
- R. THOMPSON, *Mathematics Magazine*, nº 71(4), pp. 260-269: «Global Positioning System: The Mathematics of GPS Receivers,», 1998.
- J.M TORRES. José Miguel Torres: *¿Cuán precisa es la señal de nuestros receptores GPS?* [En línea]. Disponible en:  
<http://josemigueltorres.net/?p=132> [Último acceso: 28 01 2018].
- I. VANSCHOENBEEK, B. BONHOURE, M. BOSCHETTI y M. LEGENNE, «Effects on GPS-Galileo Interoperability Performance,» *InsideGNSS*, pp. 60-70, Sept/Oct 2007
- Wikipedia: *Dilution of precision (navigation)* [En línea]. Disponible en:  
[https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dilution\\_of\\_precision\\_\(navigation\)](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dilution_of_precision_(navigation))

[on\)&oldid=821928935#Meaning\\_of\\_DOP\\_Values](#) . [Último acceso: 28 01 2018].

## 9 ANEXOS

### 9.1 Anexo 1: Guía de uso de la aplicación final

Este documento indica los pasos para lanzar y utilizar la aplicación *DOP representation*:

#### *Entorno de desarrollo*

Las características de la versión de Matlab y de las librerías que incluye se muestran en la siguiente tabla:

MATLAB Version: 9.2.0.556344 (R2017a)		
Operating System: Microsoft Windows 10 Home Version 10.0 (Build 16299)		
Java Version: Java 1.7.0_60-b19 with Oracle Corporation Java HotSpot(TM) 64-Bit Server VM mixed mode		
MATLAB	Version 9.2	(R2017a)
Simulink	Version 8.9	(R2017a)
Bioinformatics Toolbox	Version 6.4	(R2017a)
Communications System Toolbox	Version 4.8	(R2017a)
Control System Toolbox	Version 10.2	(R2017a)
Curve Fitting Toolbox	Version 3.5.5	(R2017a)
DSP System Toolbox	Version 9.4	(R2017a)
Data Acquisition Toolbox	Version 3.11	(R2017a)
Image Processing Toolbox	Version 10.0	(R2017a)
Instrument Control Toolbox	Version 3.11	(R2017a)
Mapping Toolbox	Version 4.5	(R2017a)
Optimization Toolbox	Version 7.6	(R2017a)
Parallel Computing Toolbox	Version 6.10	(R2017a)
Partial Differential Equation Toolbox	Version 2.4	(R2017a)
Signal Processing Toolbox	Version 7.4	(R2017a)
Simscape	Version 4.2	(R2017a)
Simscape Multibody	Version 5.0	(R2017a)
Simulink Control Design	Version 4.5	(R2017a)
Stateflow	Version 8.9	(R2017a)
Statistics and Machine Learning Toolbox	Version 11.1	(R2017a)
Symbolic Math Toolbox	Version 7.2	(R2017a)

*Figura 32 Matlab - librerías y versión*

## Pasos

1. Asegúrese de que todos los ficheros de la aplicación se encuentran en el mismo directorio.

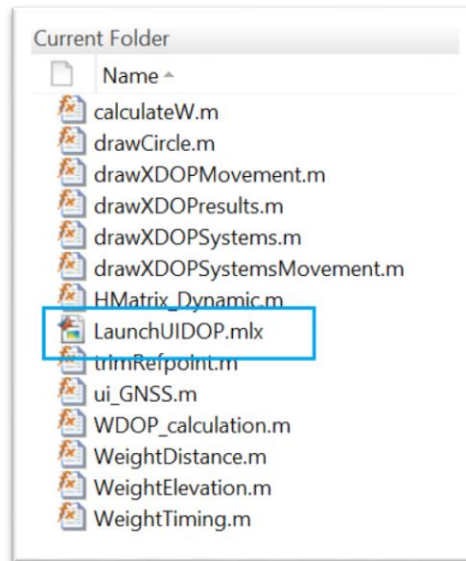


Figura 33 Directorio ficheros aplicación

2. A continuación, abra la aplicación Matlab, posicione en el directorio dónde se haya guardado el proyecto y lance script LaunchUIDOP.mxl mediante el botón derecho del ratón o el menú LIVE EDITOR.

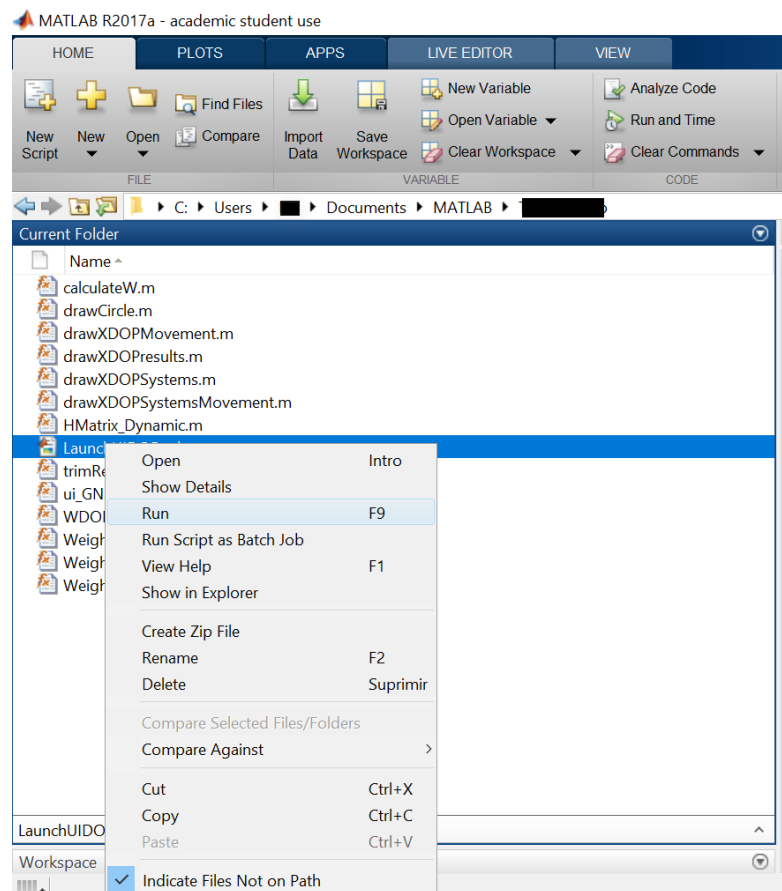


Figura 34 Lanzar Script

Esta acción abre la aplicación DOP representation y muestra su pantalla inicial, que presenta cuatro opciones según lo que se quiera estudiar:

- *DOP static*, que permite, dados unos transmisores, estudiar valores de PDOP, HDOP, VDOP, TDOP o GDOP con o sin ponderación para una combinación de sistemas escogidos por el usuario.
- *DOP route*, que es una representación del impacto en los parámetros DOP con y sin ponderar que supone el desplazamiento sobre un receptor a lo largo de una ruta predefinida en los valores
- *Systems static*, permite crear y comparar tres constelaciones de transmisores y analizar los valores de PDOP, HDOP, VDOP, TDOP o GDOP con y sin ponderar.
- *Systems movement*, para una opción escogida (con o sin ponderar), permite crear y comparar tres constelaciones de transmisores y analizar por separado los valores de PDOP, HDOP, VDOP, TDOP o GDOP.

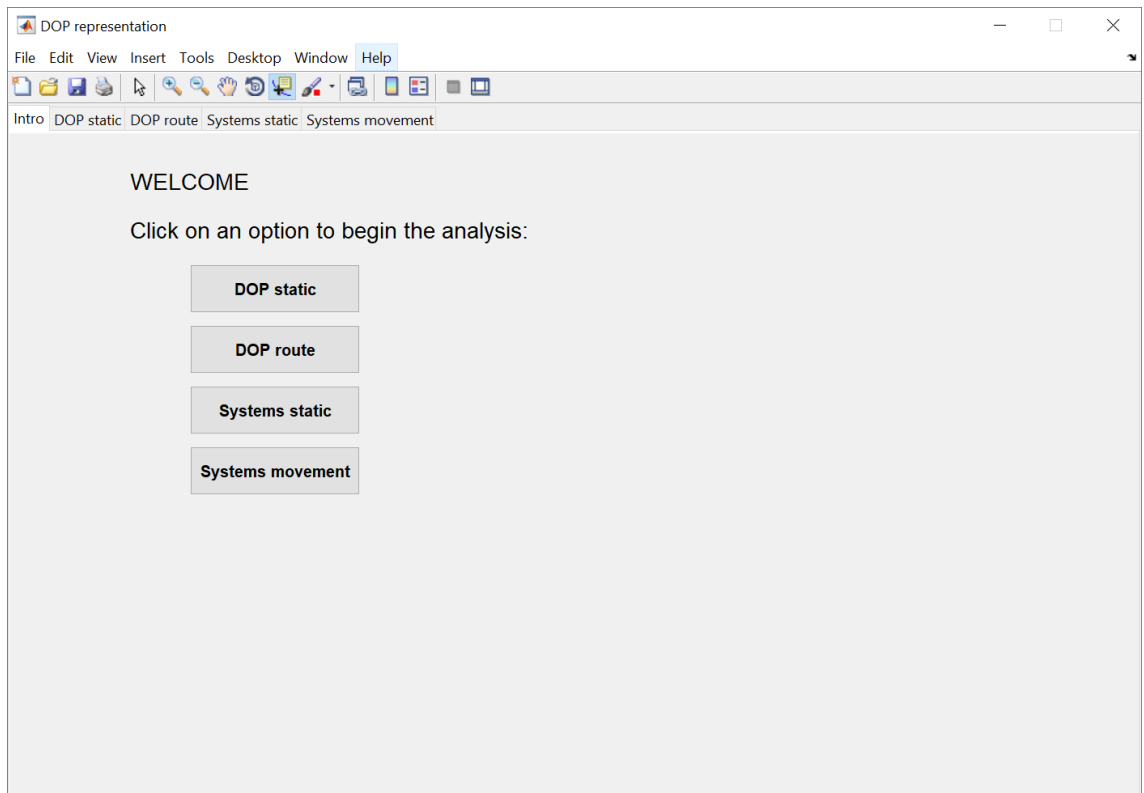


Figura 35 Ventana inicial de la aplicación

Los botones disponen de una pequeña descripción de las secciones a las que redirigen cuando se desplaza el ratón sobre ellos.

3. En la ventana principal seleccionada, clicar sobre una opción.

En este punto es posible ir directamente a alguna de las secciones accediendo a las pestañas de la aplicación.

Se describen paso a paso cada una de las funcionalidades correspondientes a botones de la pantalla inicial, por el mismo orden.

*Pantalla 1: Botón DOP static*

La primera pantalla presenta una tabla que lista una serie de coordenadas que representan a transmisores de geoposicionamiento (satélites o radiobalizas). Los valores están obtenidos de ejemplos reales.

En esta tabla es posible seleccionar algún valor para todas las columnas, pero los transmisores no pueden pertenecer a dos columnas.

Al seleccionar una columna y una fila, al transmisor escogido se le asigna un sistema de *offsets* o de tiempos. De este modo se pueden comparar hasta tres (T1, T2 o T3) sistemas con *offsets* distintos. *Beacon offset* también emula a un sistema transmisor de tiempo y puede seleccionarse igual que las columnas T, pero se ha nombrado distinto para recalcar la simulación de sistemas de apoyo basados en radio-balizas (*beacons*) de pseudodistancia.

*Beacon no time* es la columna para seleccionar y emular los transmisores de distancia (sin pseudodistancia).

En la gráfica, los puntos verdes representan la posición de los transmisores seleccionados y el punto rojo indica la posición del punto de referencia a utilizar en el proceso de linealización.

Para comenzar a utilizar la aplicación:

1. Seleccione varios transmisores. El valor mínimo permitido es 4, pero para el caso de varias constelaciones es recomendable partir de 5 para dos constelaciones y 6 para más.
2. Seleccione un punto de referencia para linealización.

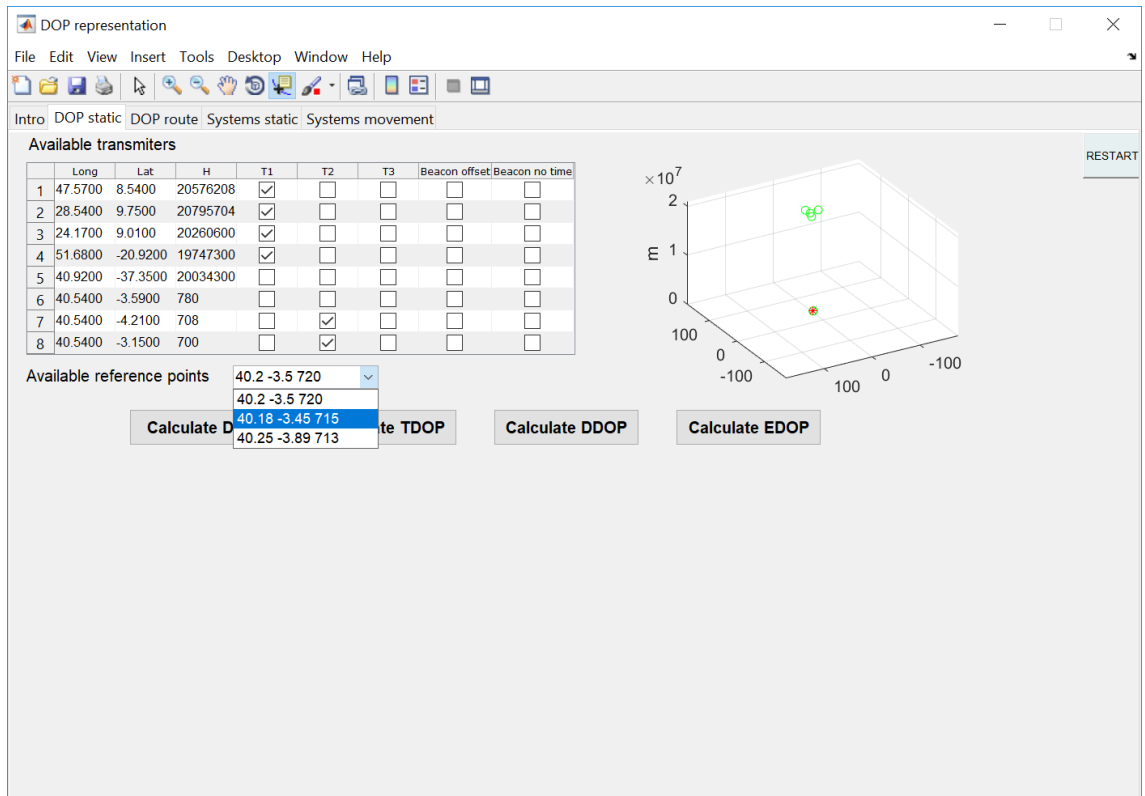


Figura 36 DOP static: configuración

3. Pulse sobre el botón del valor que quiera estudiar. Es posible visualizar todos los valores a la vez.

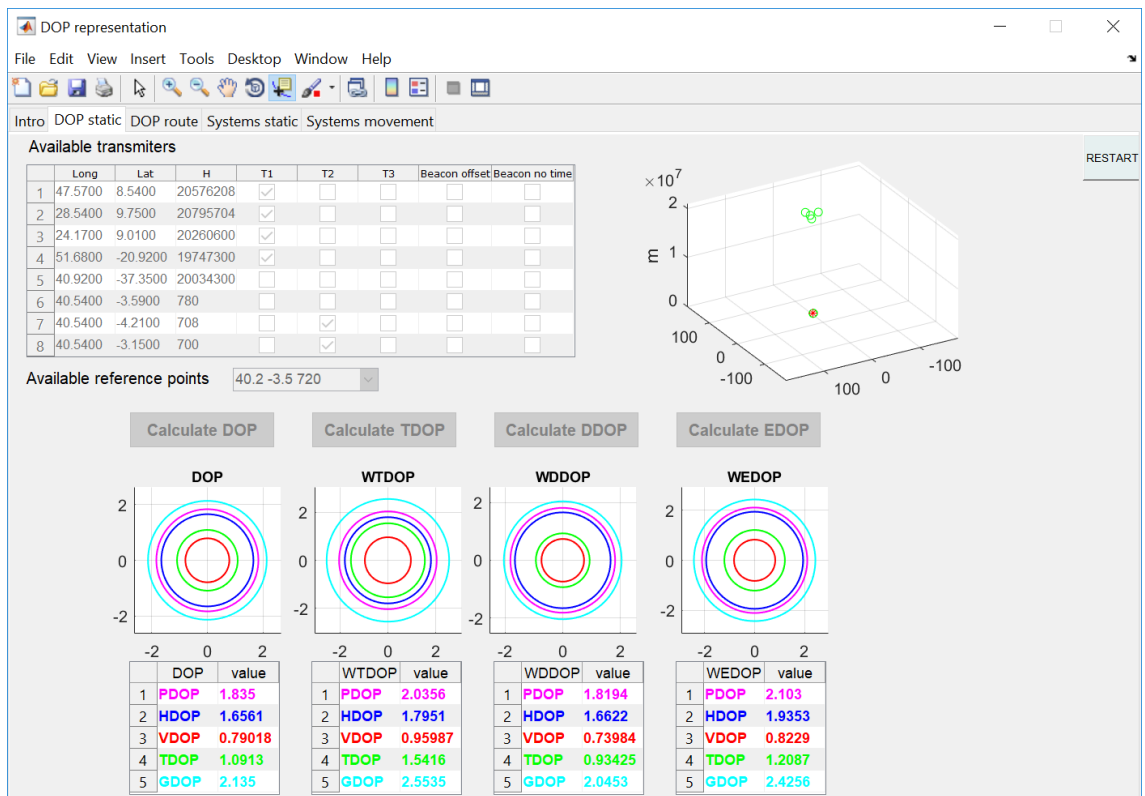


Figura 37 DOP static: visualización

- Si quiere reiniciar la aplicación, pulse sobre el botón RESTART arriba a la derecha. También puede desplazarse por las pestañas o volver a la pestaña principal (Intro).

### Pantalla 2: Botón DOP route

- Acceda a esta sección bien clicando desde el botón *DOP route* en la ventana principal, bien desde la misma pestaña.
- En esta pestaña no hay interacción posible. Simplemente se representa el impacto del desplazamiento del receptor sobre una ruta predefinida en una constelación de un solo sistema.

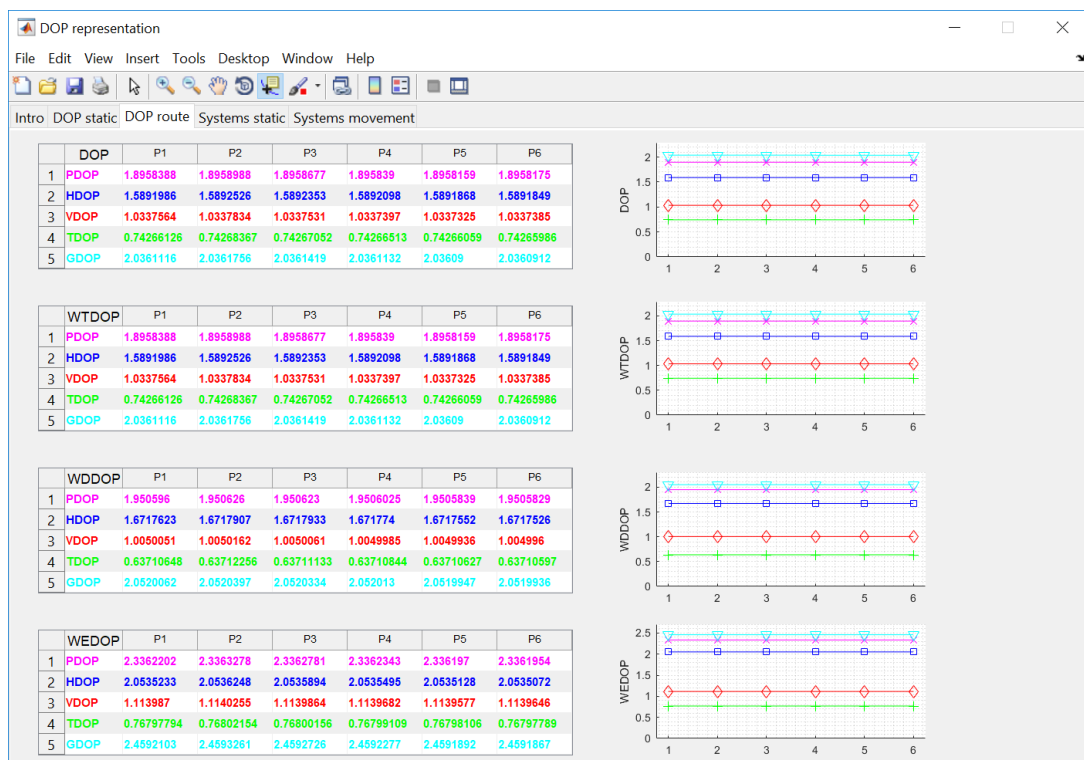


Figura 38 DOP route

- Es posible consultar los puntos de la ruta mediante el *tooltip* disponible en las tablas.

### Pantalla 3: Botón Systems static

Esta sección permite analizar el impacto de distintos sistemas temporales (constelaciones) sobre los valores de calidad de precisión de la señal recibida.



1. Como en la Pantalla 1, y con las mismas limitaciones, seleccione los transmisores que desea analizar para las tres constelaciones.
2. Escoja un punto de referencia.

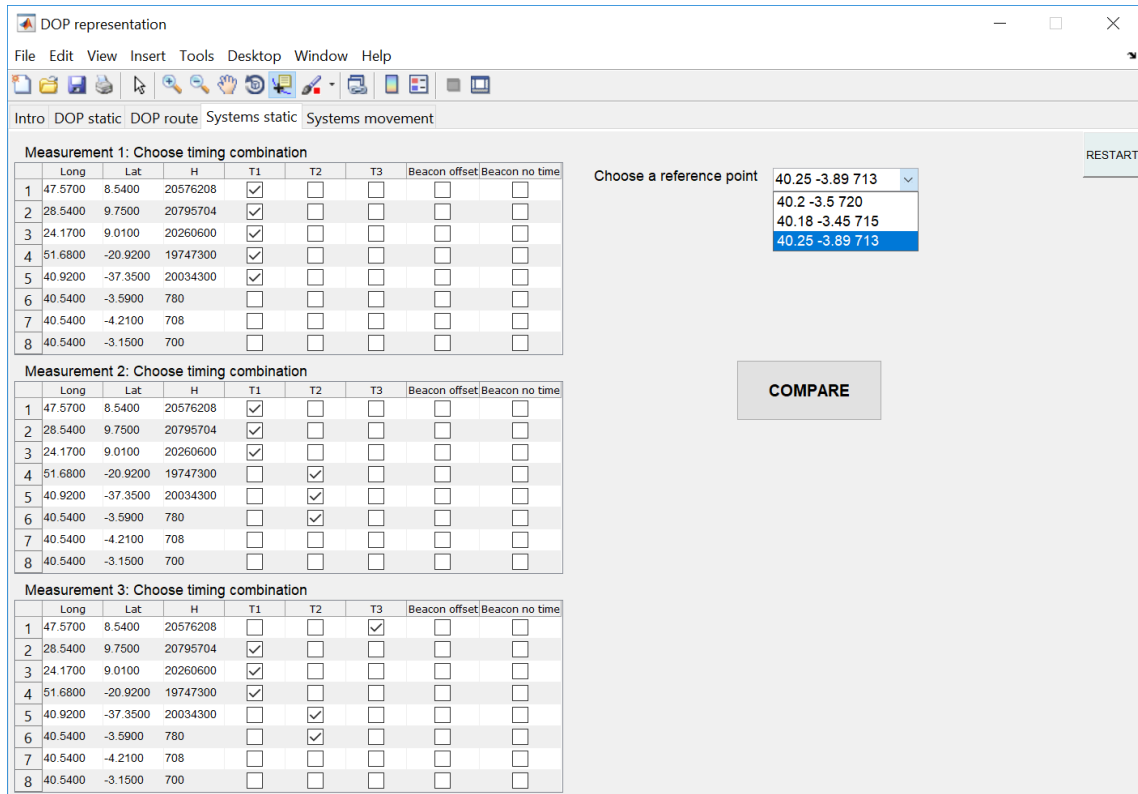


Figura 39 System static: configuración

3. Pulse el botón COMPARE.

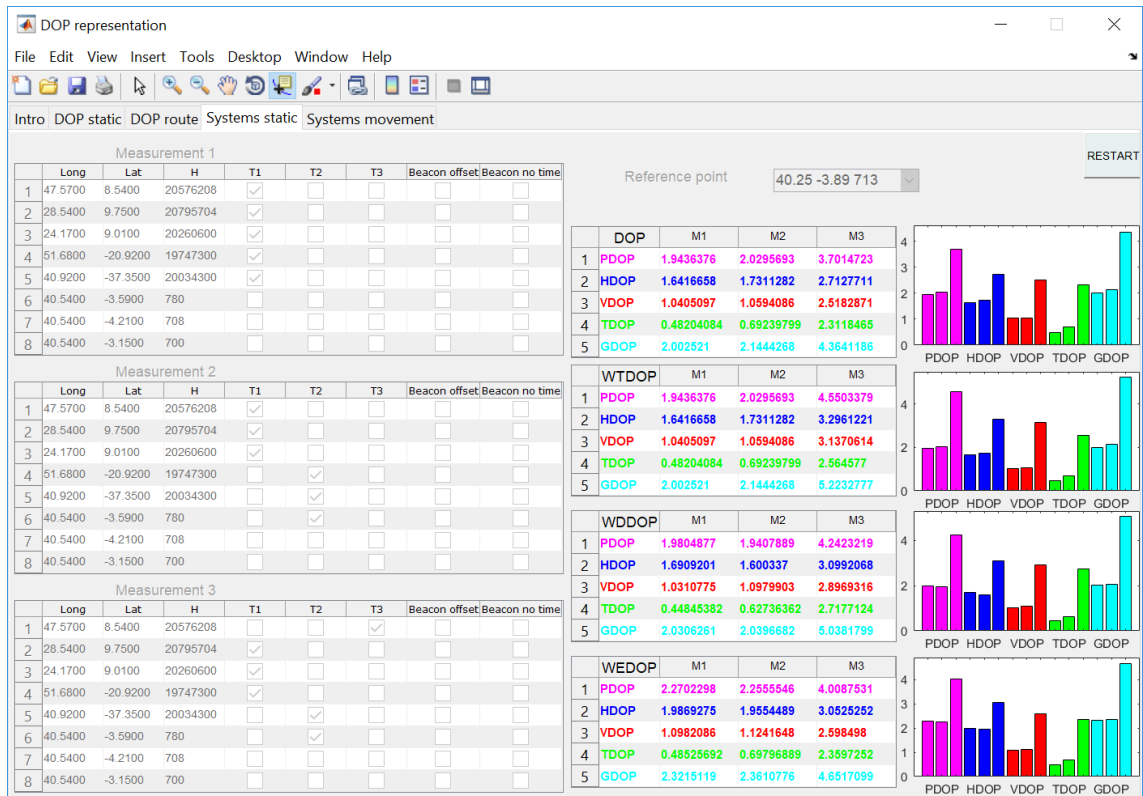


Figura 40 System static: representación

- Mediante diagrama de barras se pueden comparar los valores de calidad de precisión de la señal para cada una de las constelaciones creadas.

*Pantalla 4: Botón System movement*

- Para la ruta de la Pantalla 2, es posible estudiar el impacto que tiene el movimiento según las constelaciones disponibles. Para ello, siguiendo los pasos del caso 3, se seleccionan tres constelaciones.

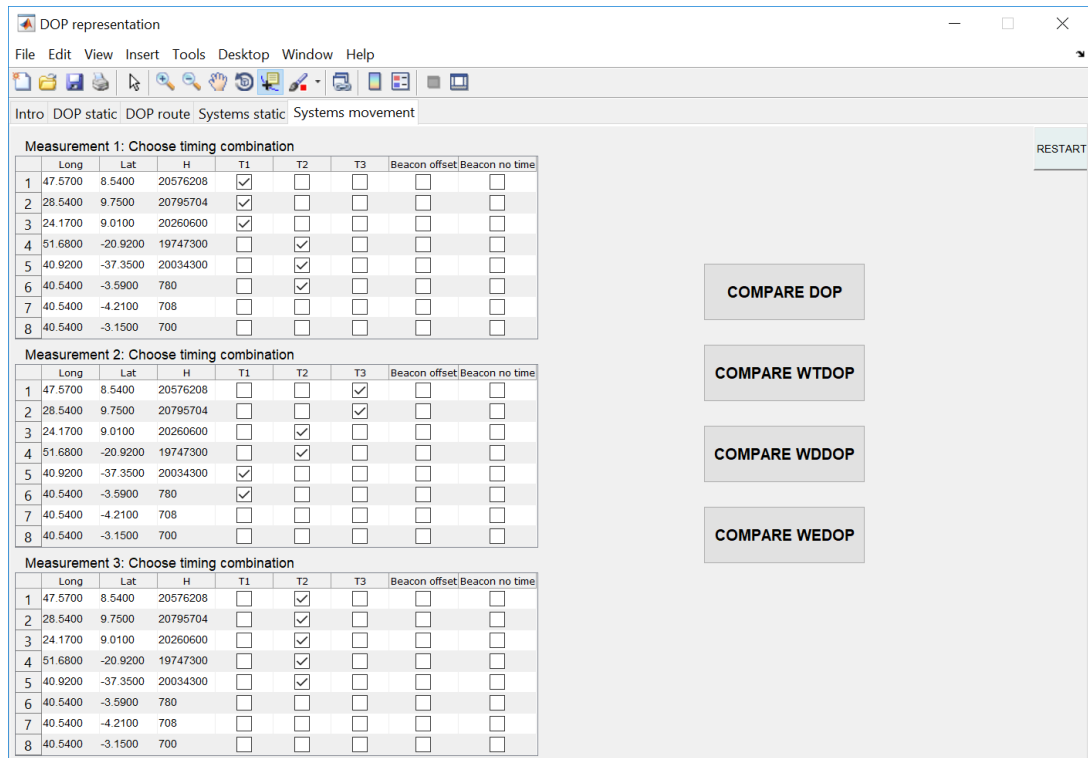


Figura 41 Systems movement: configuración

2. A continuación, si quiere introducir algún tipo de ponderación en el análisis, seleccione el botón correspondiente. Si no, pulse COMPARE DOP.

Se muestra el ejemplo para WTDOP.

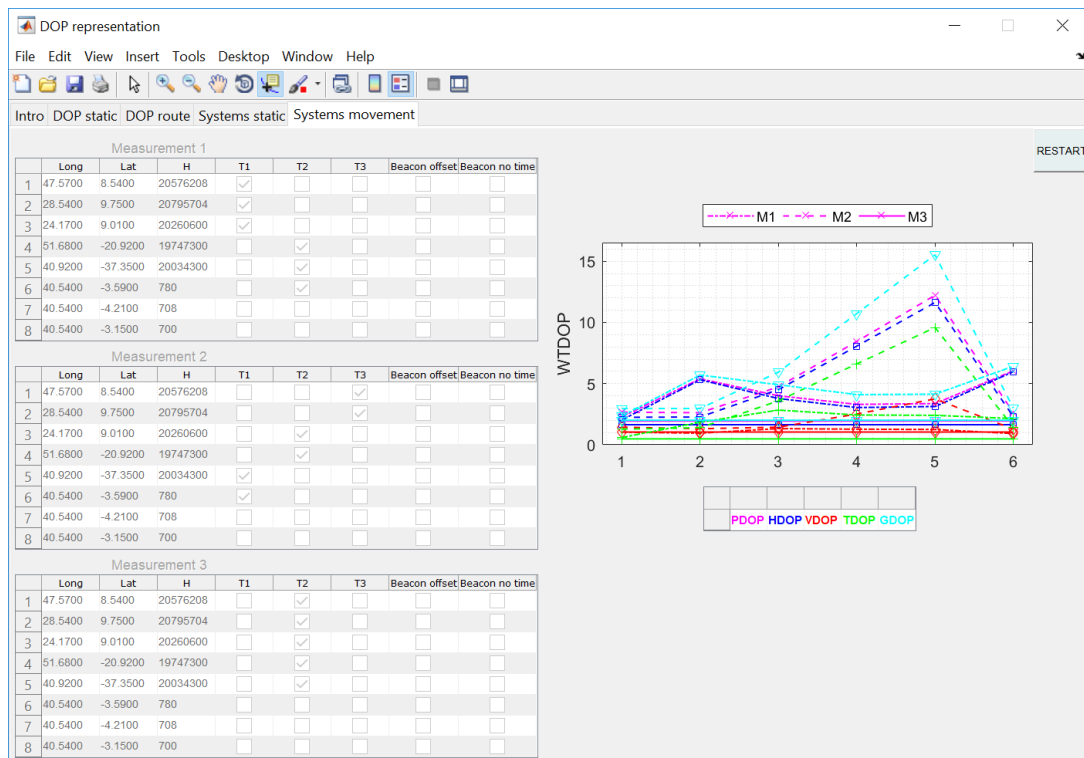


Figura 42 Systems movement - representación