



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN.**

## **GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS Y SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN**

### **ÁREA DE TEORÍA DE LA SEÑAL Y COMUNICACIONES**

#### **EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN BASADAS EN REDES DE TELEFONÍA MÓVIL EMPLEANDO PARÁMETROS DE LA CAPA FÍSICA**

**D. RUIZ VEGA, Alejandro**  
**TUTOR: D. ÁLVAREZ LÓPEZ, Yuri**

**FECHA: JUNIO 2023**

# Resumen

En los últimos años, la tecnología móvil ha experimentado una evolución extraordinaria en comparación con otras tecnologías. Desde las primeras generaciones hasta la actual, la mejora ha sido constante, en términos de conectividad, ancho de banda disponible, funcionalidades soportadas, etc.

También ha experimentado una gran evolución las tecnologías de radiolocalización, ya sean las de interiores o exteriores. Estas funcionan mediante ondas de radiofrecuencia, y se basan en diferentes frecuencias y métodos en función de las condiciones del escenario, precisión requerida, y/o número de dispositivos a localizar.

La fusión de ambas tecnologías surge de la necesidad de localizar dispositivos conectados a la red móvil, para poder enrutar las llamadas y datos entre la red móvil y los usuarios. Para ello se utilizan diferentes parámetros, algunos de los cuales se encuentran en la capa física. Una de las ventajas de los sistemas de localización basados en redes móviles es que, si bien son menos precisos que otros (ej. sistemas de navegación global por satélite), estos pueden operar tanto en entornos interiores como exteriores.

A partir de la disponibilidad de parámetros de capa física de la red móvil medidos en un teléfono móvil convencional, en este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se presenta una metodología para geolocalizar un dispositivo móvil. Para ello se parte de los siguientes datos: la información de la antena a la que está conectado, el nivel de potencia de la señal que recibe y el retardo de propagación de la señal.

En este TFG se analizarán diferentes escenarios, teniendo también en cuenta la influencia del área geográfica donde está el dispositivo móvil y de la velocidad a la que se mueve el mismo. En función del escenario, se determinará el modelo de propagación adecuado para aplicarlo a uno de los métodos de localización propuestos.

# Abstract

In recent years, mobile technology has undergone a extraordinary evolution compared to other technologies. Since the first mobile generations until now, the improvement has been constant, with new methodologies, in terms of connectivity, available bandwidth, supported functionalities, etc...

Radiolocation technologies also have experienced it, wheter indoors or outdoors. These work through radiofrequency waves, and they are based on different frequencies and methods depending on the environment, required accuration, or devices to locate.

The fusion of both technologies arises from the need of locate devices connected to the mobile network, to be able to route calls and data between the mobile network and the users. Different parameters are used to do it, which some of them are in the physical layer. One advantage of the location systems based on mobile networks is that, although they are les accurate tan others (e.g. global navigation satellite systems), these can operate in both indoor and outdoor environments.

From the availability of the mobile network physical layer parameters measured in a common mobile device, in this Bachelor's Thesis (BT) a methodology to locate a mobile device is presented. This methodology needs the following information: the information of the cell tower to which the device is connected, the received signal power level and the signal propagation delay.

In this BT different environments will be analyzed, also taking into account the influence of the geographical area where the mobile device is located and the speed at which it moves. Depending on the environment, the most suitable propagation model will be used with one of the proposed location methods.

# Índice General

Resumen .....	1
Abstract .....	2
Índice General .....	3
Índice de Figuras .....	6
Índice de Tablas .....	11
Índice de Ecuaciones .....	14
1. Introducción. ....	15
1.1.- Importancia de la localización en redes móviles.....	15
1.2.- Estado de la técnica. ....	17
1.3.- Motivación del TFG. ....	21
1.4.- Objetivos del TFG. ....	28
2. Redes móviles y técnicas de localización. ....	31
2.1.- Descripción de las capas inferiores de la tecnología móvil 4G.....	31
2.1.1.- Parámetros de potencia de la red. ....	35
2.1.2.- Parámetros de identificación de la red. ....	37
2.2.- Técnicas de localización en redes 4G.....	42
2.2.1.- CGI-TA (Cell Global Identity – Timing Advance) .....	42
2.2.2.- TOA (Time Of Arrival) .....	46
2.2.3.- TDOA (Time Difference Of Arrival) .....	48

2.2.4.- AOA (Angle Of Arrival).....	50
2.3.- Aplicaciones móviles empleadas para acceder a los parámetros de la capa física.....	51
2.3.1.- GNet Track.....	51
2.3.2.- CellMapper. ....	53
3. Métodos implementados. ....	55
3.1.- Consideraciones generales.....	55
3.2.- Generación de una base de datos con las coordenadas de las celdas y de las antenas.....	56
3.2.1.- Importación de la base de datos de <i>OpenCellId</i> .....	58
3.2.2.- Depuración de la base de datos con la información de <i>CellMapper</i> .....	63
3.3.- Implementación de otras BBDD empleadas en el presente TFG.....	65
3.4.- Método basado en el cambio de estación base .....	69
3.5.- Método basado en trilateración a partir del nivel de RSRP de antenas vecinas.....	70
3.6.- Mejora de los métodos de localización.....	72
3.6.1.- Regresión lineal del RSRP.....	77
3.6.2.- Regresión polinómica general del RSRP.....	78
3.6.3.- Mejoras de la regresión polinómica general del RSRP. ....	81
3.6.4.- Regresión polinómica del RSRP, distinguiendo si el UE se acerca/aleja del eNB.....	89
4. Resultados obtenidos.....	96
4.1.- Combinación de todos los ficheros de medidas. ....	96
4.2.- Análisis de un escenario mixto en un vehículo. ....	108

4.3.- Análisis de un escenario caminando.....	116
4.4.- Análisis de un escenario urbano. ....	118
4.5.- Análisis de un escenario rural.....	127
4.6.- Cálculo de la localización del dispositivo móvil con los métodos desarrollados .....	135
5. Conclusiones. ....	142
6. Bibliografía.....	147
7. Anexos.....	150
7.1.- Desarrollo de las expresiones para el Tiempo de Llegada, <i>TOA</i> .....	150
7.2.- Desarrollo de las expresiones para la Diferencia del Tiempo de Llegada, <i>TDOA</i> . ....	151
7.3.- Desarrollo de las expresiones para el Ángulo de Llegada, <i>AOA</i> .....	152

# Índice de Figuras

Figura 1.1.- Esquema del método Node-B-Cell ID-Timing Advance.....	17
Figura 1.2.- Representación teórica del método para calcular la ubicación de la antena a partir del TA.....	22
Figura 1.3.- Representación práctica del método que calcula la ubicación de la antena a partir del TA.....	23
Figura 1.4.- Representación de la ubicación de las antenas buscadas con el método. ....	23
Figura 1.5.- Representación del RSRP medido en función de la distancia a la estación base, de las pérdidas teóricas de propagación, considerando el efecto suelo y el espacio libre, con ajuste de mínimos cuadrados a las mediciones. ....	26
Figura 1.6.- División de la red de telefonía móvil en diferentes unidades y elementos.....	28
Figura 1.7.- Comparación de la variación del RSRP y del TA en función de la distancia del enlace. ....	30
Figura 2.1.- Comunicación entre el UE y el eNodeB.....	32
Figura 2.2.- Estructura de un bloque de recursos. ....	34
Figura 2.3.- Señales de referencia en 2 bloques de recursos (azul y rojo). ....	35
Figura 2.4.- Cálculo del PCI a partir de la PSS y la SSS. ....	38
Figura 2.5.- Esquema de la combinación de los parámetros que identifican un terminal. ..	40
Figura 2.6.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal (1)....	40
Figura 2.7.- Comparación en la recepción de una trama aplicando el método del TA.....	45
Figura 2.8.- Ilustración del método CGI-TA. ....	45
Figura 2.9.- Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método TOA. ....	46
Figura 2.10.- Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método TDOA. ....	48
Figura 2.11.- Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método AOA.....	50
Figura 2.12.- Algunas aplicaciones para monitorización y medida de parámetros de la red de telefonía móvil y redes inalámbricas. ....	51
Figura 2.13.- Capturas de pantalla de la aplicación <i>GNet Track</i> . ....	52

Figura 2.14.- Fichero con los <i>logs</i> realizados por la aplicación <i>GNet Track</i> .....	52
Figura 2.15.- Ventana 'Vecinos' o 'Nei (Neighbors)' .....	53
Figura 2.16.- Capturas de pantalla de la aplicación Cell Mapper.....	54
Figura 3.1.- Captura de pantalla de la web <i>OpenCellId</i> . ....	59
Figura 3.2.- Mapa de la web <i>AntenasGSM</i> . ....	60
Figura 3.3.- Captura de pantalla de la web del Ministerio. ....	60
Figura 3.4.- Representación ideal de las celdas para la asignación del eNB al UE. ....	62
Figura 3.5.- Representación realista de las celdas para la asignación del eNB al UE.....	62
Figura 3.6.- Información que ofrece CellMapper sobre las áreas de las celdas de un eNB.63	
Figura 3.7.- Representación del método desarrollado para la construcción de la BBDD de eNBs. ....	65
Figura 3.8.- Extracto de la Tabla de <i>MatLab</i> Datos – Sólo parámetros de <i>GNetTrack</i> . ....	66
Figura 3.9.- Extracto de la Tabla de <i>MatLab</i> Datos – Completa. ....	67
Figura 3.10.- Representación gráfica de la referenciación de un <i>log</i> con su celda. ....	67
Figura 3.11.- Representación gráfica de la referenciación de un <i>log</i> con su eNB.....	68
Figura 3.12.- Extracto de la BBDD con los parámetros de cada celda de cada eNB.....	68
Figura 3.13.- Representación gráfica del método de geolocalización en un handover. ....	70
Figura 3.14.- Representación gráfica del método basado en trilateración a partir del nivel del RSRP de las antenas vecinas. ....	72
Figura 3.15.- Gráfico de barras que representa el número de <i>logs</i> de cada celda o eNB... 74	
Figura 3.16.- Comparativa del comportamiento del ajuste de regresión del RSRP, lineal y polinómico, entre los <i>logs</i> pertenecientes a la celda o al eNB. ....	75
Figura 3.17.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión lineal del RSRP. ....	78
Figura 3.18.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con el TA unidad como discriminante. ....	80
Figura 3.19.- Histograma del cociente entre la distancia real y el valor del TA del <i>log</i> . TA del primer <i>log</i> (de cuando el UE calcula el TA para la sincronización entre el eNB y el UE). ....	82

Figura 3.20.- Extracto de la BBDD ‘Proporciones Distancia TA’, en donde se recopila para cada celda el valor del cociente medio, mediano, y la proporción específica para cada TA. .....	84
Figura 3.21.- Comparativa de las mejoras en el TA respecto al método del valor TA Unidad. ....	85
Figura 3.22.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Media del TA como discriminante. ....	86
Figura 3.23.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Mediana del TA como discriminante. ..	87
Figura 3.24.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general, con la Proporción Específica del TA como discriminante. .....	88
Figura 3.25.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la variación del RSRP con el <i>log</i> anterior con la Proporción Específica del TA como discriminante. ....	92
Figura 3.26.- Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Tendencia del RSRP con los <i>logs</i> anteriores con la Proporción Específica del TA como discriminante. ....	93
Figura 3.27.- Probabilidad acumulada de la diferencia de distancias entre la estimada y la real de las diferentes regresiones, métodos y discriminantes para los <i>logs</i> del eNB 330362. .....	95
Figura 4.1.- Ubicación de los <i>logs</i> y eNBs utilizados en el TFG. ....	96
Figura 4.2.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. ....	97
Figura 4.3.- Probabilidad acumulada. Utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias. Izquierda: Probabilidad acumulada para todos los <i>logs</i> . Derecha: Probabilidad acumulada de los <i>logs</i> en los que el UE cambia de eNB. ....	99
Figura 4.4.- Representación gráfica de la regla de los 3 sigmas. ....	101
Figura 4.5.- Probabilidad acumulada. Utilizando un 50% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias. ....	103
Figura 4.6.- Probabilidad acumulada. Utilizando la BBDD del 100% de los <i>logs</i> y variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias. ....	104

Figura 4.7.- Mapa de calor. Utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias. ....	106
Figura 4.8.- Mapa de calor. Utilizando un 50% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias. ....	107
Figura 4.9.- Mapa de calor. Utilizando la BBDD del 100% de los <i>logs</i> y variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias. ....	108
Figura 4.10.- Ubicación de los <i>logs</i> y eNBs del escenario mixto en un vehículo. ....	109
Figura 4.11.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de $TA > 100$ .....	110
Figura 4.12.- Probabilidad acumulada para el escenario mixto en un vehículo.....	111
Figura 4.13.- Probabilidad acumulada para el escenario mixto en un vehículo variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias. ....	113
Figura 4.14.- Mapa de calor para los <i>logs</i> del escenario mixto en un vehículo. ....	115
Figura 4.15.- Mapa de calor para el escenario mixto en un vehículo variando el RSRP...	115
Figura 4.16.- Ubicación de los <i>logs</i> y eNB utilizados en el escenario caminado.....	116
Figura 4.17.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad.	117
Figura 4.18.- Representación de los <i>logs</i> y eNBs de los escenarios urbano y rural.....	119
Figura 4.19.- Ubicación de los <i>logs</i> y eNBs del escenario urbano.....	120
Figura 4.20.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de $TA > 100$ .....	120
Figura 4.21.- Probabilidad acumulada para el escenario urbano.....	121
Figura 4.22.- Probabilidad acumulada para el escenario urbano variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.....	124
Figura 4.23.- Mapa de calor para los <i>logs</i> del escenario urbano. ....	126
Figura 4.24.- Mapa de calor para el escenario urbano variando el RSRP. ....	126
Figura 4.25.- Ubicación de los <i>logs</i> y eNBs del escenario rural. ....	127
Figura 4.26.- Relación de los <i>logs</i> con sus eNBs en el escenario rural. ....	128
Figura 4.27.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de $TA > 100$ .....	128
Figura 4.28.- Probabilidad acumulada para el escenario rural. ....	129

Figura 4.29.- Probabilidad acumulada para el escenario rural variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias. ....	132
Figura 4.30.- Mapa de calor para los <i>logs</i> del escenario rural. ....	134
Figura 4.31.- Mapa de calor para el escenario rural variando el RSRP. ....	134
Figura 4.32.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 1. ....	136
Figura 4.33.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 2. ....	136
Figura 4.34.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 3. ....	137
Figura 4.35.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 4. ....	138
Figura 4.36.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 5. ....	138
Figura 4.37.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 6. ....	139
Figura 4.38.- Representación gráfica del método basado en trilateración a partir del RSRP de los eNB vecinos. ....	140

# Índice de Tablas

Tabla 1.1.- Comparación de la precisión de las tecnologías de posicionamiento. ....	20
Tabla 1.2.- Cronología de la evolución histórica de las redes móviles. ....	20
Tabla 1.3.- Coordenadas reales y estimadas de las estaciones base, junto con el error en distancia. ....	24
Tabla 1.4.- Información de una muestra de 10 registros junto con sus pérdidas de propagación. ....	25
Tabla 2.1.- Número de bloques de recursos en función del ancho de banda. ....	33
Tabla 2.2.- Número de subportadoras disponibles en función del ancho de banda. ....	33
Tabla 2.3.- Calidad de la señal en función del valor de los parámetros. ....	36
Tabla 2.4.- Rango de valores y longitud de bits que puede tomar el CID según la generación móvil. ....	38
Tabla 2.5.- Esquema del desarrollo de los parámetros de un dispositivo con MCC de España. ....	41
Tabla 2.6.- Esquema del desarrollo de los parámetros de un dispositivo con MCC de España (2). ....	41
Tabla 2.7.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal de España conectado a un eNB ubicado en el Código Postal 33012. ....	41
Tabla 2.8.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal (2). ....	42
Tabla 2.9.- Principales parámetros que recopila la aplicación <i>GNet Track</i> . ....	52
Tabla 3.1.- Filas extraídas de la base de datos con la ubicación de los eNB. ....	57
Tabla 3.2.- Filas extraídas de la base de datos de <i>OpenCellId</i> . ....	59
Tabla 3.3.- Parámetros de ejemplo para visualizar el método basado en el RSRP de los eNB vecinos. ....	71
Tabla 3.4.- Parámetros estadísticos del número de <i>logs</i> pertenecientes a cada celda o eNB. ....	73
Tabla 3.5.- Parámetros de algunos <i>logs</i> extraídos de las mediciones (1 <i>log</i> por cada celda). ....	76
Tabla 3.6.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión lineal del RSRP. ....	78

Tabla 3.7.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con el TA unidad como discriminante. ....	80
Tabla 3.8.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Media del TA como discriminante. ....	86
Tabla 3.9.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Mediana del TA como discriminante. ..	87
Tabla 3.10.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Proporción Específica del TA como discriminante. ....	88
Tabla 3.11.- Comparativa de las implementaciones del apartado 3.6.4. Si el RSRP aumenta, el UE se acerca al eNB. Si se trata del caso contrario, el UE se aleja del eNB.....	90
Tabla 3.12.- Comparativa de la correlación de las implementaciones del sub-apartado 3.6.4. con la variación real de la distancia para las celdas del eNB 33032. ....	91
Tabla 3.13.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Variación del RSRP con el <i>log</i> anterior con la Proporción Específica del TA como discriminante. ....	92
Tabla 3.14.- Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Tendencia del RSRP con los <i>logs</i> anteriores con la Proporción Específica del TA como discriminante.....	93
Tabla 3.15.- Comparativa de la diferencia (en metros) entre la distancia estimada y la distancia real en función de los diferentes métodos y discriminantes explicados en el apartado 3.6 para un <i>log</i> aleatorio de cada celda. ....	94
Tabla 4.1.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias. ....	101
Tabla 4.2.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de los <i>logs</i> del cambio de eNB utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias. ....	101
Tabla 4.3.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> utilizando un 50% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias.....	103
Tabla 4.4.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> utilizando la BBDD del 100% de los <i>logs</i> y variando el RSRP para calcular las distancias.....	104

Tabla 4.5.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de los <i>logs</i> del cambio de eNB utilizando la BBDD del 100% de <i>logs</i> y variando el RSRP para calcular las distancias. .....	104
Tabla 4.6.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el trayecto en un vehículo en un escenario mixto. ....	111
Tabla 4.7.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los <i>logs</i> del cambio de eNB en el trayecto en un vehículo en un escenario mixto. ....	112
Tabla 4.8.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el trayecto en un vehículo en escenario mixto y variando el RSRP aleatoriamente. ....	113
Tabla 4.9.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el trayecto en un vehículo en escenario mixto y variando el RSRP aleatoriamente. .....	113
Tabla 4.10.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el escenario urbano.....	121
Tabla 4.11.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los <i>logs</i> del cambio de eNB en el escenario urbano. ....	122
Tabla 4.12.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el escenario urbano y variando el RSRP aleatoriamente.....	124
Tabla 4.13.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el escenario urbano y variando el RSRP aleatoriamente.....	124
Tabla 4.14.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el escenario rural. ....	129
Tabla 4.15.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los <i>logs</i> del cambio de eNB en el escenario rural. ....	130
Tabla 4.16.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los <i>logs</i> en el escenario rural y variando el RSRP aleatoriamente. ....	132
Tabla 4.17.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el escenario rural y variando el RSRP aleatoriamente. ....	132

# Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.1.- Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ).....	19
Ecuación 1.2.- Pérdidas de propagación en espacio libre.....	25
Ecuación 1.3.- Pérdidas de propagación debidas al efecto suelo (modelo de tierra plana). 25	
Ecuación 2.1.- Cálculo del mínimo retardo de propagación de una señal.....	43
Ecuación 2.2.- Cálculo de la mínima distancia de ida y vuelta de una señal. ....	44
Ecuación 2.3.- Tiempo de transmisión. ....	47
Ecuación 2.4.- Cálculo de $d_n$ .....	47
Ecuación 2.5.- Distancia de transmisión. ....	47
Ecuación 2.6.- Sistema de ecuaciones del TOA. ....	47
Ecuaciones 2.7.- Diferencia entre tiempos de llegada.....	49
Ecuaciones 2.8.- Distancia entre eNBs.....	49
Ecuaciones 2.9.- Distancia entre eNBs.....	49
Ecuación 2.10. Sistema de ecuaciones del TDOA. ....	49
Ecuación 2.11. Sistema de ecuaciones del AOA. ....	50

# 1. Introducción.

## 1.1.- IMPORTANCIA DE LA LOCALIZACIÓN EN REDES MÓVILES.

La telefonía móvil ha sido una de las innovaciones más importantes de las últimas décadas. Poder comunicarte desde tu hogar con otra persona que se encuentra en el suyo en tiempo real ya fue un gran avance, pero el hecho de poder realizarlo fuera del mismo, de manera inalámbrica, y en movimiento, ya sea en un vehículo o a pie, mejoró el servicio que ofrecían las compañías telefónicas.

Actualmente, Internet ofrece estas posibilidades, pero el precursor de ello fueron las redes móviles. Para el desarrollo de las llamadas, la geolocalización de los terminales es fundamental ya que, para dirigir las al teléfono receptor, es necesario conocer la localización física de ese usuario. Esto sirve para poder conocer a que antena dirigir la llamada, siendo esta antena la misma a la que está conectado ese receptor móvil.

Este método viene siendo utilizado desde la segunda generación de redes móviles hasta la actual, siendo efectuadas mejoras en cada una de ellas, pero con el mismo fundamento para el establecimiento de las llamadas.

Sin embargo, es posible obtener un servicio adicional gracias a la localización de estos terminales. Si se conoce la antena a la que se conectan los terminales móviles, también será posible geolocalizar dichos terminales, mediante diferentes parámetros que ofrecen las redes móviles.

La implantación de los Sistemas de Navegación Global por Satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite System*) ha mejorado la geolocalización de los dispositivos que cuentan con dichos sistemas. El Sistema de Posicionamiento Global (GPS, *Global Positioning System*) norteamericano, junto con los Galileo, GLONASS o Beidou; europeo, ruso y chino respectivamente, forman parte de los denominados GNSS.

A la hora de geolocalizar un dispositivo, en condiciones ideales, estos sistemas ofrecen una precisión superior a la que se puede obtener cuando se utiliza la red móvil. Sin embargo, la principal limitación de los sistemas GNSS es que su funcionamiento requiere disponer de visión con, al menos, cuatro satélites de una misma constelación GNSS, escenario que no siempre es posible.

Así, existen varios escenarios donde el error cometido por los sistemas GNSS para determinar una posición es elevado (decenas de metros) o, simplemente, no son capaces de determinarla. En situaciones donde el terminal móvil se encuentra rodeado por una gran cantidad de obstáculos, como pueden ser unos edificios altos en una ciudad o una zona boscosa en una carretera, y al no tener visión directa con los satélites, se producen estos errores al determinar la posición.

Peor aún es el caso en el que el terminal móvil se encuentra en el interior de un edificio, de un túnel o de cualquier objeto que limite su línea de visión con el satélite, reduciendo el nivel de potencia de la señal a valores mínimos provocando que no haya conexión entre el terminal y el satélite. De esta forma, el dispositivo móvil es incapaz de determinar su ubicación.

Para estos casos, la geolocalización mediante red móvil es más eficiente y precisa (e incluso puede ser la única posibilidad), ya que aparte de contar con muchas más estaciones base, estas se encuentran a una altura en la que el enlace se establece de forma horizontal y no vertical.

## 1.2.- ESTADO DE LA TÉCNICA.

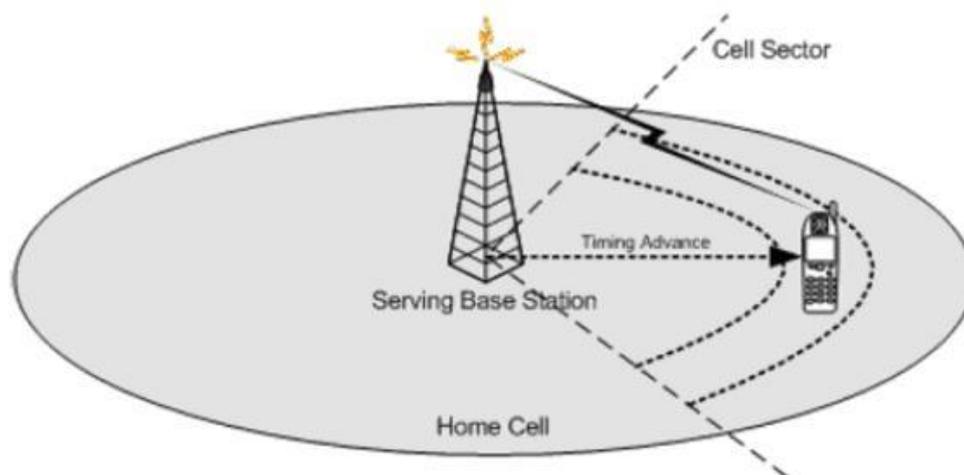
En este apartado se indican los principales métodos para localización en redes de telefonía móvil.

### Técnica Cell ID – Timing Advance

Este método se basa en los tres siguientes elementos:

- **NodeB:** Es la estación base a la que está conectado el terminal móvil.
- **Cell ID:** Es el identificador de la celda, la cuál es un sub-área de la que cubre el transmisor.
- **Timing Advance:** Es un retardo temporal que se introduce para compensar el retardo por la propagación de la señal. Es proporcional a la distancia.

Con estos 3 datos se puede estimar la posición de la forma que se muestra en la Figura 1.1.



**Figura 1.1.-** Esquema del método Node-B-Cell ID-Timing Advance.

El posicionamiento de los terminales se basa en la intensidad de la señal recibida (RSS, *Received Signal Strength*) así como en el tiempo de vuelo de la señal entre el NodeB y el terminal del usuario.

### **Técnicas de posicionamiento no basadas en la intensidad de la señal recibida**

- **Tiempo de llegada (ToA, *Time of Arrival*) o Tiempo de vuelo (ToF, *Time of Flight*):** Es el tiempo que tarda una señal en viajar desde el transmisor al receptor. La distancia al transmisor se puede calcular a partir del tiempo de llegada, conocida la velocidad.
- **Diferencia en el tiempo de llegada (TDoA, *Difference Time of Arrival*) o Diferencia en el horario de vuelo (TDoF, *Difference Time of Flight*):** Es el cálculo de la distancia mediante la diferencia entre los tiempos de llegada en estaciones base concretas. [1]
- **Ángulo de llegada (AoA, *Angle of Arrival*):** Es el ángulo de incidencia de una onda de radio propagada en el enlace ascendente desde el terminal de usuario hasta la estación base.
- **Tiempo de ida y vuelta (RTT, *Round Trip Time*):** Es la duración que tarda una solicitud de red en ir del punto de partida al destino y de vuelta al punto de partida. Conocida esta duración, se podrá establecer la distancia.
- **Sistema global de navegación por satélite asistido (A-GNSS, *Assisted Global Navigation Satellite System*):** Utiliza la red 4G proporcionando datos de asistencia a los dispositivos para mejorar el tiempo de adquisición de los satélites GNSS.
- **Diferencia observada en el tiempo de llegada (OTDoA, *Observed Time Difference of Arrival*):** Utiliza un método de multilateración en el que el terminal móvil mide la diferencia de tiempo entre algunas señales concretas de varias estaciones base y reporta las diferencias de tiempo a un centro de localización del servicio móvil (SMLC, *Serving Mobile Location Center*), el cual calcula la posición del terminal móvil.
- **Identificador de celda mejorado (E-Cell ID, *Enhanced Cell ID*):** Es el método que consiste en añadir información como el RTT, el ToA o la combinación de ambos al método básico de Cell ID. [2]

En la Tabla 1.1 se resumen la precisión de las diferentes tecnologías de posicionamiento [4].

### **Técnicas de posicionamiento basadas en la intensidad de la señal recibida**

Estas técnicas emplean alguno de los siguientes parámetros relacionados con el nivel de señal, los cuales se definen a continuación.

- **Potencia de la señal de referencia recibida (RSRP, *Reference Signal Received Power*):** Es el promedio lineal de la potencia de la señal de referencia en un ancho de banda específico, en el cual se están transmitiendo los elementos de recurso (RE, *Resource Elements*).
- **Indicador de fuerza de la señal recibida (RSSI, *Received Signal Strength Indicator*):** Es la potencia total obtenida por el equipo de usuario (UE, *User Equipamiento*) en todo el ancho de banda.
- **Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ, *Reference Signal Received Quality*):** Es la proporción de potencia de la señal de referencia pura con respecto a toda la potencia recibida por el UE. Se calcula de acuerdo a la Ecuación 1.1, siendo N el número de RE que hay en el ancho de banda medido. [3]

$$RSRQ = \frac{N \times RSRP}{RSSI}$$

**Ecuación 1.1.-** Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ).

A modo de resumen, en la Tabla 1.2 se muestra la cronología de la evolución histórica de las redes móviles [11] así como la denominación de los diferentes elementos de la red móvil en función de la generación tecnológica.

Tecnología	Red Móvil (CGI-TA)	AOA	TDoA	OTDoA	A-GPS	GNSS
<b>Precisión (en metros)</b>	300 – 1000 (general) 50 – 100 (ciudad)	100 – 200	< 50	50 – 200	5 - 30	< 10

**Tabla 1.1.-** Comparativa de la precisión de las tecnologías de posicionamiento.

Generación	2G	3G	4G	5G
<b>Década</b>	1990	2000	2010	2020
<b>Tecnología</b>	<b>GSM</b> Global System for Communications	<b>UMTS</b> Universal Mobile for Telecommunications System	<b>LTE</b> Long Term Evolution	<b>NR</b> New Radio
<b>Red de acceso radio</b>	<b>GRAN</b> GSM Radio Access Network	<b>UTRAN</b> UMTS Terrestrial Radio Access Network	<b>EUTRAN</b> Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network	<b>NGRAN</b> Next Generation Radio Access Network
<b>Núcleo de red</b>	<b>CSC</b> Circuit Switched Core	<b>PSC</b> Packet Switched Core	<b>EPC</b> Evolved Packet Core	<b>NGC</b> Next Generation Core
<b>Denominación del dispositivo móvil</b>	<b>MS</b> Mobile Station	<b>UE</b> User Equipment	<b>UE</b> User Equipment	<b>UE</b> User Equipment
<b>Denominación de la antena</b>	<b>BTS</b> Base Transceiver Station	<b>NB</b> NodeB	<b>eNB</b> Evolved NodeB	<b>gNB</b> Next Generation NodeB

**Tabla 1.2.-** Cronología de la evolución histórica de las redes móviles.

### 1.3.- MOTIVACIÓN DEL TFG.

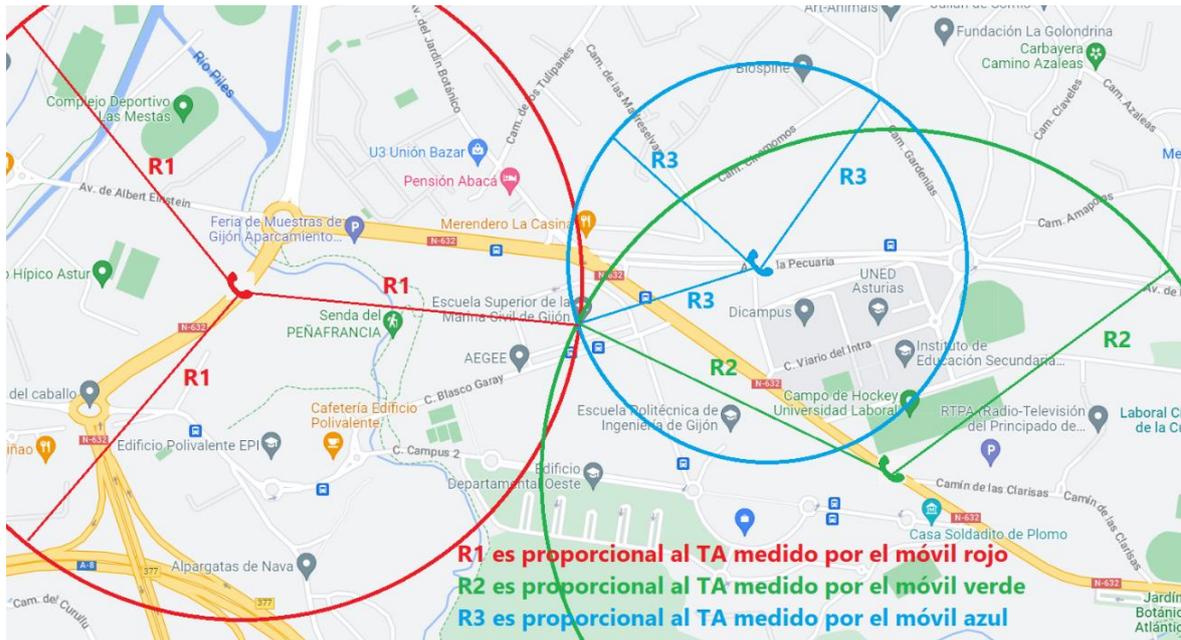
La motivación del presente TFG viene derivada del trabajo realizado en una de las prácticas de laboratorio de la asignatura “Sistemas de Radiodeterminación”, de cuarto curso del grado en Ingeniería en Tecnologías y Servicios de Telecomunicación.

En dicha asignatura se estudian los fundamentos de los sistemas radar y de radionavegación y radiolocalización. Dichos sistemas se basan en métodos como el tiempo de llegada/tiempo de vuelo (ToA/ToF, *Time of Flight/Time of Arrival*) o el ángulo de llegada (AoA, *Angle of Arrival*). Igualmente se estudiaron los fundamentos y principio de funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite (GNSS, *Global Navigation Satellite Systems*), sistemas de localización en entornos interiores, y técnicas de localización en redes celulares.

Fue en esta asignatura, sobre todo en la práctica de redes celulares, donde surgió el interés en el potencial uso de los datos de la red de telefonía móvil para la geolocalización del dispositivo móvil, viendo que, a partir de los datos de capa física proporcionados por una simple aplicación (*GNetTrack* [6]) , se podían hacer buenas estimaciones relativas al posicionamiento de elementos de la red móvil.

Con dicha aplicación, conociendo la posición geo-referenciada del terminal móvil, y el valor del avance de tiempo (TA, *Timing Advance*), el cual se explicará en detalle en un apartado posterior, es posible estimar la posición de la antena, trazando circunferencias de radio proporcional al valor del TA, centradas en cada lugar de medida.

Considerando que el móvil realiza un trayecto durante el cual permanece conectado a la misma antena, el fundamento teórico se puede ejemplificar como se ve en la Figura 1.2.

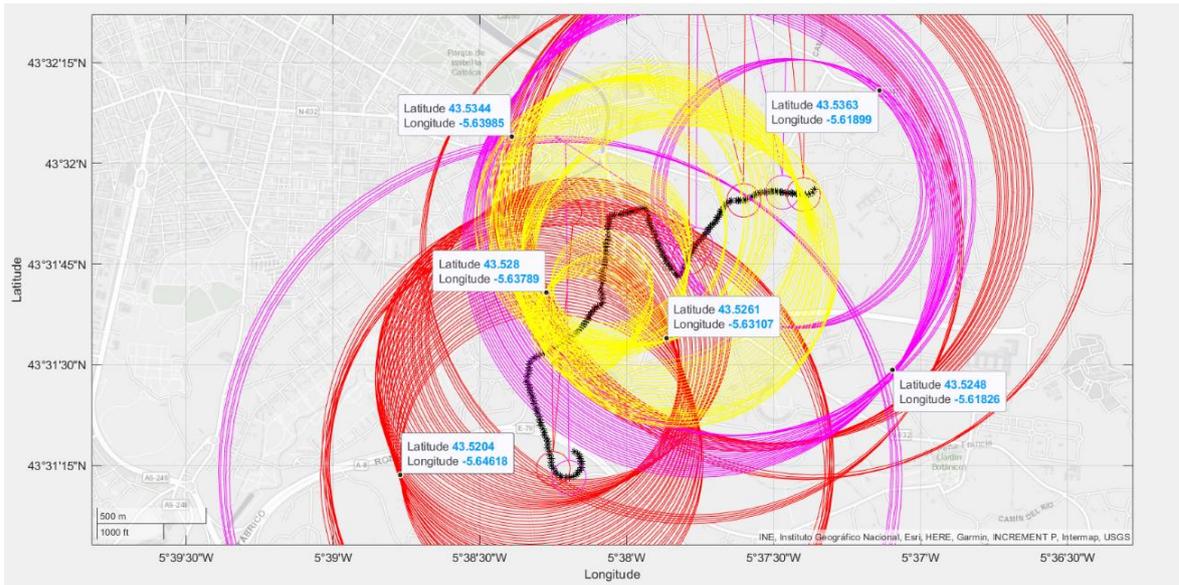


**Figura 1.2.-** Representación teórica del método para calcular la ubicación de la antena a partir del TA.

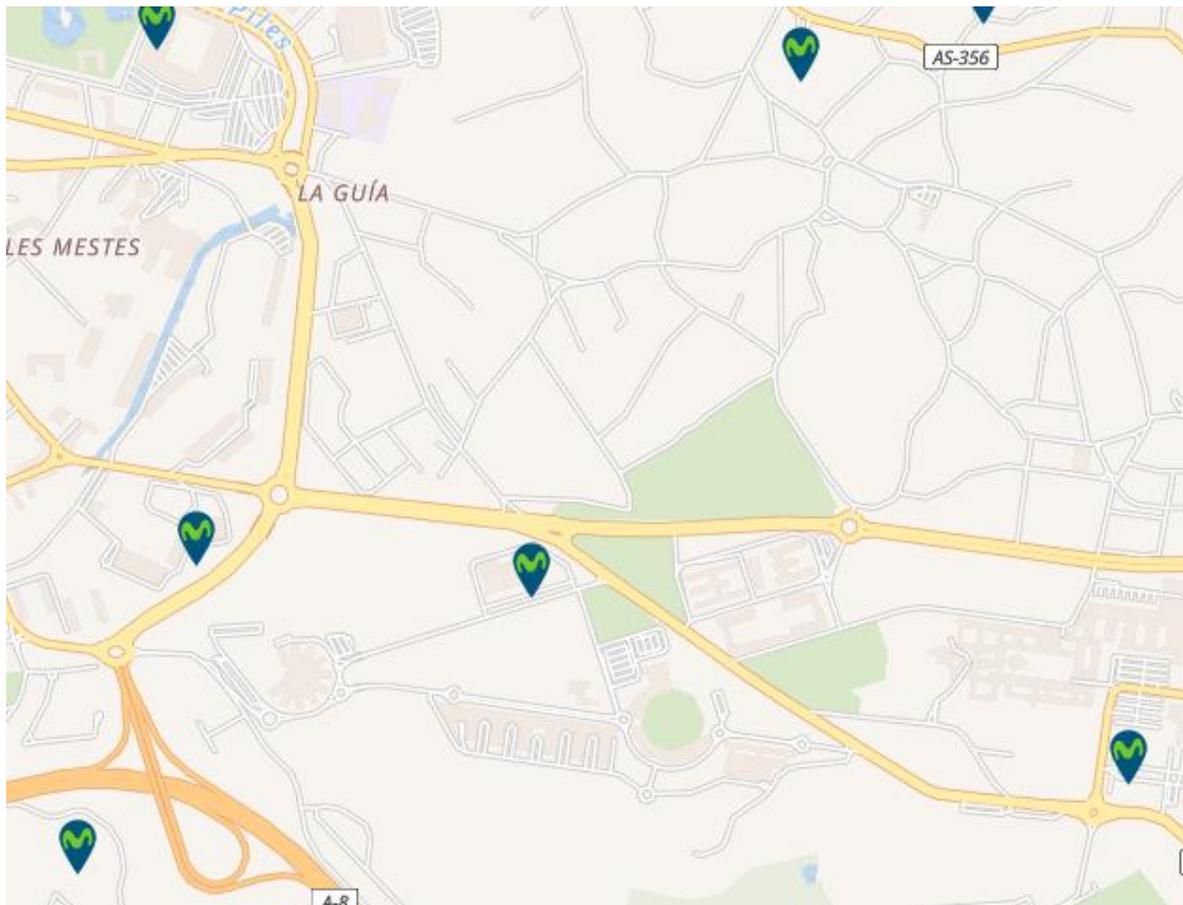
El terminal móvil pasa por las localizaciones indicadas con diferente color en la Figura 1.2. (rojo, azul y verde), teniendo para en cada ubicación un valor de TA diferente, el cual es proporcional a la distancia a la que se encuentra de la antena. Esta puede estar en cualquier punto de la circunferencia, pero tomando la intersección de las 3 circunferencias correspondientes a cada medición, resulta la posición estimada de la antena. Para este caso, la posición resultante es la Escuela de Marina Civil, en la cual se encuentra una antena de telefonía móvil, la cual se tomará como referencia para posteriores explicaciones.

A modo de ejemplo, se ilustra un conjunto de medidas realizadas en la práctica de la asignatura “Sistemas de Radiodeterminación” relativa a localización en redes móviles. En la Figura 1.3 se representan las circunferencias correspondientes a un determinado valor de TA, centradas en la posición del dispositivo móvil, junto con la ubicación real de las antenas (etiquetas con los valores de coordenadas de longitud y latitud).

Los colores de las circunferencias identifican las medidas de un mismo eNodeB, donde el radio de cada círculo corresponde al valor del parámetro TA medido con la aplicación *GNetTrack* [6] multiplicado por la distancia correspondiente al valor TA unitario (78,125 m).



**Figura 1.3.-** Representación práctica del método que calcula la ubicación de la antena a partir del TA.



**Figura 1.4.-** Representación de la ubicación de las antenas buscadas con el método.

En la Tabla 1.3 se comparan las ubicaciones estimadas de las estaciones base con la ubicación (posición real, dibujadas en la Figura 1.4) disponibles en la página web *AntenasGSM* [7]. Se ha calculado el error en la estimación de las posiciones de los eNodeB obtenidas a partir de las medidas realizadas y a partir de las posiciones reales.

Estaciones base	Coordenadas estimadas		Coordenadas reales		Error
	Latitud (°)	Longitud (°)	Latitud (°)	Longitud (°)	Distancia (m)
<i>Antena en el NE</i>	43,5363	-5,6190	43,5360	-5,6215	280
<i>Antena central</i>	43,5261	-5,6311	43,5263	-5,6285	301
<i>Antena en el SE</i>	43,5248	-5,6183	43,5227	-5,6130	633
<i>Antena en el SO</i>	43,5204	-5,6462	43,5210	-5,6403	659
<i>Antena en el O</i>	43,5280	-5,6379	43,5269	-5,6372	146
<i>Antena en el NO</i>	43,5344	-5,6399	43,5367	-5,6382	322

**Tabla 1.3.-** Coordenadas reales y estimadas de las estaciones base, junto con el error en distancia.

Como se aprecia, no todas las intersecciones corresponden a la posición de una antena, pero sí que todas las posiciones de las antenas corresponden más o menos a una intersección concreta. Además, el TA no es un valor que se actualice de manera frecuente. Este varía cuando se produce un cambio de antena, de celda, o simplemente la distancia a la antena entre el lugar del primer cálculo y el del actual ha variado notablemente.

Por ejemplo, si el móvil se encuentra en movimiento, sucede que, tras un cambio en el valor de TA, para las primeras mediciones tras dicho cambio el valor de TA será fiable, pero a medida que trascorra el tiempo, la fiabilidad de este valor de TA puede ir disminuyendo, hasta que se establezca uno nuevo.

En la Tabla 1.4 se muestran, a modo de ejemplo, 10 medidas consecutivas tomadas de forma aleatoria de una medición de 57, en la cual el dispositivo móvil siempre se encontraba conectado a la misma estación base.

Para cada una de las 57 medidas, se ha calculado la distancia entre las diferentes posiciones de medición y la estación base (distancia del enlace) a la que está conectado el dispositivo junto con el RSRP de cada medida.

Además, se han calculado las pérdidas de propagación del espacio libre (LBF) y las pérdidas debidas al efecto suelo (LTP) en la transmisión, con alturas de antena de 20 y 1,5 m respectivamente y una frecuencia de funcionamiento de 816 MHz.

Las pérdidas de propagación en espacio libre se han obtenido de la siguiente forma:

$$LBF (dB) = 32,45 + 20 \cdot \log_{10} [ f(MHz) ] + 20 \cdot \log_{10} [ d(km) ]$$

**Ecuación 1.2.-** Pérdidas de propagación en espacio libre.

mientras que las pérdidas de propagación debidas al efecto suelo (modelo de tierra plana) se obtuvieron con la Ecuación 1.3:

$$LTP (dB) = 120 + 40 \cdot \log_{10} [ d(km) ] - 20 \cdot \log_{10} ( h_{TX}(m) \cdot h_{RX}(m) )$$

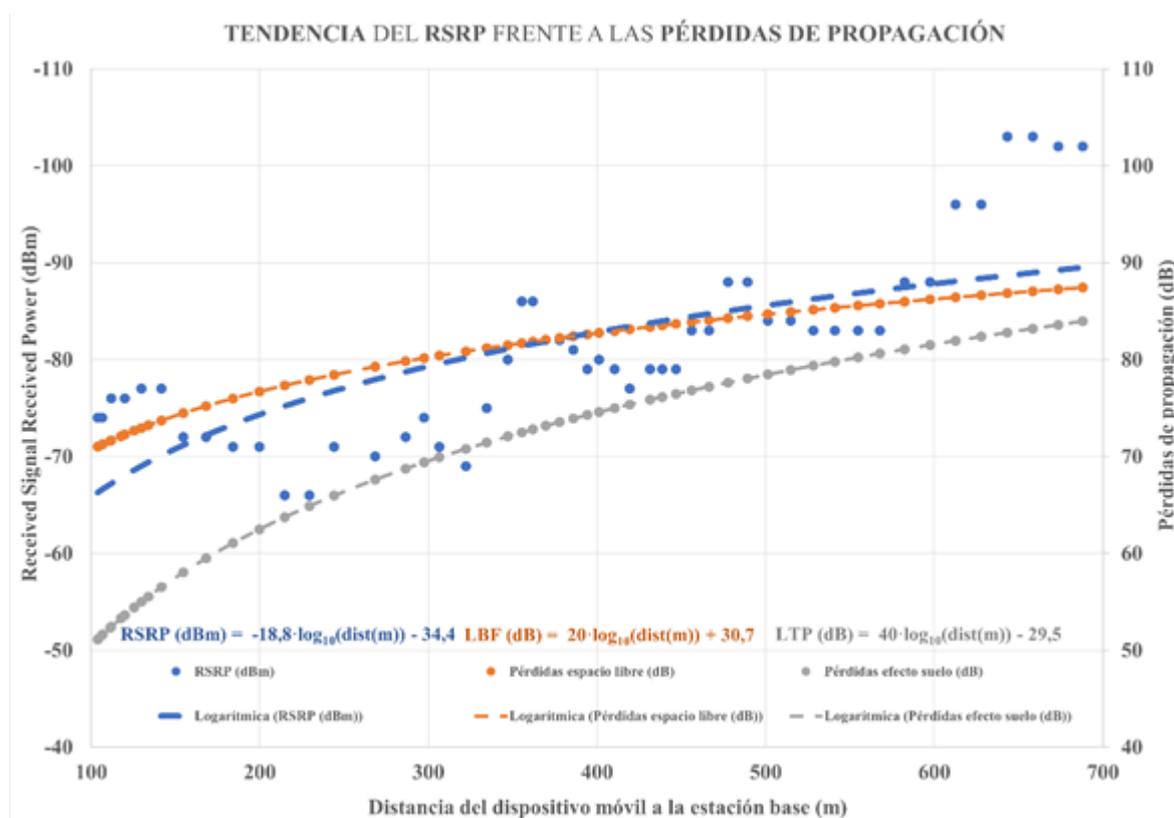
**Ecuación 1.3.-** Pérdidas de propagación debidas al efecto suelo (modelo de tierra plana)

Medida	Distancia del enlace (m)	RSRP (dBm)	LBF (dB)	LTP (dB)
1	347	-80	-81	-72
2	335	-75	-81	-71
3	322	-69	-81	-71
4	307	-71	-80	-70
5	297	-74	-80	-69
6	286	-72	-80	-69
7	268	-70	-79	-68
8	244	-71	-78	-66
9	229	-66	-78	-65
10	215	-66	-77	-64

**Tabla 1.4.-** Información de una muestra de 10 registros junto con sus pérdidas de propagación.

En la Tabla 1.4 se muestra el valor del parámetro RSRP junto con las pérdidas de propagación en función de la distancia, así como la distancia del enlace entre móvil y antena.

Como se puede ver en la Figura 1.5, los valores asociados con el parámetro RSRP (puntos de color azul y curva de regresión de color azul asociada) y las pérdidas de propagación de espacio libre (curva de color naranja) siguen prácticamente la misma tendencia.



**Figura 1.5.-** Representación del RSRP medido en función de la distancia a la estación base, de las pérdidas teóricas de propagación, considerando el efecto suelo y el espacio libre, con ajuste de mínimos cuadrados a las mediciones.

El objetivo de dicha práctica de laboratorio fue, por tanto, encontrar la posición de la antena conociendo la posición de las mediciones (su geolocalización a partir de coordenadas GNSS). En base a los resultados obtenidos, este TFG propone resolver el problema de localización inverso al resuelto en dicha práctica: es decir, determinar la posición del dispositivo móvil a partir de las mediciones de parámetros físicos y de las posiciones de las

antenas. Como se explicará en el Capítulo 3, si bien conceptualmente podría parecer un problema sencillo, para ello es necesario:

- 1) Obtener información de la antena o antenas a las que está conectado el dispositivo móvil cuando se realiza la medición, lo cual no es un problema trivial.
- 2) Caracterizar adecuadamente los parámetros de capa física medidos. Por ejemplo, en el caso del nivel de potencia de la señal de referencia, es preciso establecer un modelo de propagación para relacionar el nivel de señal medido con la distancia entre el dispositivo móvil y la antena.
- 3) Disponer de un conjunto mínimo de mediciones que permita realizar la triangulación de la posición.

Por tanto, se puede afirmar que la principal motivación del presente TFG es evaluar la capacidad de geolocalización de un terminal conectado a una red de telefonía móvil sin recurrir a información de GNSS. Si bien la red de telefonía móvil es capaz de realizar la localización aproximada de los terminales conectados a la misma (mediante lo que se denomina sistema de localización en bucle cerrado, donde tanto el terminal móvil como la red intercambian información en ambos sentidos), en este TFG se pretende evaluar la capacidad y precisión que se obtendría si, dicha localización, se realiza en bucle abierto (el terminal móvil calcula su posición sin necesidad de solicitársela a la red móvil).

En resumen, se pretende evaluar la posibilidad de geolocalizar un dispositivo sin necesidad de recurrir a ningún receptor GNSS ni a parámetros adicionales de la capa física de la red 4G.

Una dificultad añadida a tener en cuenta es la limitada información de capa física a la que se puede acceder, lo que limitará la precisión en la localización con respecto a la que puede ofrecer la red de telefonía móvil (bucle cerrado). Ello se debe a que el hardware de la red de telefonía móvil puede medir más parámetros de la capa física, pudiendo emplear combinaciones de métodos, tales como los vistos en el apartado 1.2 como son el ToA, el AoA, y/o trilateración, conocidas las antenas a las que está conectado simultáneamente.

## 1.4.- OBJETIVOS DEL TFG.

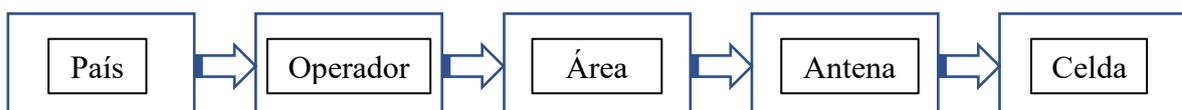
El objetivo principal de este TFG es evaluar qué grado de precisión en la determinación de la posición del terminal móvil se puede alcanzar con las mediciones de datos de capa física accesibles en dicho terminal.

En cuanto a la red móvil, hay que tener en cuenta que las mediciones han sido realizadas desde un dispositivo móvil *Samsung Galaxy A51*, con sistema operativo *Android 13 'Tiramisu'*, que está conectado a la red 4G. Esta red es la que predomina en el territorio español en 2023, ya que la red 3G está siendo apagada, quedando la red 2G para dar servicio a localizaciones remotas y otros servicios (ej. IoT móvil), y que la 5G aún está en fase de implementación, ya que no todos los terminales móviles tienen acceso a ella.

En las redes 4G, la estación base o antena se denomina eNodeB, mientras que el dispositivo móvil es el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*). Esta notación se empleará de aquí en adelante.

A la hora de trabajar con los parámetros de una red 4G para geolocalizar un móvil, es necesario conocer el flujo ascendente desde cada terminal. El móvil está conectado a una antena que a su vez le asigna en una celda concreta, en función de la dirección en la que se encuentre. A cada antena se le asigna un código en función de su área, de forma que se pueda conocer su localización geográfica de una manera sencilla. A nivel global, los dispositivos pertenecen a una operadora de un país concreto, por tanto, a cada uno se le asigna un código tanto para su país como su operadora.

El diagrama de la jerarquía de códigos de localización se muestra en la Figura 1.6:



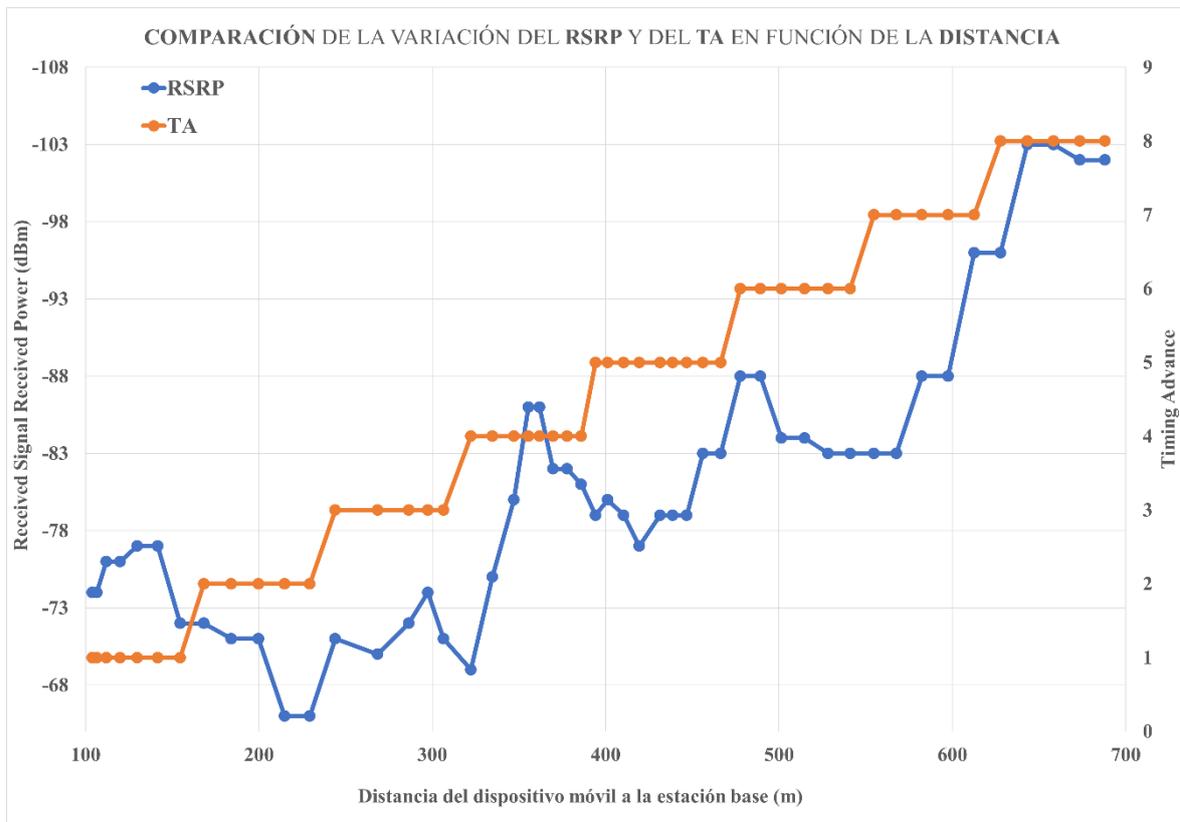
**Figura 1.6.-** División de la red de telefonía móvil en diferentes unidades y elementos.

Estos datos unidos forman un código identificador único para cada celda, mientras que con la antena y la celda podremos identificar una zona geográfica conociendo su área de localización. Al igual que la antena y el móvil tienen su denominación específica dentro de la capa física, el resto de parámetros también tienen sus códigos identificativos, los cuáles se explicarán detalladamente en el apartado dedicado a las capas inferiores de la red 4G.

Con estos parámetros identificamos, como se explicó en un apartado anterior, la celda de una antena, la cual puede abarcar un área que puede variar entre unos pocos metros cuadrados (picoceldas o nanoceldas) hasta varios kilómetros cuadrados. La forma de acotar ese área es mediante el Nivel de Señal Recibido de la Señal de Referencia (*Reference Signal Received Power*; RSRP) y el Avance de Tiempo (*Timing Advance*, TA), los cuales son proporcionales a la distancia. El TA presenta una variación con grandes saltos al cambiar la distancia entre el UE y el eNodeB, mientras que el RSRP varía de forma más continuada, pero con un perfil más irregular. Esto se puede visualizar en la Figura 1.7.

La potencia que recibe el móvil se modifica en función de cómo es el enlace establecido entre UE y antena. La lógica es que cuanto más cerca se encuentre de la antena, más potencia recibirá, pero esto no es siempre así, ya que puede haber obstáculos por el camino que interrumpen la línea de visión (LOS, *Line of Sight*). Sin embargo, la distancia del enlace puede ser mayor, pero que no existan condiciones que den lugar a una ausencia de LOS o al multicamino, recibiendo de esta forma, más potencia de señal. Estos modelos se pueden estudiar en profundidad según el entorno en el que se realice la medición, rural o urbano, y montañoso o llano.

Una manera de hacerlo será, sin conocer físicamente la zona geográfica, modelando el RSRP mediante un ajuste de regresión para cada celda, ya que con los parámetros anteriormente mencionados tenemos acceso a áreas muy concretas. En función de la ecuación que resulte del modelado, podremos analizar su coeficiente de atenuación y así determinar en qué tipo de escenario nos encontramos, lo cual será más útil que utilizar las ecuaciones previamente mencionadas de pérdidas de propagación.



**Figura 1.7.-** Comparación de la variación del RSRP y del TA en función de la distancia del enlace.

Los ajustes de regresión pueden ser lineales o polinómicos, siendo estos mucho más avanzados que los lineales, ya que al ser tan irregular el RSRP, el ajuste es más propio de una curva que de una recta. Si tenemos en cuenta un ajuste polinómico, las soluciones a la distancia serán proporcionales al grado del mismo, lo cual presentará una ambigüedad que habrá que resolver. La solución a esto es recurrir al TA, buscando la que tenga la mínima diferencia a este valor.

Por ello, el objetivo del presente TFG es obtener la máxima aproximación posible a la localización exacta del terminal móvil, sin que esta deje de ser estimada. Se propondrán varios métodos en los cuáles cada vez se mejorará el análisis y el uso de los datos disponibles.

## 2. Redes móviles y técnicas de localización.

### 2.1.- DESCRIPCIÓN DE LAS CAPAS INFERIORES DE LA TECNOLOGÍA MÓVIL 4G.

En la cuarta generación de redes móviles, la tecnología de banda ancha inalámbrica que sirve para la transmisión de datos se conoce como LTE, en particular LTE-*Advanced* ya que LTE se refiere a 3,9G, es decir, casi 4G, pero con una velocidad de transmisión menor.

Las técnicas de acceso múltiple dan lugar a los usuarios la posibilidad de conectarse a un mismo medio, transmitiendo y recibiendo información compartiendo su capacidad. Esto se consigue mediante la multiplexación de los usuarios en la capa física del sistema.

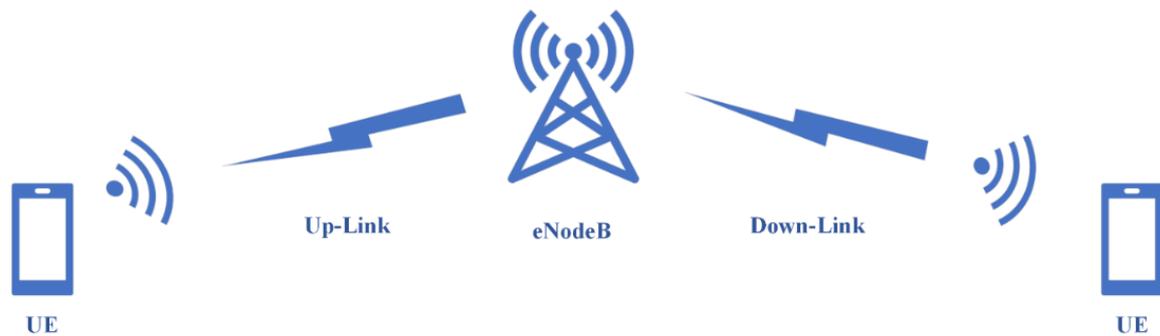
LTE-A utiliza la Multiplexación por División de Frecuencia (FDM, *Frequency Division Multiplexing*) como esquema de multiplexación, la cual divide el ancho de banda entre múltiples usuarios, asignándole a cada uno un número determinado de subportadoras. En el enlace descendente (DL, *DownLink*), se utiliza como técnica el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal FDM Access*), mientras que en el enlace ascendente (UL, *UpLink*) se utiliza el Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier FDMA*).

El acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA) posee numerosos beneficios frente a la división por tiempo o por código (TDMA/CDMA). Por ejemplo, la robustez frente al multicamino o la sencillez de la ecualización en frecuencia frente a la costosa ecualización en tiempo debido a las largas dispersiones temporales, así como el reparto de los recursos en frecuencia, muy útil en los canales inalámbricos ya que son selectivos en frecuencia. Estos motivos determinan la balanza para la inclusión de FDMA en 4G.

SC-FDMA es la versión pre-codificada con la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) de OFDMA, al ser las subportadoras ortogonales entre sí.

El transmisor convierte en el bloque DFT los símbolos del dominio del tiempo al dominio de frecuencia, repartiéndolos por las subportadoras que ocupan el ancho de banda asignado al usuario. Esta operación también se debe realizar en el receptor, pero a la inversa.

La cuestión de porqué se utiliza SC-FDMA y no sirve con OFDMA está en la reducción de la proporción entre la potencia pico y la potencia media (PAPR, *Peak-to-Average Power Ratio*) que aporta el uso de SC-FDMA, ya que introducir tan solo una portadora al amplificador de alta potencia (HPA, *High Power Amplifier*) se reduce el coste de un HPA muy lineal. [8]



**Figura 2.1.-** Comunicación entre el UE y el eNodeB.

Esto implica una disminución en el consumo de energía por parte del transmisor, en el caso del enlace ascendente, la batería del UE, un recurso muy importante en el dispositivo móvil. Sin embargo, en el enlace descendente este problema no es necesario tenerlo en cuenta, ya que el transmisor (eNB) está siendo alimentado por la red eléctrica, por lo que se utiliza OFDMA para reducir la complejidad en el receptor.

En ambos casos, tanto en OFDMA como en SC-FDMA, la separación entre subportadoras es de 15 kHz. Teniendo en cuenta los anchos de banda disponibles en 4G, el número posible de subportadoras para cada ancho de banda se muestra en la Tabla 2.2.

En LTE, un elemento fundamental en la canalización son los bloques de recursos (RB, *Resource Block*), los cuáles son la unidad básica de asignación de recursos en una red LTE. Al estar formado por 12 subportadoras las cuáles se ubican cada 15 kHz, cada RB tiene un ancho de banda de 180 kHz.

Dependiendo de la longitud del prefijo cíclico (CP, *Cyclic Prefix*), el RB transmite 7 símbolos si el CP es normal, o 6 si utiliza un CP más grande. A su vez, la duración temporal de un RB es de medio milisegundo (0,5 ms).

Su función es asignar de manera eficiente los recursos de la red en los dominios de tiempo y frecuencia para optimizar la capacidad de la red, permitiendo así múltiples conexiones.

En función de la canalización, se asigna un número de RB determinado al sistema, como se ve en la Tabla 2.1.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de RB	6	15	25	50	75	100

**Tabla 2.1.-** Número de bloques de recursos en función del ancho de banda.

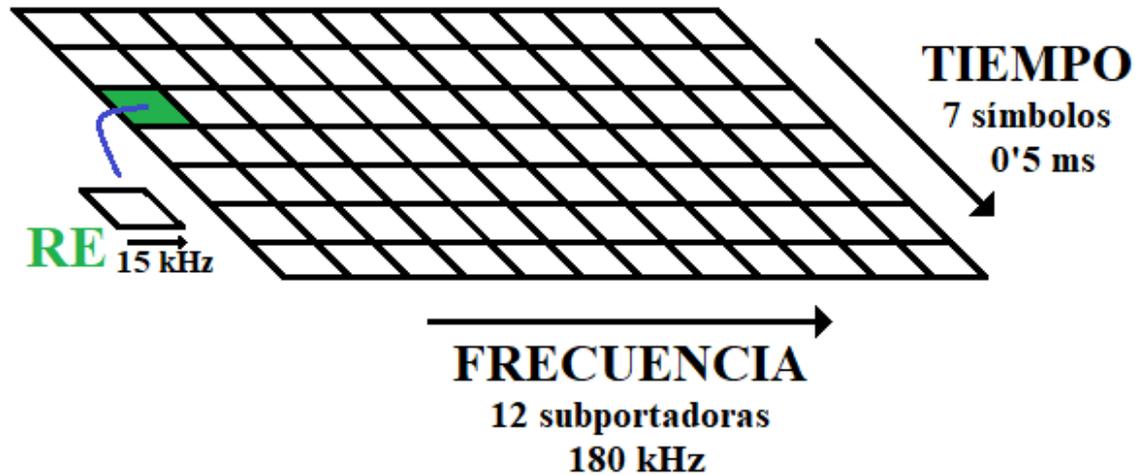
En función de este número, se puede calcular el número de subportadoras disponibles, las cuáles son 12 de información por cada RB más la subportadora central que es de control. Los resultados se indican en la Tabla 2.2. [9]

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de subportadoras	73	181	301	601	901	1201

**Tabla 2.2.-** Número de subportadoras disponibles en función del ancho de banda.

Los RB, normalmente, tiene una dimensión de 12x7, lo que da lugar a un total de 84 recursos. A cada una de estos se le conoce como elemento de recurso (RE, *Resource Element*), que es la unidad más pequeña de recursos en la red LTE, el cual se utiliza para transmitir datos. Es la intersección entre una subportadora y un símbolo en una determinada ubicación de tiempo y frecuencia. Un resumen de la estructura de un RB se puede ver en la Figura 2.2.

Utilizando una modulación 64-QAM, que transmite 6 bits por símbolo, se pueden enviar 504 bits cada 0,5 ms, lo que implica 1008 bits por ms, que resulta en alrededor de 1 Mb/s. En el canal de 20 MHz, se pueden alcanzar hasta 100 Mb/s de velocidad en el DL.



**Figura 2.2.** - Estructura de un bloque de recursos.

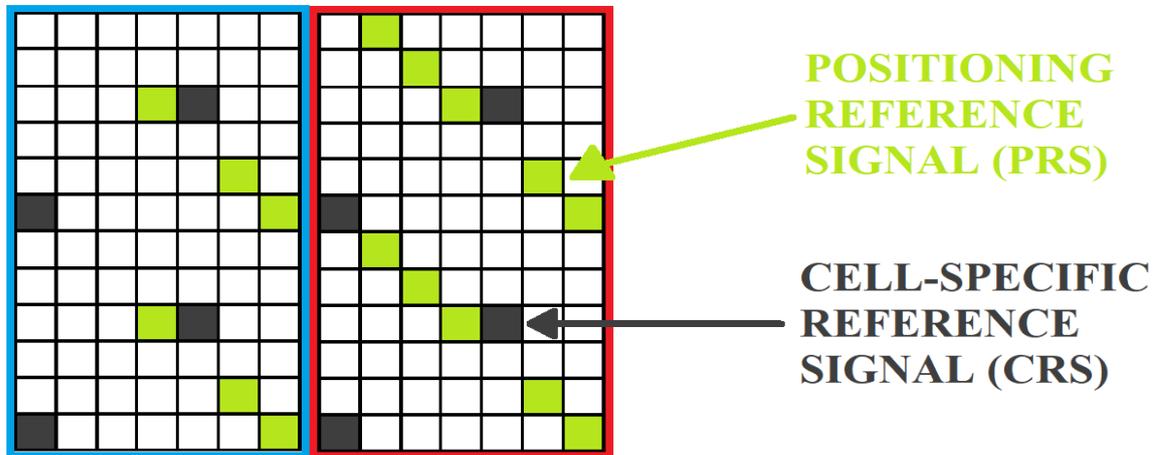
Los bloques de recursos pueden contener diferentes tipos de elementos, tanto datos de usuario, como señales de control y de posicionamiento. Los RE de los RB también pueden estar vacíos, es decir, que no contengan información.

En el caso de posicionamiento, las señales que podemos encontrar en los RB son la señal de referencia de posicionamiento (PRS, *Positioning Reference Signal*) o la señal de referencia específica de la celda (CRS, *Cell-specific Reference Signal*). La CRS es transmitida por la estación base en las subportadoras OFDM que tiene asignadas para ayudar al receptor a demodular la señal y estimar el canal de radio.

Por su parte, la PRS se utiliza exclusivamente para el posicionamiento del terminal de usuario en la red móvil. Esta señal se transmite en ciertas subportadoras y se utiliza para medir el tiempo de propagación entre el transmisor y el receptor. [10]

El UE recibe varias PRS de diferentes eNodeB, mide el OTDOA y reporta la diferencia de tiempo de la señal de referencia (RSTD, *Reference Signal Time Difference*) a un eNodeB, el cual calcula las coordenadas del UE.

Un ejemplo de los posibles RE en un RB se puede ver en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.-** Señales de referencia en 2 bloques de recursos (azul y rojo).

Estos términos sirven para entender correctamente cómo se calculan los parámetros de potencia en redes LTE, los cuáles se introdujeron de la siguiente forma en el apartado 1.2.

### 2.1.1.- Parámetros de potencia de la red.

El RSSI hace referencia a la potencia total en todo el ancho de banda, mientras que el RSRP se refiere a un ancho de banda específico.

La diferencia entre RSSI y RSRP se puede entender de forma sencilla a partir del significado de RB y RE. Todo el ancho de banda serían todos los elementos de recurso, es decir, el RB; mientras que el ancho de banda específico hace referencia a los RE del RB donde se transmiten las señales de referencia de posicionamiento (PRS).

Por tanto, el RSSI sería el valor de la potencia promedio medida en toda la banda (todas las subportadoras), incluyendo el ruido y las interferencias. El RSRP por su parte hace referencia al promedio de la potencia de todos los RE donde se transmite la señal de referencia.

Volviendo a la Figura 2.3. el RSSI se calcularía para cada RB teniendo en cuenta los RE de todos los colores, mientras que el RSRP lo haría solo con los RE de color verde.

Teniendo en cuenta que la PRS es una señal fiable debido a que se conoce su potencia, su estructura, su estabilidad y su precisión en términos de tiempo y frecuencia, el parámetro de potencia utilizado para la estimación de la distancia entre el eNodeB y el UE es el RSRP. Este se utiliza, además de para el mencionado cálculo de la posición (potencia recibida proporcional a la distancia), para la selección de celda y el *handover* o traspaso [11], que es el instante en el cual un UE comienza a recibir más potencia de señal (un mayor RSRP) de un eNodeB diferente al que está conectado, y cambia la conexión al eNodeB del que está recibiendo más potencia.

Por último, se analiza la calidad de la señal transmitida con el parámetro RSRQ, el cuál proporciona información sobre la interferencia y la intensidad de la señal deseada, ya que es una relación entre el RSRP y el RSSI multiplicado por el número de RB medidos. Estos valores se miden en unidades logarítmicas (dBms si son potencia y dBs si es una relación).

Al ser estos valores negativos, en LTE se ha establecido un valor positivo proporcional al RSRP, la Unidad de Fuerza Arbitraria (ASU, *Arbitrary Strength Unit*), el cual se calcula sumando 140 al valor del RSRP.  $ASU = RSRP (dBm) + 140$ .

La calidad de la señal correspondiente a los parámetros se resume en la Tabla 2.3.

CALIDAD	RSSI (dBm)	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	ASU
Excelente	Mayor que -65	Mayor que -80	Mayor que -10	Mayor que 60
Buena	Entre -65 y -75	Entre -80 y -90	Entre -10 y -15	Entre 50 y 60
Media	Entre -75 y -85	Entre -90 y -100	Entre -15 y -20	Entre 40 y 50
Baja	Menor que -85	Menor que -100	Menor que -20	Menor que 40

**Tabla 2.3.-** Calidad de la señal en función del valor de los parámetros.

### 2.1.2.- Parámetros de identificación de la red.

Para establecerse el enlace, el parámetro principal es el RSRP, por el cual el UE elige el eNB del que más RSRP esté recibiendo. Sin embargo, un UE no se conecta a cualquier eNB. Como se explicó en el Capítulo anterior, los parámetros de identificación de un eNB se rigen por la jerarquía de la Figura 1.6:

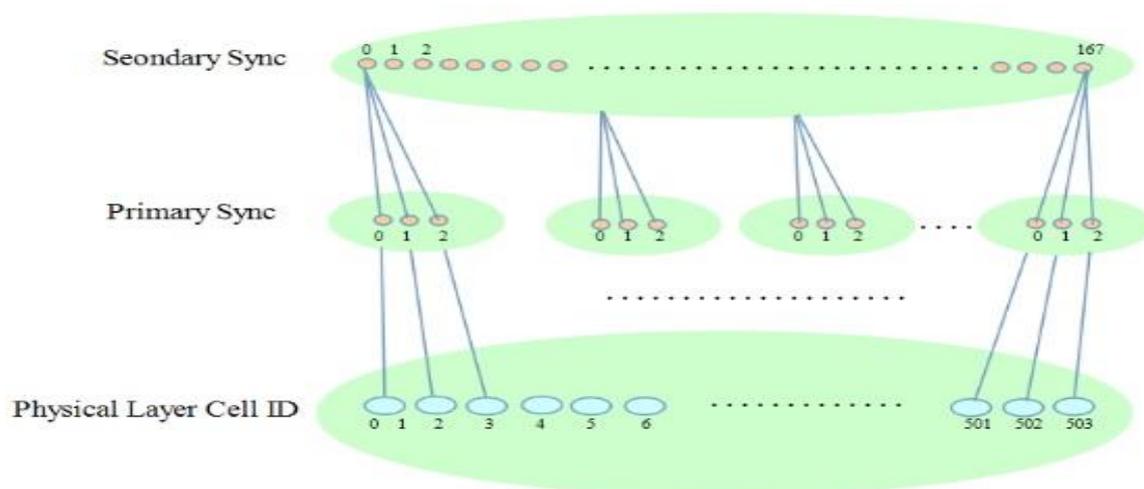
- En primer lugar, está el Código del País del Móvil (**MCC**, *Mobile Country Code*). Este sirve para identificar el país del eNB al que está conectado el UE. Es un código de 3 cifras, el cuál en España es el 214, en Italia el 222 y en Francia el 208.
- El segundo es el Código de la Red del Móvil (**MNC**, *Mobile Network Code*). Este sirve para identificar una operadora ya dentro de un MCC. Es un código que varía de 2 a 3 cifras siendo en España Vodafone el 01, Orange el 03, Movistar el 07...
- En tercer lugar, está el Código del Área de Localización (**LAC**, *Location Area Code*). Este código, el cual tiene un máximo de 5 cifras, sirve para identificar un área geográfica dentro de un país y con una operadora en concreto, ya que no todas usan la misma codificación. Es similar al código postal (CP) empleado para distribución por las empresas de mensajería y correos. En LTE se conoce por el Código del Área de Seguimiento (**TAC**, *Tracking Area Code*).
- El cuarto es el Nodo Base Evolucionado (**eNB**, *evolved Node Base*) el identificador de la estación base. Este se asigna una vez es conocida la ubicación geográfica, ya que así se reduce considerablemente el tamaño del identificador. El tamaño del ID del eNB es de 6 cifras. Puede repetirse en países y redes diferentes, pero es único dentro de un MCC y MNC. Es reseñable que el ID del eNB varíe de una compañía a otra cuando están ambos transmisores en la misma ubicación física.

- Por último, está el Identificador de la Celda (**CID**, *Cell Identifier*). Este parámetro indica el sector al que da cobertura un eNB concreto dentro un LAC. Generalmente, los Cell ID terminados en 0 indican que es un sector omnidireccional, es decir que el eNB da señal en 360°. Si el CID termina en 1, 2 o 3, que son las terminaciones más comunes, aunque no las únicas, indica que el eNB es trisectorial. El terminado en 1 abarca desde 0 a 120°, en 2 desde 120 a 240°, y finalmente, en 3, de 240 a 360°. Esto suele utilizarse en la identificación de las celdas por parte de los eNB, pero no es siempre así, ya que, en ocasiones, el CID 11 puede indicar el sector Norte de un eNB, mientras que, en otro eNB, el CID 11 puede indicar el sector Sur.

GENERACIÓN	LONGITUD	RANGO CID
2G y 3G	16 bits	0 a 65535
4G	8 bits	0 a 255

**Tabla 2.4.-** Rango de valores y longitud de bits que puede tomar el CID según la generación móvil.

El concepto de CID es susceptible de confundirse con el Identificador de Celda Físico (PCI, *Physical Cell Identifier*), el cual es un identificador de la celda, pero a nivel de capa física. Se calcula a partir de las Señales de Sincronización Primaria (PSS, *Primary Synchronization Signal*) y Secundaria (SSS, *Secondary Synchronization Signal*). Los valores de cada señal van desde 0 hasta 2 para la PSS, y desde 0 hasta 167 para la SSS. Se calcula multiplicando la SSS por 3 y sumando la PSS, como se puede ver en la Figura 2.4.



**Figura 2.4.-** Cálculo del PCI a partir de la PSS y la SSS.

Sin embargo, existen algunos que combinan MCC, MNC, LAC, eNB, CID... cómo:

- El Identificador de Celda Evolucionado (**ECI**, *Evolved-UTRAN Cell Identifier*). Específico de 4G, este parámetro sirve para identificar de forma unívoca una celda, dentro de no solo un eNB, sino de un LAC. Este parámetro es combinación del eNB y del CID, ya que multiplica el valor del eNB por 256 y le suma el CID, dando lugar al ECI, siendo este valor único dentro de un mismo LAC.
- La Red Móvil Pública Terrestre (**PLMN**, *Public Land Mobile Network*), que identifica la red a la que estás conectado en un país. Concatena MCC con MNC.
- El Identificador de Área Local (**LAI**, *Location Area Identity*). Identifica globalmente un área geográfica concreta dentro de un país. Está formado por el PLMN y el LAC.
- El Identificador de Celda Global (**CGI**, *Cell Global Identity*). El valor de este parámetro identifica una celda en cualquier parte del mundo, ya que es la concatenación de varios de los parámetros descritos previamente con el ECI, el cual ya combina el eNB con el CID. Las combinaciones que dan lugar al CGI son:
  - En 3G (CGI):
    - el MCC, con el MNC con, el LAC y el CID.
    - el PLMN, el LAC y el CID.
    - El LAI y el CID.
  - En 4G (eCGI, evolved CGI) [12]
    - el MCC, con el MNC, el eNB y el CID.
    - el PLMN y el ECI.

Cabe reseñar que, para identificar correctamente un parámetro, este debe incluir correctamente todos sus dígitos, sin omitir los ceros. Por ejemplo, para identificar la PLMN de Movistar en España, cuyos parámetros son 07 y 214, respectivamente, su correcto PLMN sería 21407 y no 2147. Esta regla se debe de seguir también para el resto de los parámetros.

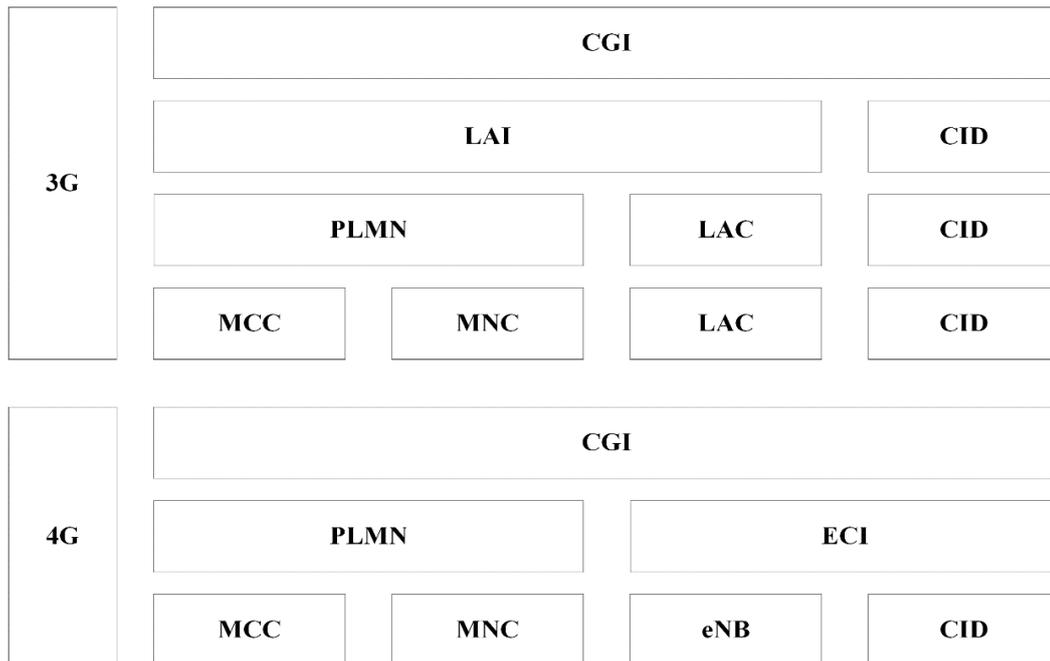


Figura 2.5.- Esquema de la combinación de los parámetros que identifican un terminal.

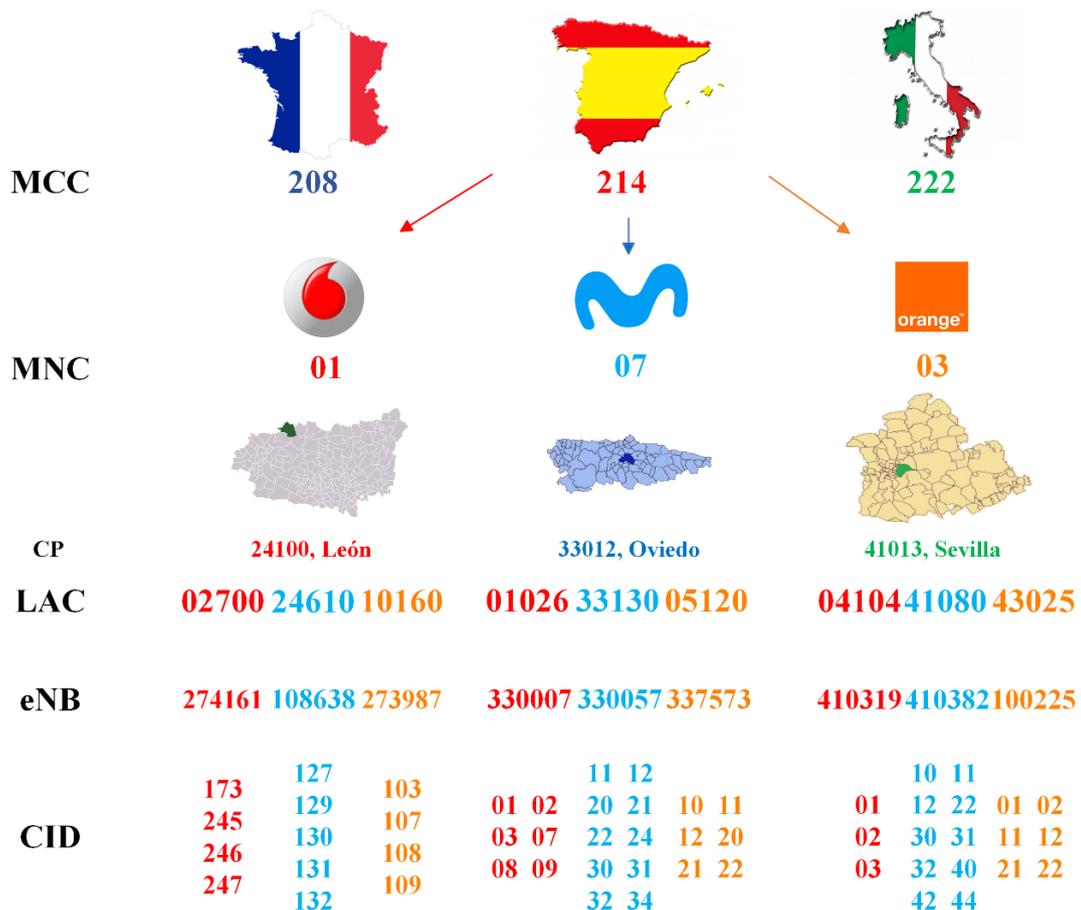


Figura 2.6.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal (1).

MCC	MNC	PLMN
214	01	21401
	07	21407
	03	21403

Tabla 2.5.- Esquema del desarrollo de los parámetros de un dispositivo con MCC de España.

CP	LAC	LAI
LEON 24100	02700	2140102700
	24610	2140724610
	10160	2140310160
OVIEDO 33012	01026	2140101026
	33130	2140733130
	05120	2140305120
SEVILLA 41013	04104	2140104104
	41080	2140741080
	43025	2140343025

Tabla 2.6.- Esquema del desarrollo de los parámetros de un dispositivo con MCC de España (2).

En el CP 33012, se encuentran las estaciones base que se muestran en la Tabla 2.7 con algunas de sus celdas.

eNB	CID	ECI
330007	01	84481793
	02	84481794
330057	11	22
	12	22
337573	20 (acaba en 0, sería omnidireccional)	86418708
	21	86418709
	22	86418710

Tabla 2.7.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal de España conectado a un eNB ubicado en el Código Postal 33012.

La recopilación de los valores de todos los parámetros anteriores forma el eCGI, Tabla 2.8, que es el Identificador Global de la Celda Evolucionado.

MCC	MNC	LAC	eNB	CID	eCGI
214	01	01026	330007	01	2140154785
				02	21401547854
	07	33130	330057	11	2140784494603
				12	2140784494604
	03	05120	337573	20	2140386418708
				21	2140386418709
				22	2140386418710

Tabla 2.8.- Esquema del desarrollo de los parámetros que identifican un terminal (2).

## 2.2.- TÉCNICAS DE LOCALIZACIÓN EN REDES 4G.

### 2.2.1.- CGI-TA (Cell Global Identity – Timing Advance)

Gracias a los parámetros de identificación de red es posible conocer la posición aproximada en la que se encuentra el UE.

En primer lugar, el MCC y el LAC nos aportan el país y el área geográfica del eNB al que estamos conectados, junto con el MNC que aporta el operador. El resto son el:

- **eNodeB:** Es la estación base a la que está conectado el terminal móvil. Es único dentro de un mismo PLMN (MCC + MNC). Conociendo su identificador junto al PLMN, podremos conocer, de una forma aproximada, el área geográfica en la que se encuentra el terminal. Este identificador tiene 6 dígitos, de la forma eNB: ABCDEF. Estos dígitos tienen un significado. La combinación AB indica la ciudad en la que se encuentra el eNB, al igual que el LAC, de ahí su correlación en los de Movistar. El dígito F indica si el eNB es interior (0) o exterior (1-9).

- **Cell ID:** Es el área en la que se dividen las diferentes celdas que pertenecen a una estación base. Este tiene 8 bits (3 dígitos), entre 0 y 255 en las redes LTE. Los eNB suelen ser trisectoriales, por lo que delimitan un poco más el área en el que se encuentra el terminal. Los primeros 120° tienen la estructura X1, con los siguientes 120° X2, y los últimos hasta 360, X3.
- **Timing Advance:** Una vez conocida la estación base y su celda, con el parámetro del TA se puede estimar la distancia a la que se encuentra el terminal del nodo base.

El TA es un retardo temporal (*offset*) que se introduce en el enlace ascendente para compensar el retardo que se produce al propagarse de la señal. Cuanto más lejos del eNB esté el UE, mayor será el valor del Timing Advance, ya que el retardo de propagación es mayor. De esta forma se concluye que, al ser el retardo proporcional a la distancia, también lo es el TA. El eNB estima el valor del TA a partir de la medida del canal físico durante un evento, por ejemplo, en un traspaso de celda (*handover*). Si el UE permanece conectado a la misma celda del eNB durante un tiempo prolongado, el eNB realiza actualizaciones del TA para estimar con más precisión el retardo de señal, pero no es un valor que se actualiza frecuentemente (cada pocos segundos).

El TA es un valor comprendido entre 0 y 1082, ya que la respuesta de acceso aleatorio (RAR, *Random Access Response*) que envía el eNB al UE tiene un tamaño de 11 bits. El comando TA indica el cambio del retardo del UL con el actual retardo como múltiplo de 16. Por tanto, el cambio del retardo es igual a 16 veces el periodo de la subportadora, siendo  $T_S$  igual a la inversa del producto entre la frecuencia de la subportadora (15 kHz) y el número de muestras utilizando la transformada rápida de Fourier (FFT), 2048.

$$N_{TA} = 16 \cdot T_S \mid T_S = \frac{1}{f_S \cdot N} = \frac{1}{15e3 \cdot 2048} = \frac{1}{30,72e6} = 32,6ns \mid N_{TA} = 16 \cdot 32,6ns = 520,8 ns$$

**Ecuación 2.1.-** Cálculo del mínimo retardo de propagación de una señal.

Esto implica que, para cada valor del TA, su retardo de propagación es proporcional a medio  $\mu s$ . Como se trata de una señal electromagnética, su velocidad de propagación es la velocidad de la luz,  $c$ .

Conocidos el tiempo y la velocidad, se puede conocer la distancia a la que se encuentra el UE del eNB para cada valor del TA. La mínima distancia medible sería para el TA con valor 1 [13]:

$$c = \frac{d_{min}}{N_{TA}} \rightarrow d_{min} = c \cdot N_{TA} = 3e8 \frac{m}{s} \cdot 5,208e-7 s = 156,25 m$$

**Ecuación 2.2.-** Cálculo de la mínima distancia de ida y vuelta de una señal.

Este resultado sería para el trayecto de ida y vuelta de la señal entre el eNB y el UE. Para 1 viaje sería, tanto el retardo de propagación como la distancia, la mitad. El retardo sería de 260,4 ns por TA, mientras que la distancia entre eNB y UE para TA=1 es 78,13 m.

Con este dato podemos estimar con una cierta precisión, si el cálculo ha sido bueno, la distancia del enlace. Como el máximo valor posible es 1282, la máxima distancia medible es de . Si el valor que nos da el eNB de TA es de 23 por ejemplo, la distancia del UE al eNB sería de 1796,9 m (1,8 km aproximadamente).

En la Figura 2.7 se observa que ocurre cuando no se utiliza el TA y su diferencia cuando sí se utiliza. El eNB determina una ventana temporal para la recepción de los datos del UE. Si el TA no se tuviera en cuenta, no todos los datos transmitidos por el UE se recibirían correctamente, ya que algunos no entrarían en dicha ventana temporal.

Utilizando el Timing Advance, el UE se adelanta en la transmisión de la trama el número de veces que indica el valor del TA multiplicado por el retardo temporal de ida y vuelta, 520,8ns, ya que la señal se retarda en el DL (eNB-UE) y en el UL (UE-eNB).

El método CGI-TA para estimar la localización del UE se muestra en la Figura 2.8. El CGI nos da la información del país, la red, la estación base y la celda a la que está conectada el UE. El eNodeB (6 dígitos) tiene la estructura ‘ABCDEF’ mientras que el Cell ID, en LTE, puede tener hasta 256 combinaciones. Si el eNodeB es trisectorial, el valor del CID termina en 1, 2 o 3, por tanto, con la estructura MN1, MN2 o MN3, sino será ‘MNÑ’.

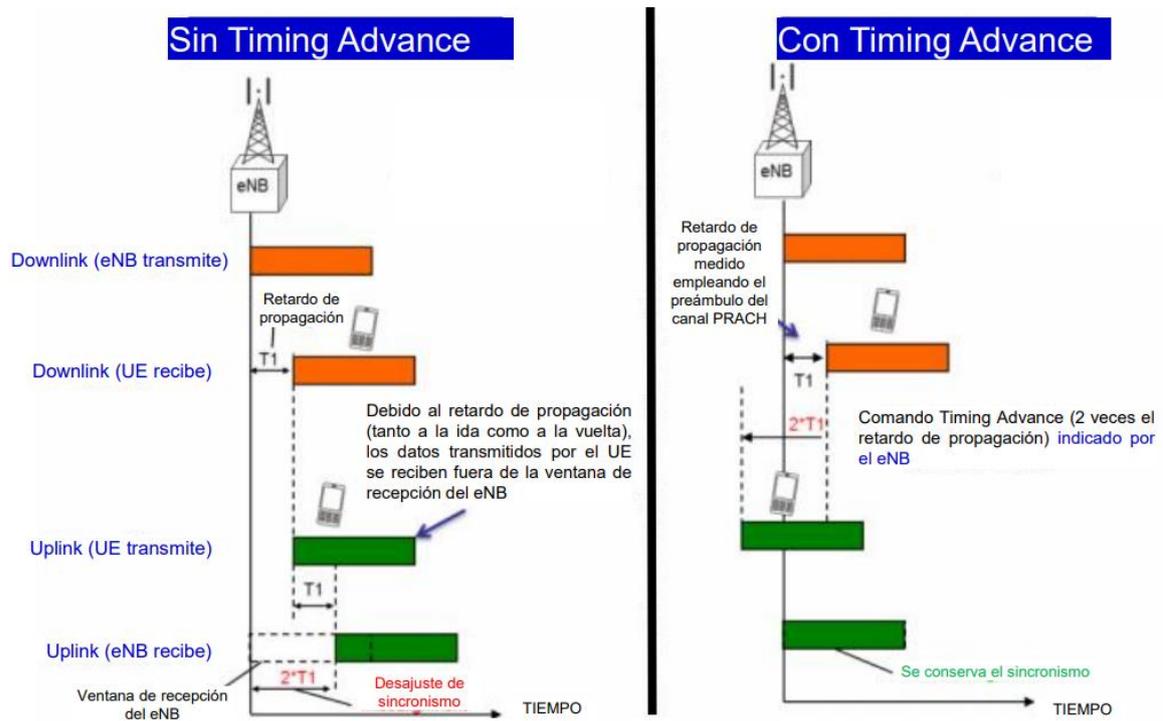


Figura 2.7.- Comparación en la recepción de una trama aplicando el método del TA.

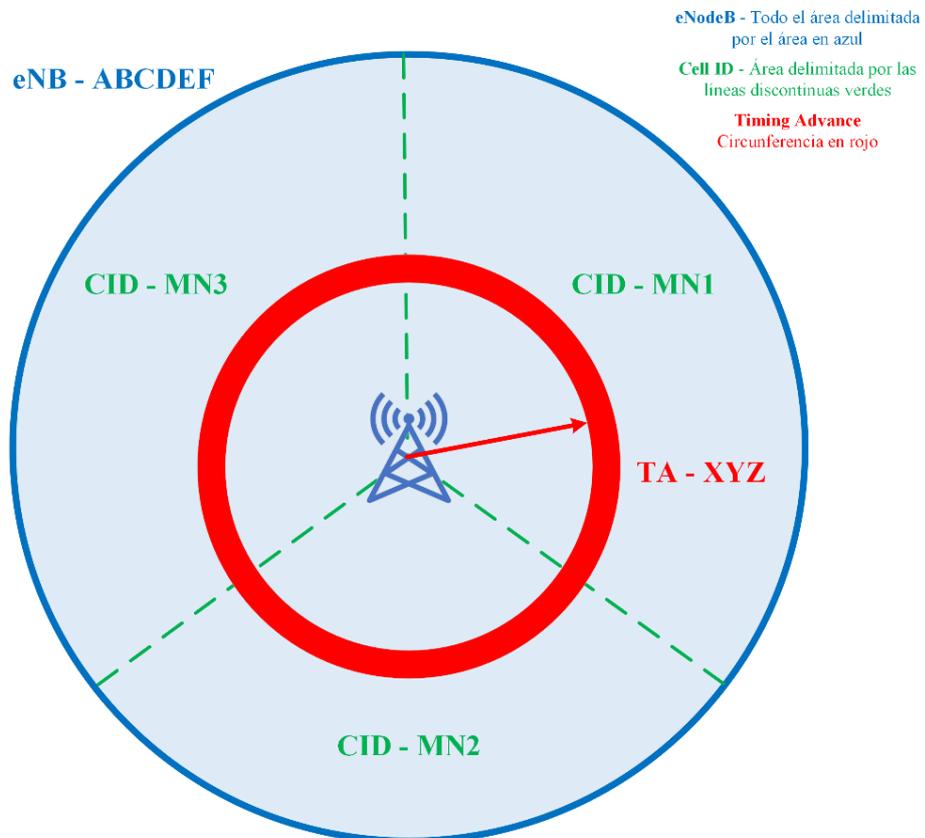
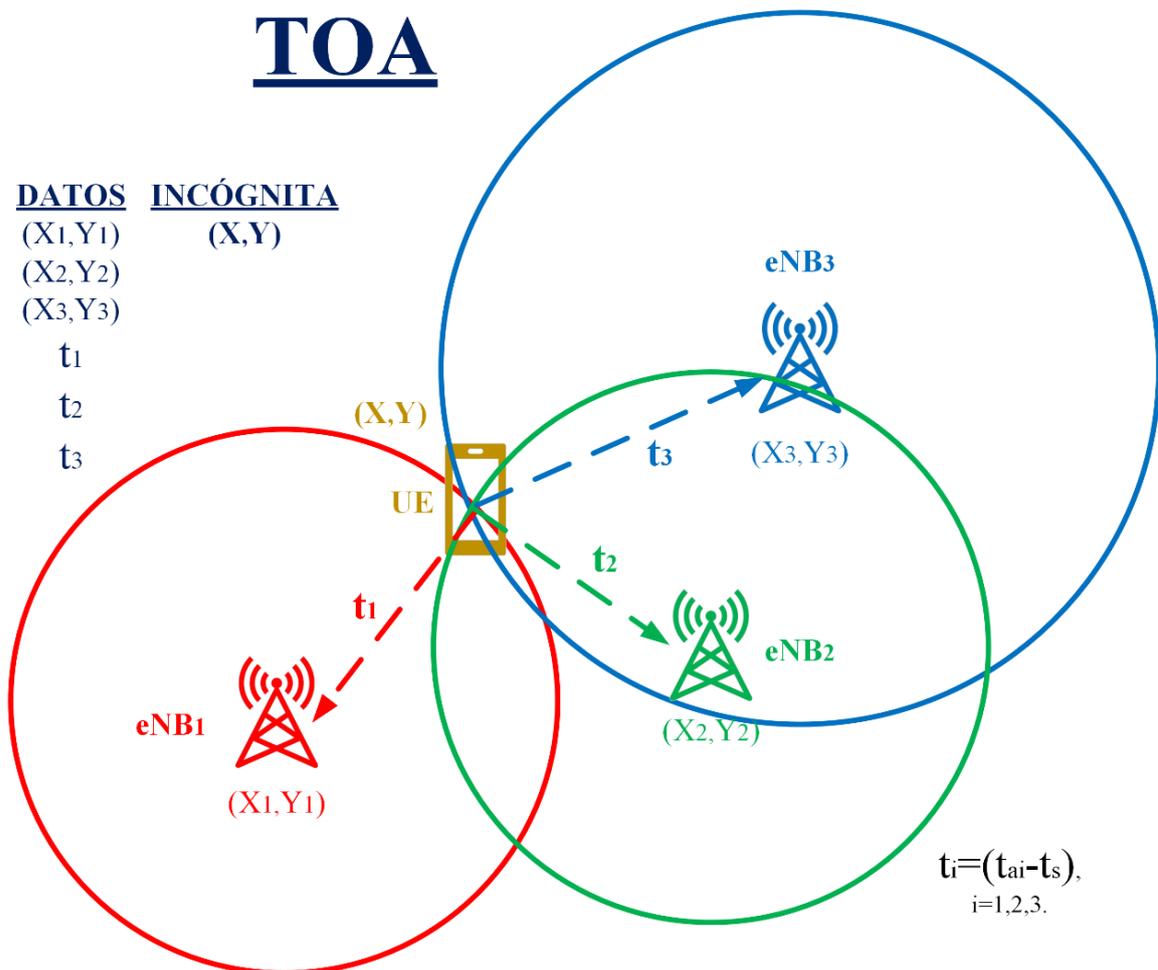


Figura 2.8.- Ilustración del método CGI-TA.

### 2.2.2.- TOA (Time Of Arrival)

El tiempo de llegada es una técnica que consiste en medir el tiempo que tarda la señal en viajar desde el UE hasta el eNB. Conocidos los tiempos a 3 eNB diferentes, es posible trilaterar la posición del UE mediante 3 circunferencias de radio igual al producto entre la velocidad de la luz,  $c$ , y el tiempo que tarda en transmitirse la señal. Este se ilustra en la Figura 2.9. Sin embargo, este método tiene ciertos inconvenientes.



**Figura 2.9.-** Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método TOA.

El primero de ellos es la fiabilidad del tiempo de transmisión. Para una trilateración precisa, los relojes implicados tienen que estar lo más sincronizados posibles, debido a que es necesario conocer para el cálculo tanto el tiempo de llegada, como el tiempo de transmisión del UE. Parece algo irrelevante, pero al transmitirse a la velocidad de la luz, una diferencia de 1  $\mu$ s en el tiempo deriva en un error de 300 metros en distancia.

El segundo afecta al rendimiento del método, ya que tanto el efecto multicamino como la presencia de NLOS pueden provocar variaciones en el cálculo de la distancia.

En la Figura 2.9 se puede ver el cálculo gráfico de la posición del UE. Para calcularlo de forma analítica es necesario conocer los tiempos de transmisión entre UE y eNB. Conociendo el tiempo que tarda en transmitirse la señal,  $t_i$ , junto con la ecuación de la distancia entre un eNB<sub>*i*</sub> y el UE, es posible determinar la posición del UE. Las ecuaciones que proporcionan la distancia a partir del tiempo medido se indican desde la Ecuación 2.3 hasta la Ecuación 2.5, donde el subíndice  $n$  hace referencia al eNB considerado ( $n = 1, 2, \dots, N$ , siendo  $N$  el número de eNB empleados para calcular la posición).

$t_n = t_{arrival(n)} - t_{sent}$ <p><b>Ecuación 2.3.-</b> Tiempo de transmisión.</p>	$d_n = t_n * c$ <p><b>Ecuación 2.4.-</b> Cálculo de <math>d_n</math>.</p>	$d_n = \sqrt{(X_n - x)^2 + (Y_n - y)^2}$ <p><b>Ecuación 2.5.-</b> Distancia de transmisión.</p>
---	---	---

Tras el desarrollo de las ecuaciones previas, que se pueden consultar en el Anexo 7.1, se obtiene el siguiente sistema no lineal de ecuaciones (Ecuación 2.6):

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_2^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_3^2) \end{bmatrix}$$

**Ecuación 2.6.-** Sistema de ecuaciones del TOA.

Introduciendo las posiciones de los eNB, así como las distancias que hay entre los eNB y el UE, se puede resolver el sistema de ecuaciones para obtener los valores  $x$  e  $y$  de la posición del UE.

### 2.2.3.- TDOA (Time Difference Of Arrival)

La diferencia en el tiempo de llegada es el método que soluciona el problema del sincronismo debido a que no necesita conocer el tiempo en el que se transmite la señal, simplemente son necesarios los tiempos de llegada de la transmisión entre UE y eNBs.

La técnica necesita del UE y de 3 eNBs para calcular la diferencia en tiempos de llegada. Estas son la diferencia de tiempo  $\Delta t_{12}$  entre el eNB<sub>1</sub> y el eNB<sub>2</sub>, así como las  $\Delta t_{13}$  y  $\Delta t_{23}$ . Multiplicando el valor por la constante  $c$ , se obtiene la diferencia de distancias entre eNBs. La diferencia de distancia, entre eNB<sub>1</sub> y eNB<sub>2</sub>, es la resta entre la distancia del eNB<sub>2</sub> al UE y la distancia del eNB<sub>1</sub> al UE.

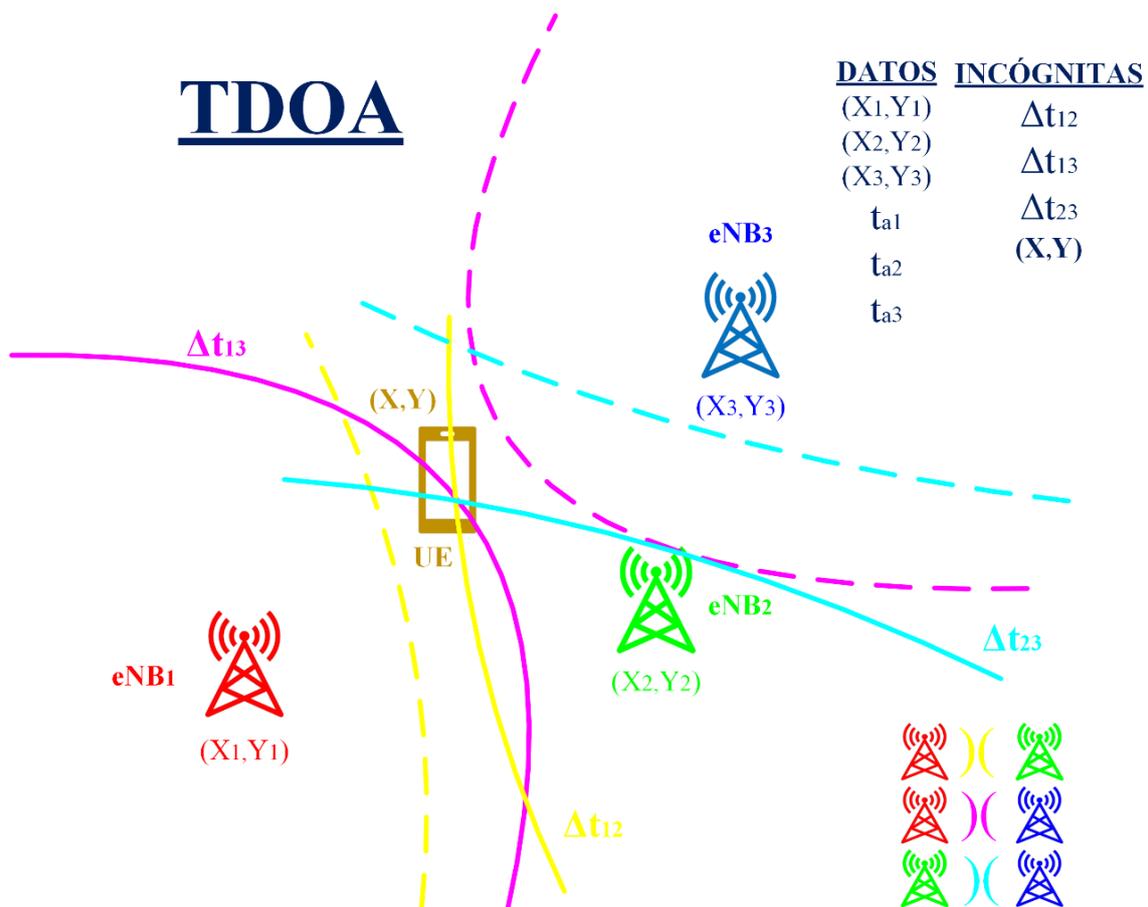


Figura 2.10.- Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método TDOA.

Las ecuaciones resultantes forman un sistema de trilateración hiperbólica como se observa en la Figura 2.10, donde el punto de intersección entre las 3 hipérbolas determina la ubicación del UE. Cada combinación de eNBs da lugar a una hipérbola, cuyos focos son la posición de los mismos eNBs.

En la Figura 2.10 se observa el cálculo gráfico de la localización. Para resolverlo de forma analítica es necesario determinar el sistema de ecuaciones formado por las diferencias de distancia, en cual se indica en las siguientes ecuaciones (2.7, 2.8 y 2.9).

$\Delta t_{12} = t_{a2} - t_{a1}$	$\Delta d_{12} = \Delta t_{12} * c$	$\Delta d_{12} = \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2} - \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2}$
$\Delta t_{13} = t_{a3} - t_{a1}$	$\Delta d_{13} = \Delta t_{13} * c$	$\Delta d_{13} = \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2} - \sqrt{(X_1 - X)^2 + (Y_1 - Y)^2}$
$\Delta t_{23} = t_{a3} - t_{a2}$	$\Delta d_{23} = \Delta t_{23} * c$	$\Delta d_{23} = \sqrt{(X_3 - X)^2 + (Y_3 - Y)^2} - \sqrt{(X_2 - X)^2 + (Y_2 - Y)^2}$
<b>Ecuaciones 2.7.-</b> Diferencia entre tiempos de llegada.	<b>Ecuaciones 2.8.-</b> Distancia entre eNBs.	<b>Ecuaciones 2.9.-</b> Distancia entre eNBs.

Tras realizar las operaciones detalladas en el Anexo 7.2, el sistema de ecuaciones está formado por 3 incógnitas:  $x$  e  $y$  junto la distancia entre el eNB<sub>1</sub> y el UE.

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & \Delta d_{12} \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & \Delta d_{13} \\ X_3 - X_2 & Y_3 - Y_2 & \Delta d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{12}^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{13}^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 - \Delta d_{23}^2) - \Delta d_{23} \cdot \Delta d_{12} \end{bmatrix}$$

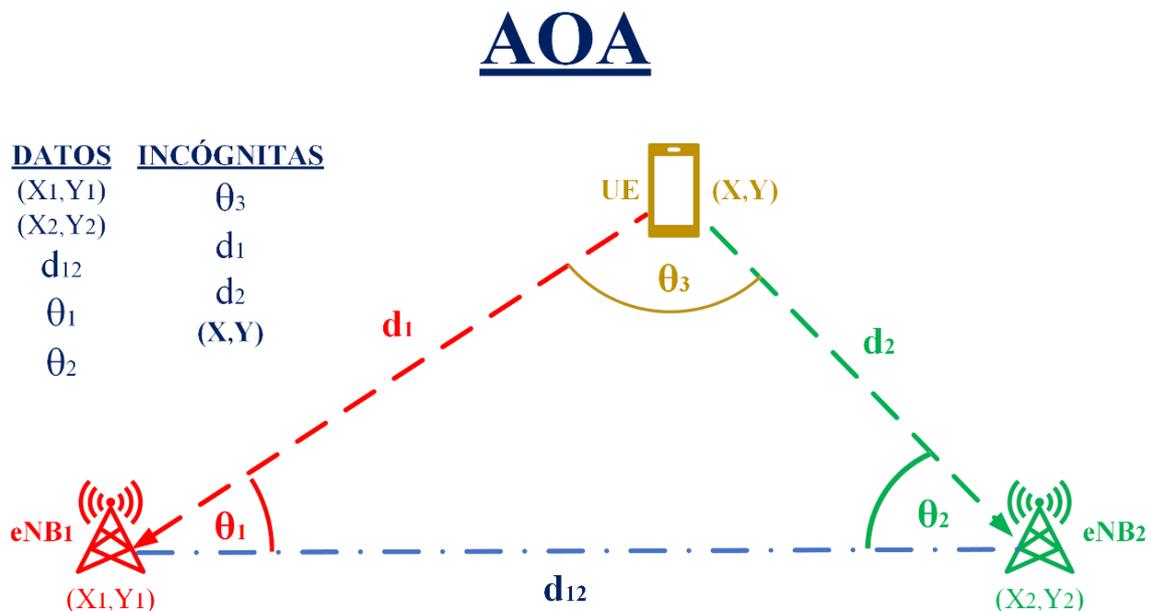
**Ecuación 2.10.** Sistema de ecuaciones del TDOA.

Introduciendo las posiciones de los eNB, así como las diferencias de distancia entre ellos y el UE, se obtienen los valores  $x$  e  $y$  de la posición del UE.

Este método presenta una ventaja respecto al TOA, que es que no tiene el problema del sincronismo. Sin embargo, el multicamino y el NLOS pueden producir variaciones en la estimación.

### 2.2.4.- AOA (Angle Of Arrival)

La técnica del ángulo de llegada, a diferencia del TOA y del TDOA, no requiere del conocimiento de los tiempos de transmisión o de llegada. Por su parte, es necesario tener en los eNBs antenas características (arrays), con las que saber por dónde se recibe la señal. Para el cálculo de la posición a través del método del AOA, es necesario conocer tan solo la posición de 2 eNBs, 1 menos que en los que se requieren tiempos. Con la posición de los eNBs, la distancia entre ellos, y los ángulos que forman las señales recibidas desde el UE con la línea que une ambos eNBs, es posible determinar la ubicación de forma analítica. La gráfica que ilustra el método se puede ver en la Figura 2.11.



**Figura 2.11.-** Representación del cálculo gráfico de la localización del UE mediante el método AOA.

De forma analítica, el desarrollo para determinar el sistema de ecuaciones que devuelve la posición del UE se puede consultar en el Anexo 7.3. Existen 2 formas para calcularla, dependiendo del eNB con el que se realice el cálculo, que son la Ecuación 2.11:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_1 \\ Y_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 - d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_2 \\ Y_2 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

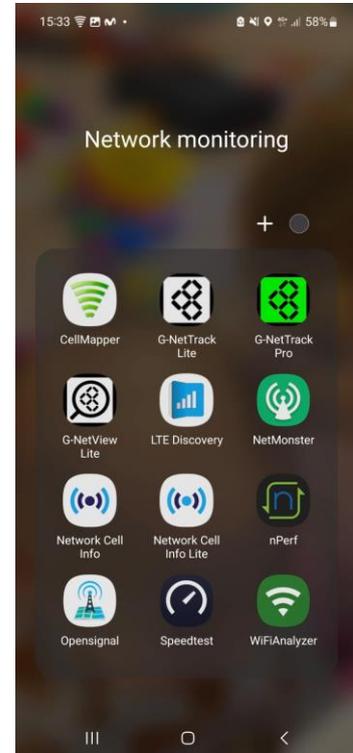
**Ecuación 2.11.** Sistema de ecuaciones del AOA.

## 2.3.- APLICACIONES MÓVILES EMPLEADAS PARA ACCEDER A LOS PARÁMETROS DE LA CAPA FÍSICA

De las técnicas de localización vistas en el apartado 2.2, a la única a la que se tiene acceso como usuario mediante aplicaciones móviles es la del CGI-TA, al ser posible acceder a los parámetros de la capa física, pero no a los tiempos de transmisión y recepción de señal.

Existen varias aplicaciones que proporcionan estos datos, aunque unas dan más información que otras. Su instalación está limitada a dispositivos Android. Algunas de estas son (Figura 2.12): ‘*Network Cell Info*’, ‘*LTE Discovery*’, ‘*NetMonitor*’, ‘*CellMapper*’ o ‘*GNet Track*’.

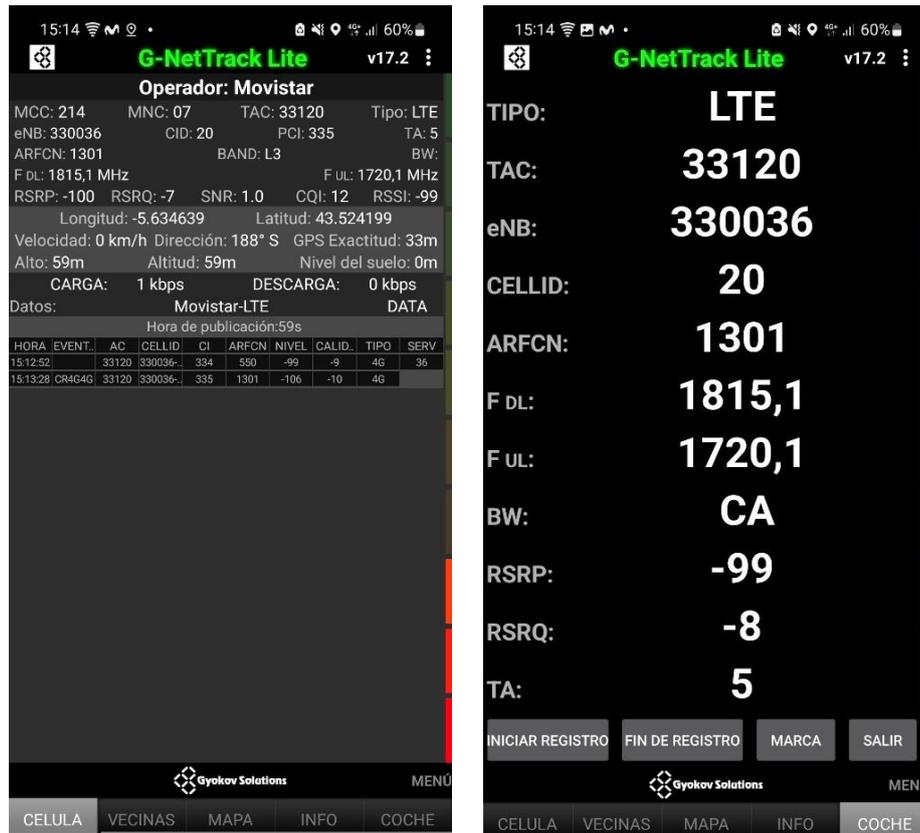
**Figura 2.12.-** Algunas aplicaciones para monitorización y medida de parámetros de la red de telefonía móvil y redes inalámbricas.



### 2.3.1.- GNet Track.

Se trata de la aplicación que proporciona la mayor cantidad de información sobre los parámetros de la capa física. Se pueden visualizar los datos en la propia aplicación móvil en tiempo real, pero también se puede realizar un registro de los datos e importarlo a un ordenador para su posterior procesamiento, como se ha realizado en este proyecto. En la Figura 2.13. se puede observar la interfaz gráfica de la aplicación móvil.

En la mayoría de las ocasiones, procesar esta información en tiempo real se vuelve complejo, ya que habría que conocer la identificación de todos los eNB, de los CID, etc. Para ello, realizar un registro de los datos, nos permite analizar la información de las conexiones a los diferentes eNB por parte de un UE. Los datos se almacenan en ficheros de texto, que se pueden convertir en hojas de cálculo y procesarlos en herramientas software como *MatLab* [21]. En la Figura 2.14 se puede ver la estructura de un registro de datos (*logs*) en una hoja de cálculo.



**Figura 2.13.-** Capturas de pantalla de la aplicación *GNet Track*. Ventanas ‘Celula’ o ‘Cell’ (izquierda), y ‘Coche’ o ‘Drive’ (derecha).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Timestamp	Longitude	Latitude	Operatormname	Operator	CGI	Node	CellID	LAC	NetworkTech	NetworkMode	Level	ARFCN	Altitude	TA
2	2022.11.12_15.27.30	-5,672134	43,500138	Movistar	21407	214073312100031	330042	31	33121	4G	LTE	-107	6400	117	28
3	2022.11.12_15.27.30	-5,672065	43,500401	Movistar	21407	214073312100031	330042	31	33121	4G	LTE	-113	6400	117	28
4	2022.11.12_15.27.31	-5,671986	43,500661	Movistar	21407	214073312100031	330042	31	33121	4G	LTE	-113	6400	118	28
5	2022.11.12_15.27.32	-5,671890	43,500919	Movistar	21407	214073312100031	330042	31	33121	4G	LTE	-123	6400	118	28
6	2022.11.12_15.27.33	-5,671890	43,500919	Movistar	21407	214073312000031	330025	31	33120	4G	LTE	-116	6400	118	
7	2022.11.12_15.27.33	-5,671788	43,501177	Movistar	21407	214073312000031	330025	31	33120	4G	LTE	-116	6400	119	
8	2022.11.12_15.27.34	-5,671685	43,501431	Movistar	21407	214073312000031	330025	31	33120	4G	LTE	-113	6400	118	20
9	2022.11.12_15.27.35	-5,671572	43,501680	Movistar	21407	214073312000031	330025	31	33120	4G	LTE	-113	6400	118	20
10	2022.11.12_15.27.36	-5,671446	43,501924	Movistar	21407	214073312000031	330025	31	33120	4G	LTE	-112	6400	119	20
11	2022.11.12_15.27.37	-5,671446	43,501924	Movistar	21407	214073312000031	330018	31	33120	4G	LTE	-110	6400	119	

**Figura 2.14.-** Fichero con los logs realizados por la aplicación *GNet Track*.

En la Tabla 2.9 se muestran los diferentes parámetros proporcionados por la aplicación que son útiles para la geolocalización del UE mediante el CGI-TA.

Marca temporal	Latitud GPS	Longitud GPS
CGI	MCC	MNC
LAC	eNB	CID
Generación móvil	RSRP	TA

**Tabla 2.9.-** Principales parámetros que recopila la aplicación *GNet Track*.

Además, la app *GNetTrack* [6] proporciona, según la compatibilidad del dispositivo con el que se realizan las medidas, varios datos de estaciones vecinas. Como se ve en la Figura 2.15, el UE con el que se ha realizado el registro, un *Samsung Galaxy A51*, tan solo ofrece los datos de nivel de señal RSRP que recibe de otros eNB, pero no indica ningún parámetro de la capa física con el cuál poder realizar los cálculos para conocer de qué eNB vecino es dicho RSRP.

Si se conociese dicha información de los eNB vecinos, se podría trilaterar la posición de un UE trazando circunferencias de radio proporcional al TA o RSRP medido en cada eNB.



**Figura 2.15.-** Ventana 'Vecinos' o 'Nei (Neighbors)'.

### 2.3.2.- CellMapper.

Otra de las aplicaciones utilizadas para monitorizar ha sido *CellMapper* [14]. Aunque ofrezca menos información que *GNetTrack* [6], se ha utilizado para corroborar los parámetros que *GNetTrack* [6] aportaba. Entre sus ventajas está la posibilidad de visualizar directamente el RSRP de los eNB vecinos, pero sin conocer la identificación de estos.

Además, nos muestra nuestra ubicación (basada en los datos de posicionamiento por GNSS) junto con el área que cubren las celdas del eNB al que está conectado el UE. Cabe reseñar que este mapa es colaborativo, es decir, el área de las celdas se va creando a medida que los usuarios añaden sus registros. Si es un eNB del que se ha añadido un número de registros considerable, la precisión del área de cada celda será mejor que la de un eNB que ha tenido pocos registros. También, el área de las celdas se puede superponer al registrar *logs* en ubicaciones similares.

En la Figura 2.16 se pueden observar los parámetros que ofrece la aplicación y el mapa de celdas.

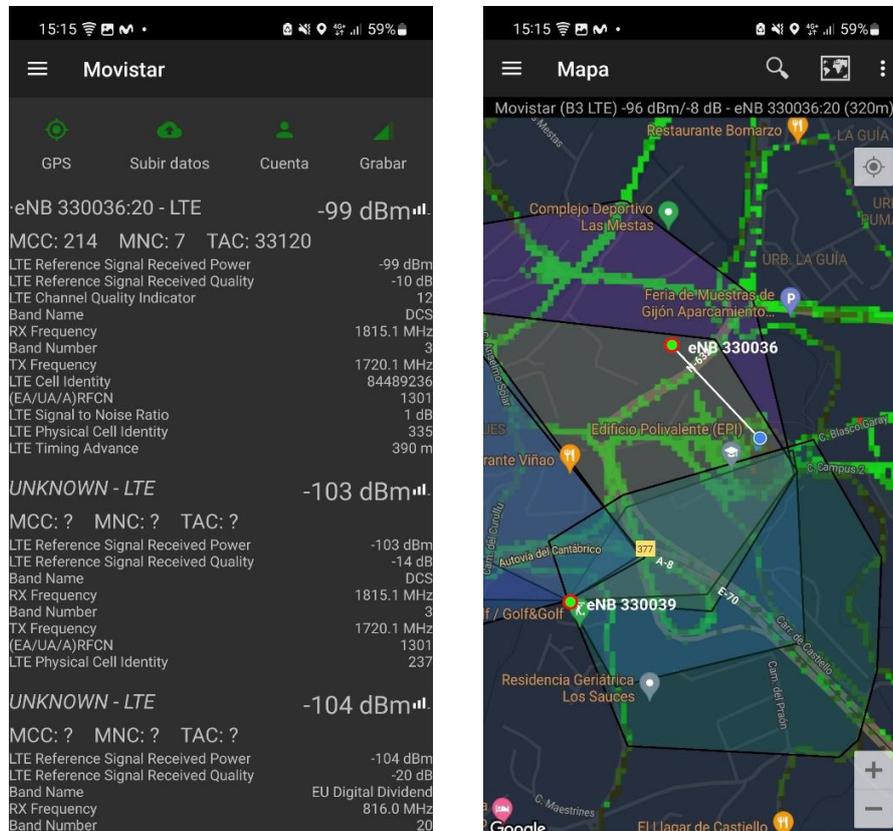


Figura 2.16.- Capturas de pantalla de la aplicación Cell Mapper.

A la hora de exportar los registros para procesarlos, se ha observado que la información proporcionada por esta aplicación era más escasa. Por ello, *GNetTrack* [6] ha sido la aplicación que proporciona registros de medidas con la cual se han realizado los métodos para estimar la localización del UE.

## 3. Métodos implementados.

### 3.1.- CONSIDERACIONES GENERALES.

Uno de los objetivos del presente TFG es la geolocalización de los UE conectados a una red de telefonía móvil empleando únicamente los parámetros de capa física accesibles desde el propio UE. En base a dicha información, en este TFG el método empleado para la geolocalización ha sido el CGI-TA. Este método nos permite identificar las estaciones base que forman la red móvil y, junto con el parámetro medido TA y/o el parámetro RSRP, poder estimar la localización del dispositivo móvil de la manera más precisa posible.

Para la implementación de este método, es importante tener en cuenta que:

1. No se ha encontrado ninguna base de datos (BBDD) accesible donde se almacene toda la información de las estaciones base (su identificador, sus coordenadas, etc.) necesaria para la implementación de los métodos propuestos en este TFG.
2. No se conoce el entorno donde se encuentra el UE, el cual podría dar lugar a efectos de multicamino. Tampoco se tienen en cuenta efectos meteorológicos (ej. atenuación por lluvia) que podrían afectar al parámetro RSRP principalmente.
3. Se ha circunscrito el estudio a métodos no estadísticos, es decir, no se ha realizado un modelado estadístico de toda la geografía ni nacional ni provincial. El estudio se ha realizado para un número determinado de transmisores ubicados en las inmediaciones de la autopista A-8, entre el Aeropuerto de Asturias y la ciudad de Gijón, así como en la propia ciudad de Gijón.
4. El estudio se ha realizado en España, con un MCC igual a 214, conectado a la red móvil Movistar, con un MNC igual a 07, y en el norte del Principado de Asturias. Casi todas las mediciones se realizaron cuando el UE estaba conectado a una red 4G LTE.

5. El número de eNB que han estado implicados en el estudio es cercano a la centena, junto con las respectivas celdas pertenecientes a cada uno de ellos.
6. Para poder implementar con fiabilidad este método en el área deseada, se requeriría una campaña de medidas muy extensa, que permitiera emplear también métodos como el *Received Signal Pattern Matching* (RSPM), que es una especie de método *fingerprinting* [15]. En este proyecto se ha realizado un estudio exhaustivo del RSRP en el área de interés, por lo que con los datos que se ha trabajado se deberían de obtener los resultados más precisos.

Como se ha explicado en el Capítulo 2, ni el dispositivo móvil, ni por tanto la aplicación *GNetTrack* [6], tiene conocimiento de los tiempos de transmisión o del ángulo por el que el UE recibe la señal. Por tanto, la geolocalización se limita a la técnica CGI-TA.

Aun así, para poder realizar la trilateración, es necesario conocer la información relativa a 3 eNBs, pero la aplicación *GNetTrack* sólo proporciona el TA y el RSRP asociado a un eNB. Si bien también proporciona el nivel de RSRP de los eNB vecinos, no se dispone de la identificación de dichos eNB, lo que dificulta significativamente su uso.

Se han implementado diferentes métodos derivados de la técnica CGI-TA, que se explicarán en los siguientes apartados del presente Capítulo 3.

### **3.2.- GENERACIÓN DE UNA BASE DE DATOS CON LAS COORDENADAS DE LAS CELDAS Y DE LAS ANTENAS.**

Una vez realizado el registro de las medidas con la aplicación *GNetTrack*, la siguiente tarea ha sido realizar el procesamiento de dichas medidas. En los registros o *logs* de datos, *GNetTrack* proporciona el MCC, MNC, LAC, eNB y CID en cada medida como parámetros de identificación del eNB, pero no ofrece el dato de la posición de este.

Para geolocalizar un UE, es necesario conocer la ubicación del eNB y así, conocidos los parámetros RSRP y/o TA, se podrá trazar una circunferencia con la distancia estimada a la que se encuentra el UE.

La posición de un eNB se puede consultar en BBDD online como *OpenCellID* [20] o *CellMapper* [14]. No obstante, para poder procesar las medidas es necesario disponer de una base de datos *ad-hoc* con las coordenadas de los eNB donde se han realizado las medidas con el UE. *OpenCellID* [20] permite descargar una BBDD que proporciona la ubicación de cada celda, pero no la del eNB, y *CellMapper* [14] no permite descargar su BBDD. Por tanto, en la investigación realizada en el marco del presente TFG no se ha encontrado ningún método para tener acceso directamente a la posición de los eNB.

La solución a esta limitación ha sido crear manualmente una BBDD. Esta se compone del LAC, el identificador del eNB, sus coordenadas (latitud y longitud), junto con una dirección. En la Tabla 3.1 se ilustran algunas de las filas de dicha BBDD.

LAC	eNB	LATITUD	LONGITUD	DIRECCIÓN
33120	330067	43,520206	-5,675269	Campo de Rocés, Montevil, Distrito Sur, Gijón, Asturias, 33210, España
33110	330082	43,558264	-5,867944	Vardasqueda, Gozón, Asturias, 33468, España
33110	330092	43,548239	-5,844675	Trasona - La Machina, El Cardusu, Carreño, Asturias, 33416, España
33110	330110	43,529778	-5,908194	Ralla, Corvera, Asturias, 33406, España
33110	330112	43,547175	-5,869392	ParqueAstur, El Cuetu, Trasona, Corvera, Asturias, 33416, España
33120	330115	43,540683	-5,642331	Hotel NH Gijón, La Guía, Distrito Rural, Gijón, Asturias, 33203, España
33110	330124	43,558500	-5,968583	San Miguel de Quiloño, Castrillón, Asturias, 33450, España
33110	330128	43,531969	-5,902692	Calle La Texera, Los Campos, Corvera, Asturias, 33406, España
33110	330134	43,500056	-5,791111	Camín de la Raposera, El Peridiellu, Gijón, Asturias, 33480, España
33121	330135	43,449908	-5,786458	Pruvia de Abajo, Soto de Llanera, Llanera, Asturias, 33423, España
33110	330143	43,570517	-5,953928	Salinas, Piedras Blancas, Castrillón, Asturias, 33405, España

**Tabla 3.1.-** Filas extraídas de la base de datos con la ubicación de los eNB.

Esta BBDD se ha realizado para un área geográfica limitada en donde se han tomado las medidas necesarias con el UE para el marco del TFG, ya que realizarlo para un ámbito provincial o nacional requeriría de una gran cantidad de tiempo, además de no ser muy relevante para las mediciones. Por tanto, se ha buscado cuáles eran los eNB presentes en los *logs* de medidas realizadas con la aplicación *GNetTrack* [6] y se han añadido a la BBDD las coordenadas de dichos eNB. El número total de eNB a las que se ha conectado el UE en las mediciones consideradas en el presente TFG ha sido de 70.

Como se ha indicado en el apartado 3.1, estas mediciones se han realizado en España conectado a la red de Movistar, por lo que esta BBDD solo sirve para este operador. Si se requiriese una BBDD nivel nacional de todos los eNB, bastaría con añadir una columna con el MNC, pero si fuera necesario realizar una a nivel mundial, habría que añadir también una columna para el MCC, aumentando en estos casos de manera exponencial el tamaño.

Se ha analizado también el número total de LAC a las que pertenecen los eNB de las mediciones, encontrándose que todos los eNB pertenecen a una de las siguientes cuatro LAC: 33110, 33120, 33121 y 33150.

Conocidas las coordenadas, ya se podría referenciar un eNB con su ubicación para así poder tener un punto de partida desde el que comenzar la geolocalización del UE, si bien todavía queda un aspecto a tener en cuenta, que se explica en el siguiente sub-apartado 3.2.1.

### **3.2.1.- Importación de la base de datos de *OpenCellId*.**

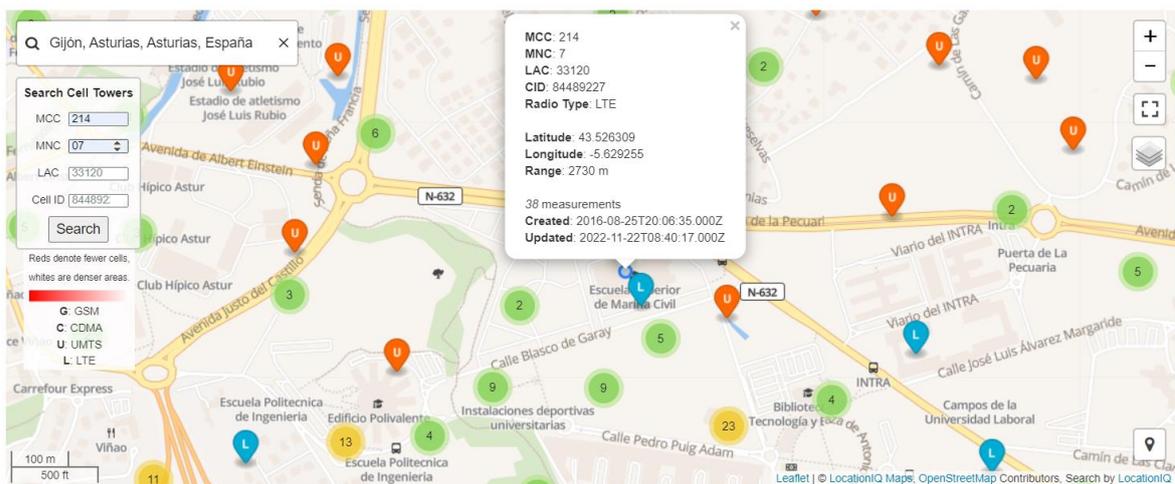
Al comenzar el desarrollo del TFG, se utilizó la BBDD de *OpenCellID* [20] para conocer la posición de la estación base. Esta BBDD, cuya interfaz se muestra en la Figura 3.1, ofrece las posiciones de las celdas en las diferentes tecnologías de las generaciones de telefonía móvil (2G, 3G, 4G, 5G). Un ejemplo se muestra en la Tabla 3.2.

*OpenCellID* [20], aparte de ofrecer la BBDD para su descarga, tiene una interfaz online en la que, introduciendo los parámetros de identificación de red en su correspondiente casilla, nos devuelve la posición de la celda sobre un mapa, junto a la información de esta,

así como de las celdas colindantes. En la Figura 3.1 se muestra una captura de la web, donde se pueden ver las celdas, con iconos haciendo referencia a su tecnología, junto a los parámetros que la identifican y la ubican.

TECNOLOGÍA	MCC	MNC	LAC	ECI	LATITUD	LONGITUD
GSM (2G)	214	07	22532	000065174	2,852326	42,477951
UMTS (3G)	214	07	02861	257463190	-3,711075	40,402513
LTE (4G)	214	07	47600	120352032	-4,740165	41,633129
NR (5G)	214	07	04111	949827741	-5,739115	37,149883

**Tabla 3.2.-** Filas extraídas de la base de datos de *OpenCellId*.



**Figura 3.1.-** Captura de pantalla de la web *OpenCellId*.

Al principio, el desconocimiento de parte de la nomenclatura, junto con la confusión que aportaban tanto las diferentes páginas de información sobre identificación de eNB como la propia aplicación *GNetTrack* [6], en la que denominaba a los parámetros erróneamente o con metodología de generaciones antiguas a LTE, fomentó el error en la referenciación de un *log* con su eNB correspondiente, dando lugar a errores en la ubicación del UE al no estar bien georreferenciado el eNB.

En primera instancia, a la hora de crear la BBDD de las estaciones base, tan solo se disponía de la información de la ubicación de estas junto con un número de estación, el que supuse su identificador, los cuales se obtuvieron de la web *AntenasGSM* [7], como se puede

ver en la Figura 3.2. Sin embargo, este número resultó no tener relación con el identificador del eNB.



Figura 3.2.- Mapa de la web *AntenasGSM*.

Por otra parte, la página web del Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital (*MINETUR*) [19] aporta otro tipo de información relevante de las estaciones base, como las bandas de frecuencia asignadas a cada operador, el ángulo acimut respecto del Norte geográfico hacia donde dirige la transmisión o el nivel de señal medido en el entorno, en  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . En la Figura 3.3 se visualiza la interfaz web de la página web del Ministerio.

Contrastando la información que ofrecen las páginas, se ve que son idénticas, probablemente *AntenasGSM* [7] haya obtenido la información del *MINETUR*, pero ninguna aporta el ID del eNB.



Figura 3.3.- Captura de pantalla de la web del Ministerio.

Como no se encontró relación entre el identificador que ofrece *AntenasGSM* [7] o *MINETUR* y el que tiene un eNB, el método elegido para relacionar un *log* con su eNB fue:

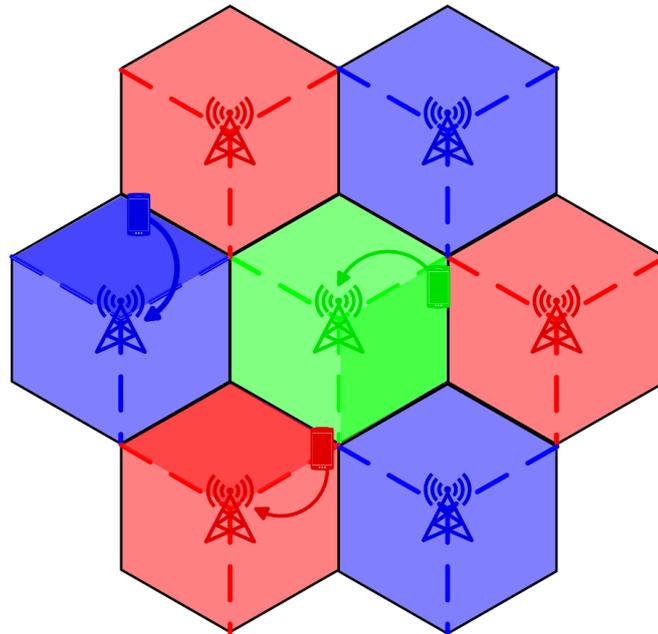
Conocido el ECI del *log* que proporciona *GNetTrack* [6], se busca dicho ECI en la BBDD de *OpenCellID* [20]. En dicha BBDD, el ECI tiene asignadas unas coordenadas, las cuales hacen referencia al punto medio de cada celda. Con estas coordenadas, se localiza el eNB más cercano a la celda, es decir, se busca la mínima distancia entre coordenadas de celda y eNB. De esta forma se puede relacionar los datos del *log* con el eNB que esté más cerca de la celda a la que pertenece dicho *log*. Este método se puede visualizar en la Figura 3.4. Se muestra la ubicación de 3 UE, los cuales pertenecen al eNB que se encuentra a la mínima distancia. Esta distribución de los UE en las celdas de cada eNB se considera teóricamente como ideal.

No obstante, hay que tener en cuenta que en algunos casos esta suposición puede ser errónea. Por ejemplo, el punto medio de una celda puede estar a un km del eNB al que pertenece, y a medio km de otro eNB al que no pertenece. En la Figura 3.5, se puede observar un ejemplo más cercano a la realidad. El área o la distribución de las celdas de los eNB no es uniforme para cada una de ellas, ya que unas pueden dar servicio a un área mayor que otras, o que su forma geográfica sea diferente al resto. En dicha Figura 3.5 las formas de las celdas varían y, manteniendo tanto los eNB como los UE en la misma posición, también lo hacen los eNB a los que pertenece cada UE. Estos ahora pertenecen a unos eNB de los que no se encuentran a la mínima distancia, como sí lo hacían en la Figura 3.4. El objetivo de la Figura 3.5 es demostrar, por tanto, que un UE no se conecta al eNB más cercano, sino al que determine la red según las condiciones de saturación/tráfico, el RSRP, etc, aunque este esté a mayor distancia. [16]

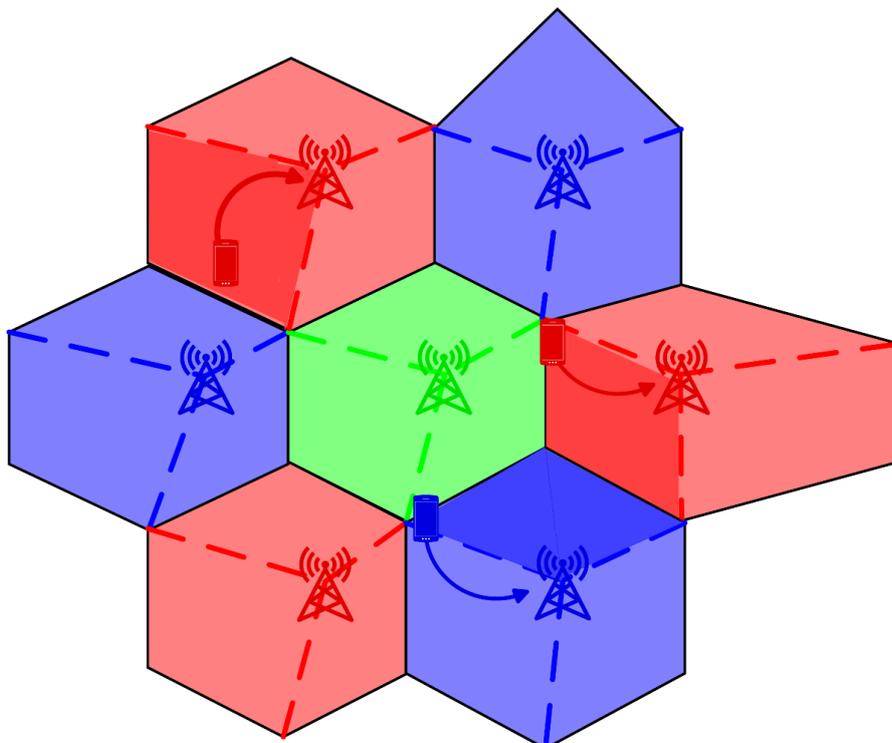
La solución al problema de referenciación entre celdas y eNB fue encontrada a partir del empleo de otra aplicación web, *CellMapper* [14], que permite realizar registros que aportan la información de los parámetros de red.

La Figura 3.4 representa un escenario ideal en el que todas las celdas tienen el mismo tamaño, mientras que en la Figura 3.5 se observa que algunos UE no se conectan al eNB que

está a menor distancia, porque quedan dentro de la zona de cobertura de otro eNB situado a mayor distancia. [17].



**Figura 3.4.-** Representación ideal de las celdas para la asignación del eNB al UE.

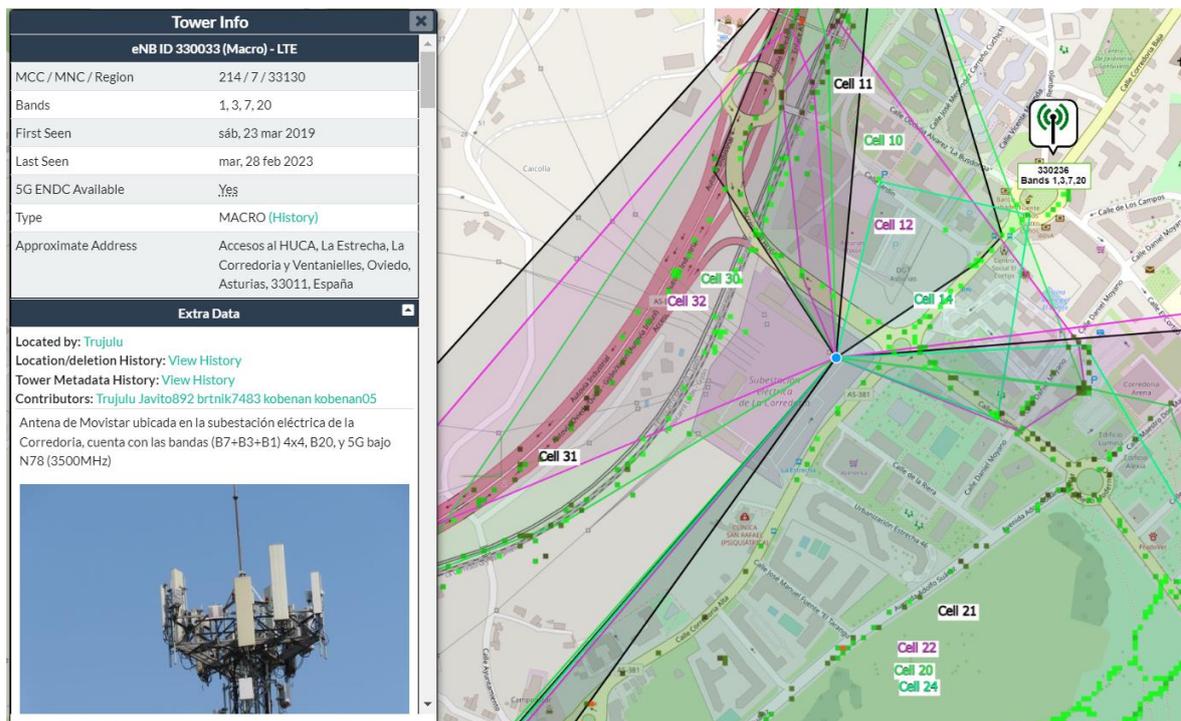


**Figura 3.5.-** Representación realista de las celdas para la asignación del eNB al UE.

### 3.2.2.- Depuración de la base de datos con la información de *CellMapper*

*CellMapper* [14] es una BBDD online que proporciona información sobre el área de cobertura de cada eNB y sus respectivas celdas. Dicha información se genera de forma colaborativa, a través del procesado de las medidas que envían aquellos usuarios que tienen instalada la aplicación móvil de *CellMapper* [14] en su UE. En la Figura 3.6 se muestra una captura de la información que ofrece la página web de *CellMapper* [14].

A la hora de elegir un eNB dentro de la web de *CellMapper* [14], es necesario introducir unos parámetros para poder visualizar la información de cada uno de ellos sobre un mapa. Estos parámetros son la generación de red móvil (2G, 3G, 4G, 5G) y la operadora del eNB; en el caso del presente TFG, dichos parámetros son LTE (4G) y Movistar.



**Figura 3.6.-** Información que ofrece CellMapper sobre las áreas de las celdas de un eNB.

Una vez introducidos los parámetros, aparece el mapa con los iconos de los eNB en sus ubicaciones, junto con un identificador para cada uno de ellos. Este sí es el identificador propio de cada eNB, el cual se puede relacionar con el dato 'Node' que aporta *GNetTrack* [6] de un log. *CellMapper* [14] ofrece información sobre los parámetros de red: MCC, MNC,

LAC (que aparece como *Region*), junto con el CID de cada celda y su respectivo ECI. También aporta información adicional como las bandas, el RSRP máximo medido en una celda, etc.

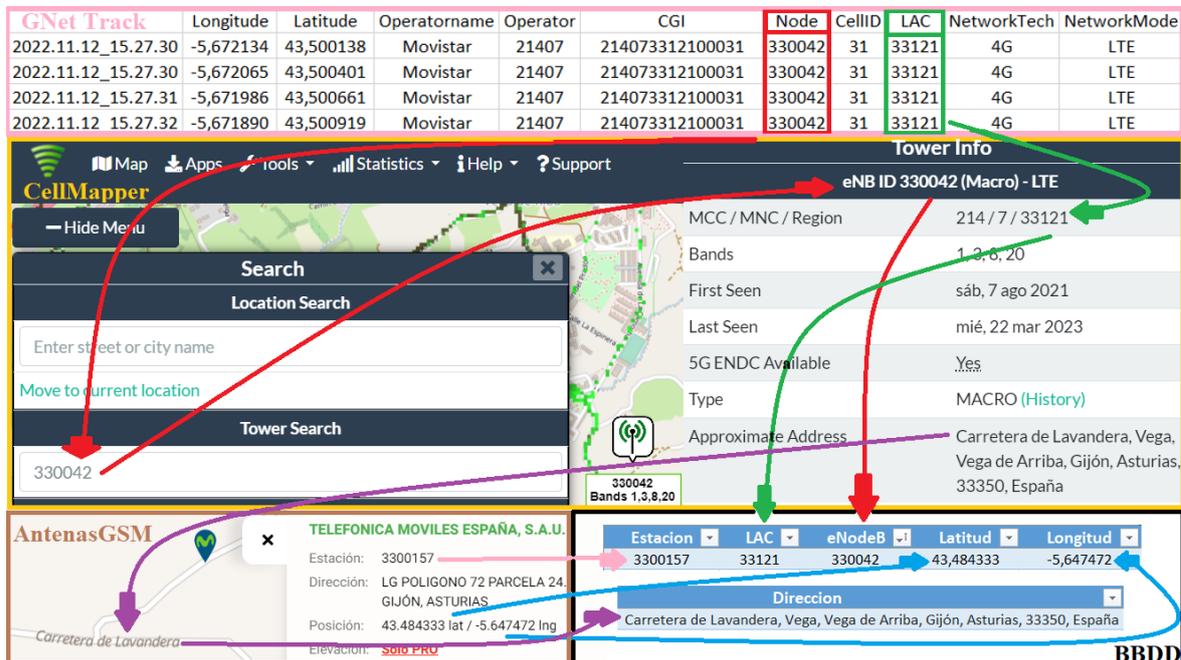
Para actualizar la BBDD de eNB creada en el marco del presente TFG con los identificadores de los eNB, se buscó manualmente en el mapa de *CellMapper* [14] las coordenadas de cada uno de los eNB identificados con el número de estación que ofrecía *AntenasGSM* [7]. Para finalizar, se comprobó que los ‘*Node*’ que registró *GNetTrack* [6] formaban parte de la BBDD.

En la BBDD se habían incluido los eNB de la página web *AntenasGSM* [7] que estuvieran más próximos a los trayectos realizados en los registros, ya que serían los más lógicos a las que se conectaría el UE. Sin embargo, se comprobó que no era así para todos los casos: en particular, de los 70 eNB incluidos en la BBDD, hubo 9 ‘*Node*’ (13% de los eNB) registrados por *GNetTrack* [6] que no existían previamente en la BBDD de eNB generada en el TFG.

Una forma para buscar los 9 eNB sería revisar de forma manual todos los iconos de la web de *CellMapper* [14] correspondientes a ubicaciones de eNB, hasta encontrar los 9 restantes. No obstante, la propia web de *CellMapper* [14] proporciona una herramienta de búsqueda (pestaña ‘*Search*’) en la cual introduciendo el ID del eNB, muestra la ubicación del eNB. De esta forma se pudieron encontrar los 9 eNB no registrados inicialmente, y así completar la BBDD de todos los eNB vinculados a las medidas realizadas con la aplicación *GNetTrack* [6].

Es necesario recordar que para cada eNB de la BBDD generada en el presente TFG se almacena su número de estación, LAC, ID de eNB, latitud, longitud y una dirección.

A modo de resumen de la metodología explicada en este apartado 3.2, la Figura 3.7 ilustra de manera gráfica el método desarrollado para la construcción de la BBDD a partir de los parámetros proporcionados por *GNetTrack* [6], junto con los datos consultados en las webs de *CellMapper* [14] y *AntenasGSM* [7].



**Figura 3.7.-** Representación del método desarrollado para la construcción de la BBDD de eNBs.

La información del campo 'Node' del log generado por la aplicación móvil *GNetTrack* [6] se emplea para buscar el identificador del eNB (eNB ID) en la web *CellMapper* [14], la cual muestra sobre el mapa la ubicación de dicho eNB. Dado que *CellMapper* [14] no aporta las coordenadas del eNB, estas últimas se recopilan buscando en la web *AntenasGSM* [7] de forma manual el icono del eNB. Una vez localizado dicho eNB, pinchando en su icono este devuelve información como la estación, la dirección, pero principalmente la posición, con las coordenadas latitud y longitud del eNB, para añadir las a la BBDD.

### 3.3.- IMPLEMENTACIÓN DE OTRAS BBDD EMPLEADAS EN EL PRESENTE TFG

En este apartado se explicará la metodología con la que se han creado las BBDD en el software utilizado para el procesamiento de los ficheros de logs, *MatLab* [21].

En primer lugar, se han procesado los ficheros de medidas que *GNetTrack* [6] registró. Para ello se han importado previamente a un ordenador, convertido de un fichero de texto a una hoja de cálculo de Microsoft *Excel*, y leído desde *MatLab* [21].

Una vez importado, se han escogido los parámetros útiles de los *logs* (es decir, los parámetros que se emplearán para el cálculo de la posición con los métodos implementados) y se ha creado una tabla con todos los *logs* como filas y los parámetros útiles como columnas. El resultado se puede visualizar en la Figura 3.8. Referente a la creación de estas tablas, se procesan todos los *logs* tomados, resultando en un total aproximado de 13.000 medidas.

En esta primer Figura 3.8 se recopilan los principales parámetros que *GNetTrack* [6] registra. Los parámetros que no proporciona dicha aplicación se inicializan a cero.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Latitud Datos	Longitud Datos	Nivel Potencia	Timing Advance	ARFCN	Cell ID	Latitud Celda	Longitud Celda	eNodeB	Latitud Antena	Longitud Antena	ECI	LAC	Distancia Log-Antena
43.5559	-6.0300	-105	4	1301	20	0	0	330054	0	0	84493844	33110	0
43.5558	-6.0301	-105	4	1301	20	0	0	330054	0	0	84493844	33110	0
43.5556	-6.0302	-106	4	1301	20	0	0	330054	0	0	84493844	33110	0
43.5555	-6.0303	-106	4	1301	20	0	0	330054	0	0	84493844	33110	0
43.5555	-6.0303	-108	22	1301	30	0	0	330113	0	0	84508958	33110	0
43.5554	-6.0304	-108	22	1301	30	0	0	330113	0	0	84508958	33110	0
43.5552	-6.0306	-108	22	1301	30	0	0	330113	0	0	84508958	33110	0
43.5551	-6.0307	-108	22	1301	30	0	0	330113	0	0	84508958	33110	0
43.5551	-6.0307	-104	7	1301	30	0	0	330054	0	0	84493854	33110	0
43.5549	-6.0308	-104	7	1301	30	0	0	330054	0	0	84493854	33110	0
43.5548	-6.0310	-104	7	1301	30	0	0	330054	0	0	84493854	33110	0
43.5547	-6.0311	-105	7	1301	30	0	0	330054	0	0	84493854	33110	0

**Figura 3.8.-** Extracto de la Tabla de *MatLab* Datos – Sólo parámetros de *GNetTrack*.

Para rellenar las columnas 7 y 8 de la Figura 3.8 (latitud y longitud), se ha buscado el ECI en la BBDD de *OpenCellID* [20], y se han introducido las coordenadas de la celda coincidente. Respecto a las columnas 10 y 11, se emplea el mismo método, pero con la BBDD de eNBs. Se ha buscado el valor del ‘Node’ de *GNetTrack* [6] en la columna eNB de la BBDD, y se han introducido en las columnas 10 y 11 las coordenadas del eNB coincidente. Para la columna distancia entre el *log* y el eNB, en metros, se ha calculado entre las coordenadas del *log* y del eNB. La Tabla Datos completa quedaría como en la Figura 3.9.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Latitud Datos	Longitud Datos	Nivel Potencia	Timing Advance	ARFCN	Cell ID	Latitud Celda	Longitud Celda	eNodeB	Latitud Antena	Longitud Antena	ECI	LAC	Distancia Log-Antena
43.5559	-6.0300	-105	4	1301	20	43.5558	-6.0284	330054	43.5592	-6.0321	84493844	33110	404.4660
43.5558	-6.0301	-105	4	1301	20	43.5558	-6.0284	330054	43.5592	-6.0321	84493844	33110	412.7935
43.5556	-6.0302	-106	4	1301	20	43.5558	-6.0284	330054	43.5592	-6.0321	84493844	33110	421.9600
43.5555	-6.0303	-106	4	1301	20	43.5558	-6.0284	330054	43.5592	-6.0321	84493844	33110	432.6222
43.5555	-6.0303	-108	22	1301	30	43.5435	-6.0336	330113	43.5434	-6.0196	84508958	33110	1.5990e+03
43.5554	-6.0304	-108	22	1301	30	43.5435	-6.0336	330113	43.5434	-6.0196	84508958	33110	1.5913e+03
43.5552	-6.0306	-108	22	1301	30	43.5435	-6.0336	330113	43.5434	-6.0196	84508958	33110	1.5838e+03
43.5551	-6.0307	-108	22	1301	30	43.5435	-6.0336	330113	43.5434	-6.0196	84508958	33110	1.5762e+03
43.5551	-6.0307	-104	7	1301	30	43.5559	-6.0338	330054	43.5592	-6.0321	84493854	33110	469.7290
43.5549	-6.0308	-104	7	1301	30	43.5559	-6.0338	330054	43.5592	-6.0321	84493854	33110	482.9872
43.5548	-6.0310	-104	7	1301	30	43.5559	-6.0338	330054	43.5592	-6.0321	84493854	33110	495.5872
43.5547	-6.0311	-105	7	1301	30	43.5559	-6.0338	330054	43.5592	-6.0321	84493854	33110	508.0606

Figura 3.9.- Extracto de la Tabla de *MatLab* Datos – Completa.

Para una mejor visualización de la relación de un UE con la celda y eNB a la que está conectado, en la Figura 3.10 y en la Figura 3.11 se muestra la unión de un *log* con su celda y con su eNB. Cuando las líneas son del mismo color, significa que los *logs* pertenecen a la misma celda o al mismo eNB. Además, se puede comprobar que se han registrado medidas en la misma ubicación conectándose a 2 eNB (o a 2 celdas) diferentes, lo que demuestra que, según las condiciones de tráfico en la red, esta decide a qué eNB se conectará el UE.

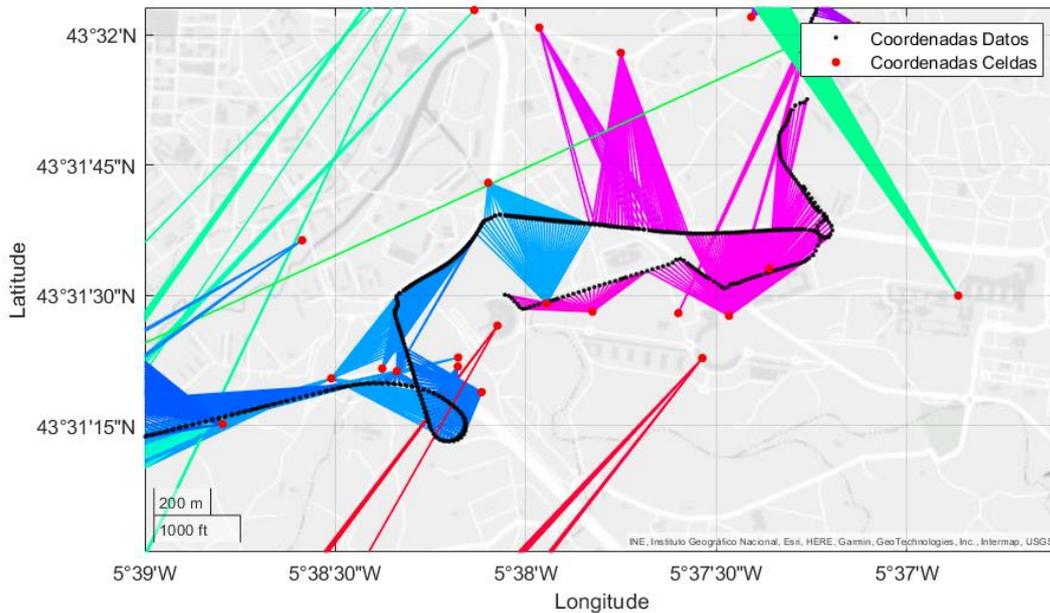


Figura 3.10.- Representación gráfica de la referenciación de un *log* con su celda.

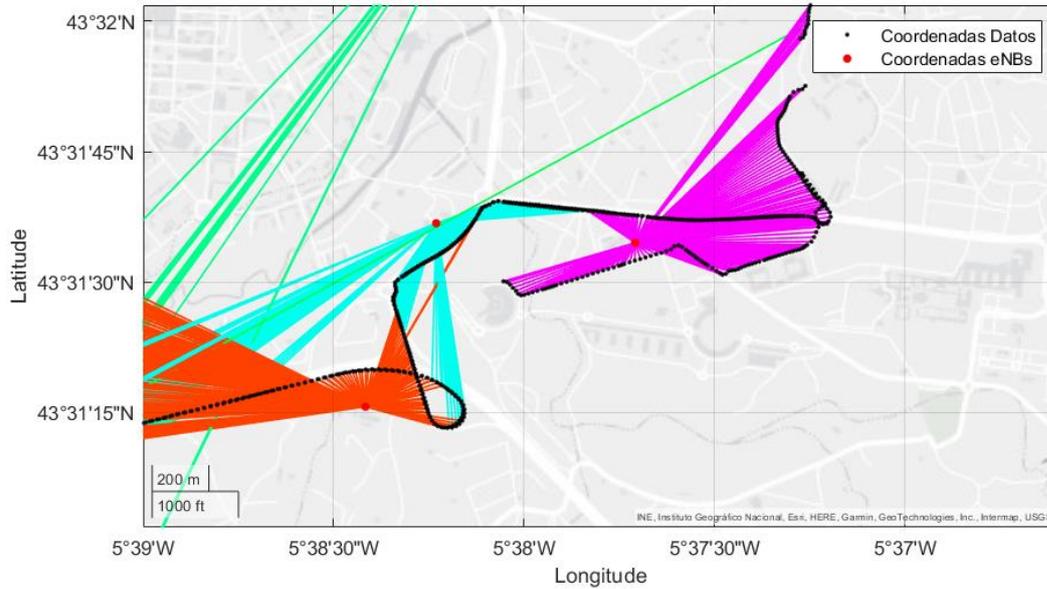


Figura 3.11.- Representación gráfica de la referenciación de un log con su eNB.

Por último, las BBDD anteriores se unifican en una misma, pudiendo considerarse como la BBDD maestra. En ella se incluye para cada celda de un eNB (por tanto, para cada ECI), la información necesaria para la estimación de la posición de un UE. Entre sus parámetros están, aparte de los que la identifican geográficamente y a nivel de red, los coeficientes del modelo de propagación considerado (se han considerado varios, ej. lineal, polinómico, basado en los valores del TA, etc.), los cuales se explicarán en detalle en el apartado 3.6. Un ejemplo de los parámetros de las celdas que se incluyen en esta BBDD se muestra en la Figura 3.12.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Location Area Code	E-UTRAN Cell Identifier	eNodeB	Latitud Antena	Longitud Antena	Cell ID	Latitud Celda	Longitud Celda	Direccion Antena	Num medidas por celda
33110	84550413	330275	43.4915	-5.9419	13	43.5270	-5.9346	"Campo de la Liebre, Llanera, Asturias, 33411, España"	90
33110	84550415	330275	43.4915	-5.9419	15	43.5527	-5.9246	"Campo de la Liebre, Llanera, Asturias, 33411, España"	79
33110	84552459	330283	43.5067	-5.8055	11	43.5133	-5.8166	"Autovia del Cantábrico, La Venta, Carreño, Asturias, 33480, España"	477
33110	84552469	330283	43.5067	-5.8055	21	43.5039	-5.8002	"Autovia del Cantábrico, La Venta, Carreño, Asturias, 33480, España"	107
33110	84575765	330374	43.5269	-5.9195	21	43.5213	-5.9010	"Salida Mollada La Luz Avilés, La Tabla, Corvera de Asturias, Asturias, 33410, España"	339
33110	84575775	330374	43.5269	-5.9195	31	43.5213	-5.9010	"Salida Mollada La Luz Avilés, La Tabla, Corvera de Asturias, Asturias, 33410, España"	316
33110	84580117	330391	43.4931	-5.8149	21	43.5207	-5.8233	"Aula de Medio Ambiente - COGERSA, Camín Real, Liérbado, Gijón, Asturias, 33480, España"	87
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Media Dist/TA	Mediana Dist/TA	Coef. Corr. Dist	Celda lin p1	Celda lin p0	Celda gral p4	Celda gral p3	Celda gral p2	Celda gral p1	Celda gral p0
90.8580	73.6253	0.0688	3.1080	-223.0735	56.8743	-8.5109e+03	4.7753e+05	-1.1906e+07	1.1131e+08
71.3685	74.7209	0.4405	15.1283	-657.4581	228.1891	-3.3727e+04	1.8693e+06	-4.6047e+07	4.2534e+08
79.8649	58.2111	0.4308	-2.0432	-28.9237	0.0022	-0.2377	9.1442	-149.4142	800.1477
104.8789	76.6993	0.8292	-1.1041	-55.6059	0.0125	-1.2590	46.7016	-757.1417	4.4487e+03
94.4809	77.3498	0.3900	-1.3730	-45.5462	0.0083	-0.9624	40.4603	-734.7437	4.7830e+03
77.1742	49.9688	-0.0718	-1.6395	-40.0913	-0.0334	3.6212	-146.2032	2.6066e+03	-1.7382e+04
76.0055	73.7387	0.2984	-4.7367	59.4843	199.9425	-2.7892e+04	1.4590e+06	-3.3919e+07	2.9569e+08
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Celda Acerc p4	Celda Acerc p3	Celda Acerc p2	Celda Acerc p1	Celda Alej p0	Celda Alej p4	Celda Alej p3	Celda Alej p2	Celda Alej p1	Celda Alej p0
46.7625	-6.9850e+03	3.9119e+05	-9.7356e+06	9.0842e+07	6.3426e+04	-9.2746e+06	5.0857e+08	-1.2394e+10	1.1328e+11
82.2909	-1.2087e+04	6.6568e+05	-1.6293e+07	1.4954e+08	1.1816e+05	-1.7272e+07	9.4676e+08	-2.3065e+10	2.1073e+11
-0.0015	0.1768	-7.8476	156.0486	-1.2279e+03	0.0041	-0.4555	18.4267	-321.4998	1.9672e+03
0.0057	-0.5702	20.9297	-334.0528	1.8796e+03	0.0187	-1.8889	70.5301	-1.1529e+03	6.8829e+03
0.0083	-0.8961	35.0107	-588.1867	3.4938e+03	0.0058	-0.7349	33.1175	-637.2227	4.3535e+03
-0.0402	4.3497	-175.5162	3.1271e+03	-2.0820e+04	0.0091	-0.8290	27.2020	-376.6271	1.7319e+03
258.6383	-3.6114e+04	1.8909e+06	-4.4000e+07	3.8394e+08	9.8651	-1.3416e+03	6.8344e+04	-1.5455e+06	1.3088e+07

Figura 3.12.- Extracto de la BBDD con los parámetros de cada celda de cada eNB.

Los métodos que se explicarán en los apartados 3.4 y 3.5, se simularán con los diferentes modelos de propagación que se describirán en el apartado 3.6. Los parámetros de dichos modelos de propagación se guardan en esta BBDD maestra entre las columnas 11 y 30, como se muestra en la Figura 3.12.

### 3.4.- MÉTODO BASADO EN EL CAMBIO DE ESTACIÓN BASE

Una vez conocida la manera de identificar el eNB de cada *log*, el siguiente paso es geolocalizar el UE en base a los parámetros TA y RSRP. Este primer método se puede considerar como una ampliación del método CGI-TA explicado en el apartado 2.2.

La principal desventaja del CGI-TA en el contexto del presente TFG se encuentra a la hora de trilaterar una posición, ya que la aplicación *GNetTrack* [6] solamente aporta los parámetros de identificación de un eNB, siendo de esta forma muy imprecisa la geolocalización. Esta técnica estima la distancia del enlace entre UE y eNB, pero no el acimut con el que transmite la señal el eNB.

Para ello, en este TFG se ha propuesto la siguiente solución, basada en la condición de que sólo se puede estimar la geolocalización del UE cuando este realiza un *handover*, es decir, al realizar el traspaso de un eNB a otro. En el *log* proporcionado por *GNetTrack* [6] se aporta la información del eNB al que está conectado el UE. Por tanto, si se tienen en cuenta los 2 *logs* relativos al *handover*, el último del eNB antiguo, y el primero del eNB nuevo, se tiene información de 2 eNB cuyos *logs* se han realizado en ubicación similar a la del UE.

El lapso en el que *GNetTrack* [6] realiza registros es de 1 segundo en la mayoría de los casos, observándose en ocasiones que proporciona un par de *logs* por segundo. Esto se traduciría en una distancia de 30 metros a una velocidad del UE de 108 km/h, propia de una autopista, y de 10 metros con el UE moviéndose a 36 km/h, propia de una travesía urbana.

Tomando el punto medio de los *logs*, el error no excedería los 15 o 5 metros, respectivamente. Aun así, la intersección de las 2 circunferencias con centro en los distintos eNB daría lugar a 2 puntos de intersección, por lo que podría existir ambigüedad en la

determinación de la posición. En el TFG se propondrán soluciones objetivas y subjetivas para elegir una de las dos. La representación gráfica del método se puede visualizar en la Figura 3.13 [18].

El grosor de las circunferencias trata de representar la incertidumbre asociada a la estimación de la distancia radial del UE al eNB (distribución uniforme en el caso de emplear el valor TA, y distribución normal en el caso de emplear el RSRP).

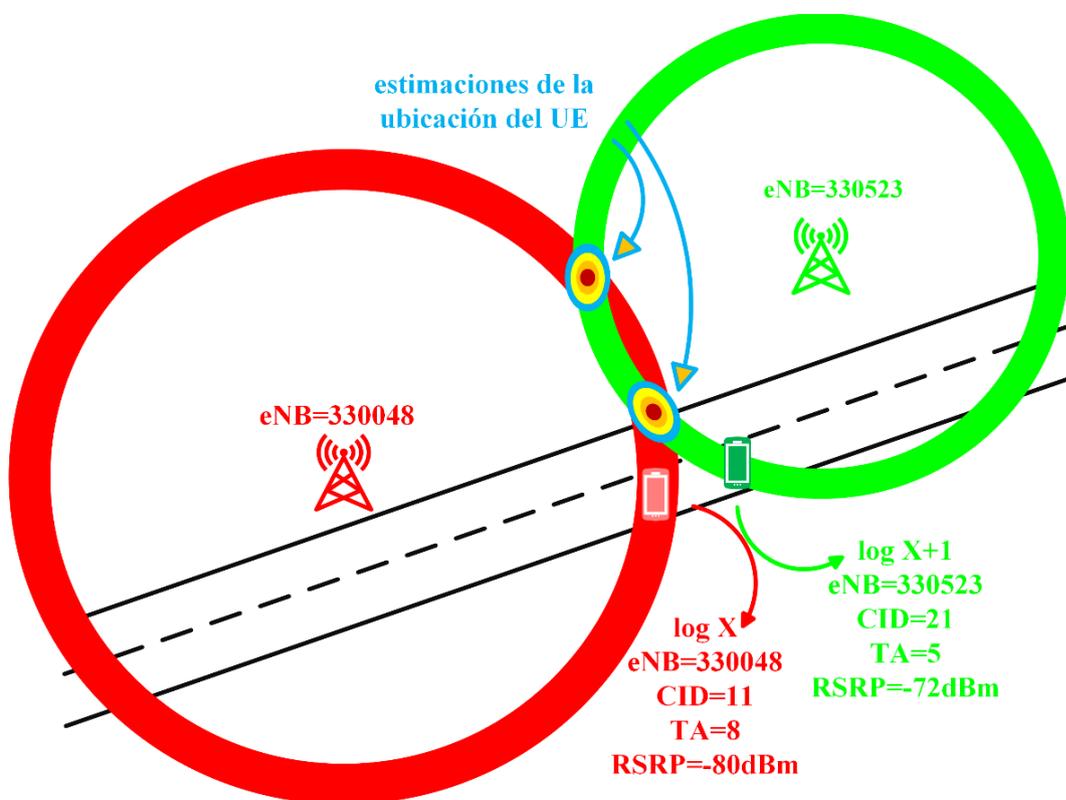


Figura 3.13.- Representación gráfica del método de geolocalización en un handover.

### 3.5.- MÉTODO BASADO EN TRILATERACIÓN A PARTIR DEL NIVEL DE RSRP DE ANTENAS VECINAS.

Una de las características de la aplicación *GNetTrack* [6] es que proporciona el parámetro RSRP de las celdas vecinas. Por ello, en este TFG se ha diseñado un método de localización basado en dicha información del RSRP del eNB actual y de los vecinos.

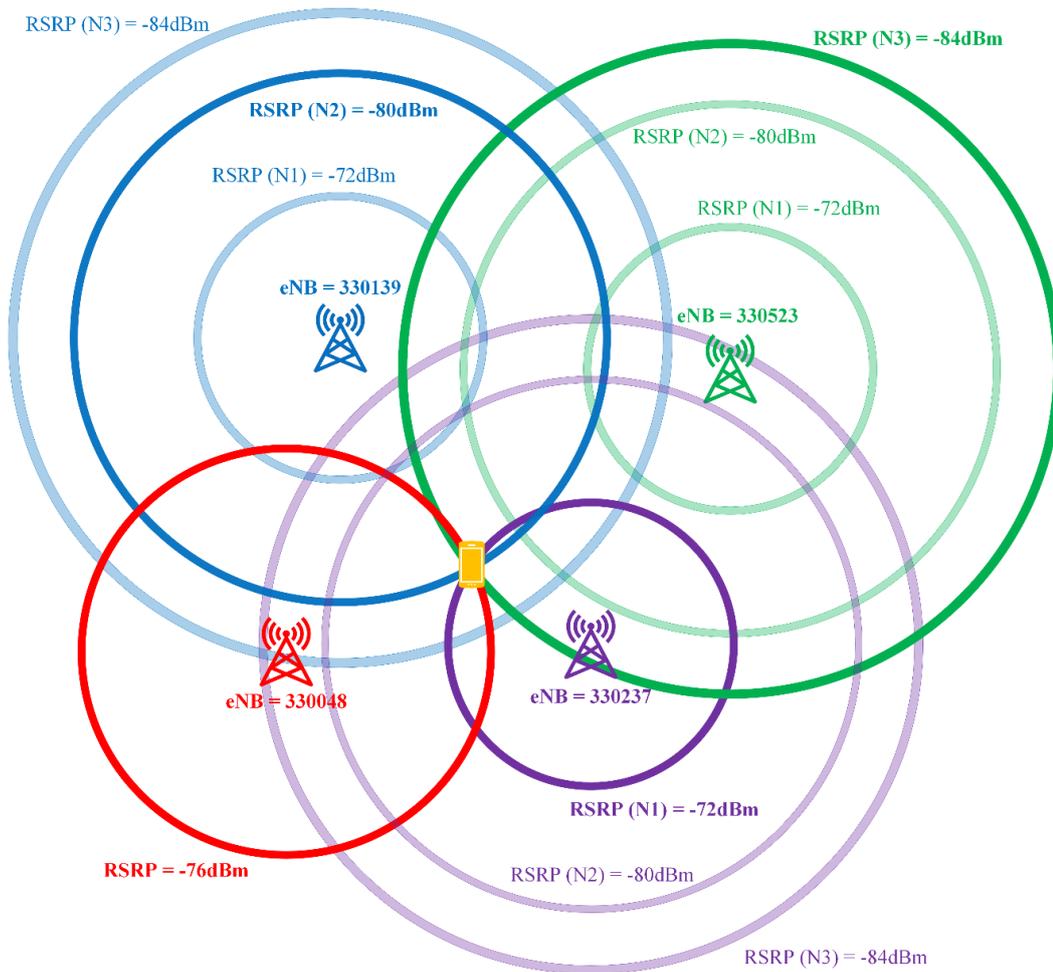
En principio, su uso requeriría tanto de la información del RSRP, como del eNB asociado a ese RSRP. Sin embargo, con la aplicación *GNetTrack* [6], no es posible saber a qué celda vecina corresponde el RSRP medido.

El proveedor de la aplicación asegura que dicha información solo se encuentra disponible en dispositivos móviles compatibles, pero en ninguno de los móviles donde se ha instalado esta aplicación se obtuvo dicho dato.

Por tanto, para este método tan sólo se conoce el eNB al que está conectado el UE. Junto con este dato, se dispone del RSRP, del TA y del valor de los RSRP sin saber cuál es su eNB. Por tanto, el método propuesto es asignar los valores de RSRP de los vecinos a tantos eNB vecinos como valores de RSRP vecinos se disponga. La ubicación del UE será la intersección de la circunferencia del valor del RSRP del eNB al que se está conectado, junto con las de los eNB vecinos cuyos RSRP optimicen la intersección, asignando cada uno de los valores de RSRP vecinos a un eNB de forma exclusiva, es decir, sin que se repitan. La representación del método se puede ver en la Figura 3.14, con los siguientes parámetros:

eNB	RSRP	TA	RSRP (N1)	RSRP (N2)	RSRP (N3)	eNB vecinos		
330048	-76	14	-72	-80	-84	330139	330237	330523

**Tabla 3.3.-** Parámetros de ejemplo para visualizar el método basado en el RSRP de los eNB vecinos.



**Figura 3.14.-** Representación gráfica del método basado en trilateración a partir del nivel del RSRP de las antenas vecinas.

### 3.6.- MEJORA DE LOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN

En el desarrollo de los métodos de localización que se consideran en el presente TFG, un aspecto clave en la precisión de estos es el establecimiento del modelo de propagación de la señal. A partir de dicho modelo, empleando los observables correspondientes (RSRP, TA), será posible relacionar dicho observable con la distancia entre el eNB y el UE, que gráficamente se corresponde con una circunferencia con centro en el eNB desde la cual se estima la distancia entre eNB y UE.

La primera decisión ha sido la elección del rango de validez del modelo de propagación. Las opciones han sido realizar un modelado según las celdas o según los eNBs.

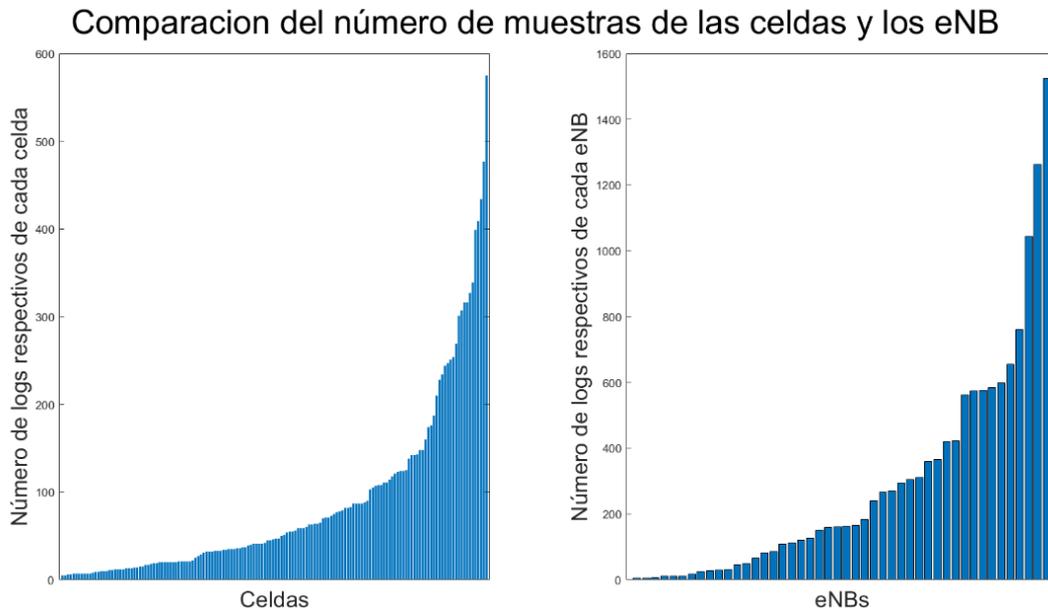
Las variables a tener en cuenta fueron el número de muestras y la precisión del modelado de dichas muestras. De una muestra total de unos 13.000 logs, el número de celdas a las que pertenecen esos registros ha sido de 164, mientras que los eNBs referentes a esos logs ha sido de 47.

Al procesar las muestras, el número mínimo de registros que ha de tener una celda o eNB para poder ser modelado se ha establecido en 5 logs. Este criterio lo cumplen 154 de las 164 celdas para las cuales se tienen medidas, así como 46 de los 47 eNBs. En la Figura 3.15 se representan los histogramas con el número de medidas o logs para cada celda y eNB. Cada barra corresponde a una celda o un eNB, mientras que su altura corresponde al número de logs pertenecientes a dicha celda o eNB. Se observa que existe una gran variabilidad en el número de logs de cada celda/eNB, dado que las medidas se han tomado siguiendo trayectorias más o menos aleatorias (es decir, sin conocer *a priori* la ubicación de los eNBs o la zona de cobertura de las celdas), igual que correspondería a una situación real.

Para analizar el número de muestras, en la Tabla 3.4 se muestran algunos de los parámetros estadísticos más importantes.

	Media	Cuartil 25	Mediana	Cuartil 75
Celda	86	20	46	108
eNB	290	46	162	420

**Tabla 3.4.-** Parámetros estadísticos del número de logs pertenecientes a cada celda o eNB.

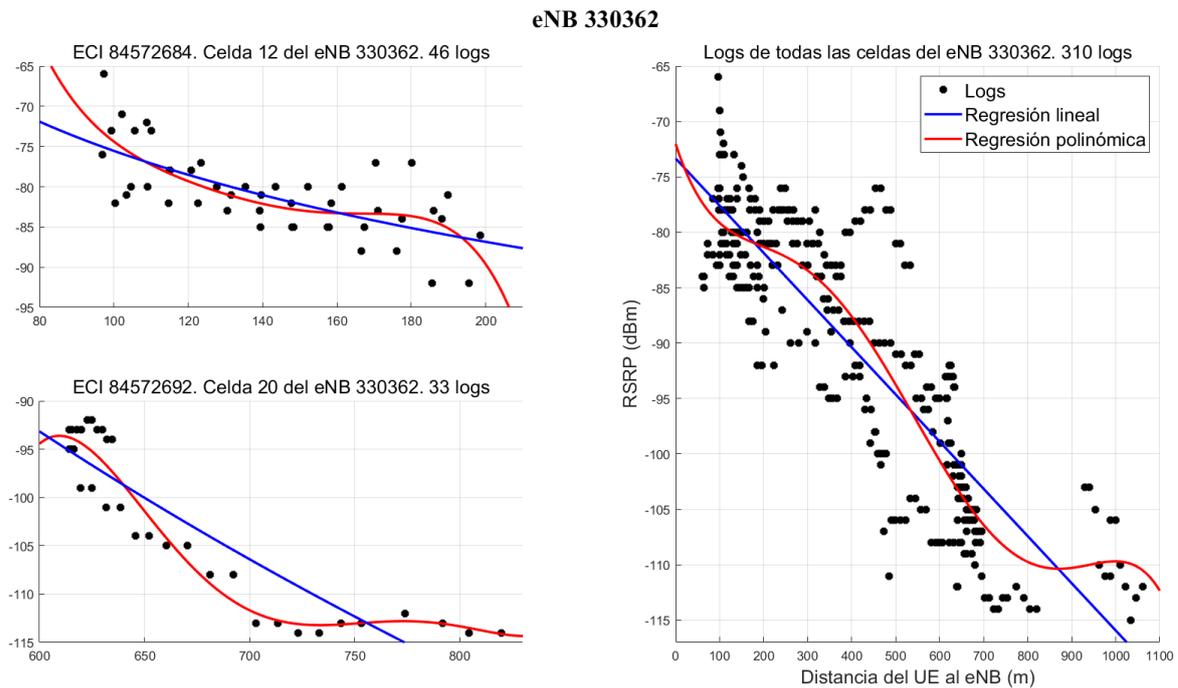


**Figura 3.15.-** Gráfico de barras que representa el número de *logs* de cada celda o eNB.

En base a los resultados de la Tabla 3.4 se concluye que, para la mayoría de celdas o de eNBs, el número de *logs* es suficiente como para poder modelar por celdas o por eNBs.

En la Figura 3.16, se puede visualizar un ejemplo de regresión lineal y polinómica considerando medidas para una celda y medidas para todas las celdas de un eNB. Hay que tener en cuenta también que un eNB abarca más área geográfica que una celda (un eNB está formado por varias celdas), por lo que, como se observa en la Figura 3.16, la dispersión del RSRP de las medidas es superior.

En esta Figura 3.16 se muestra un caso real del RSRP medido en el UE en función de la distancia al eNB. En particular, el elegido en este ejemplo es el eNB 330362, situado en el tejado de la Escuela de Marina Civil, en el Campus de Gijón. Como se ha mencionado, un eNB al estar formado por varias celdas, siempre va a tener un número mayor de *logs* que ellas. En este caso, este eNB está formado por 5 celdas. En la Figura 3.16 se muestran los *logs* de 2 de ellas, 46 y 33 *logs* respectivamente, junto con los *logs* totales de un eNB.



**Figura 3.16.-** Comparativa del comportamiento del ajuste de regresión del RSRP, lineal y polinómico, entre los *logs* pertenecientes a la celda o al eNB.

Sin embargo, en el caso del eNB seleccionado para este ejemplo, aunque parezca que el ajuste polinómico estima bien los valores del RSRP, en algunas ocasiones este difiere en más de 10 dBm del valor real. Si además estos valores estuvieran dispersos, la curva de regresión polinómica sería poco útil. Por ello, el modelado por eNB podría dar lugar a mayor imprecisión a la hora de intentar estimar un modelo que permita predecir los valores de RSRP en función de la distancia. Cuanto más dispersos sean, para una misma distancia, los valores de RSRP medidos en las diferentes celdas del mismo eNB, mayor incertidumbre se tendrá.

En base a los motivos explicados, en este TFG se ha decidido escoger la opción del modelado por celdas y no por eNBs.

Para evaluar la precisión de los métodos considerados en este TFG, se realizará el siguiente análisis, para todos ellos. En el caso del eNB 330362, este tiene 6 celdas en las que se han realizado mediciones. Para cada una de ellas, se realizará el ajuste por regresión del método correspondiente de los RSRP medidos.

Una vez conocido el modelo de propagación de cada celda, se simulará introduciendo el RSRP de un *log* real, conocidos también el resto de los parámetros, para saber cómo es el funcionamiento del método y cuál es la distancia estimada entre el eNB y el UE que se puede conocer por este método, y compararlo así con la distancia real obtenida a partir de las coordenadas de la celda y del UE (proporcionadas por el receptor GNSS en el caso del UE). Los parámetros de los *logs* medidos en las diferentes celdas se pueden ver en la Tabla 3.5.

eNodeB	Cell ID	TA	RSRP (dBm)	distancia del UE al eNB (m)
330362	10	2	-81	116
	12	2	-85	167
	20	7	-113	703
	22	5	-80	328
	24	13	-113	1 046
	32	2	-93	403

**Tabla 3.5.-** Parámetros de algunos *logs* extraídos de las mediciones (1 *log* por cada celda).

Se considerarán varios tipos de ajuste de regresión del RSRP de los *logs* de cada celda: i) lineal, ii) polinómico general, y iii) polinómico distinguiendo entre los valores de RSRP cuando el UE se acerca a la antena y cuando el UE se aleja de la antena.

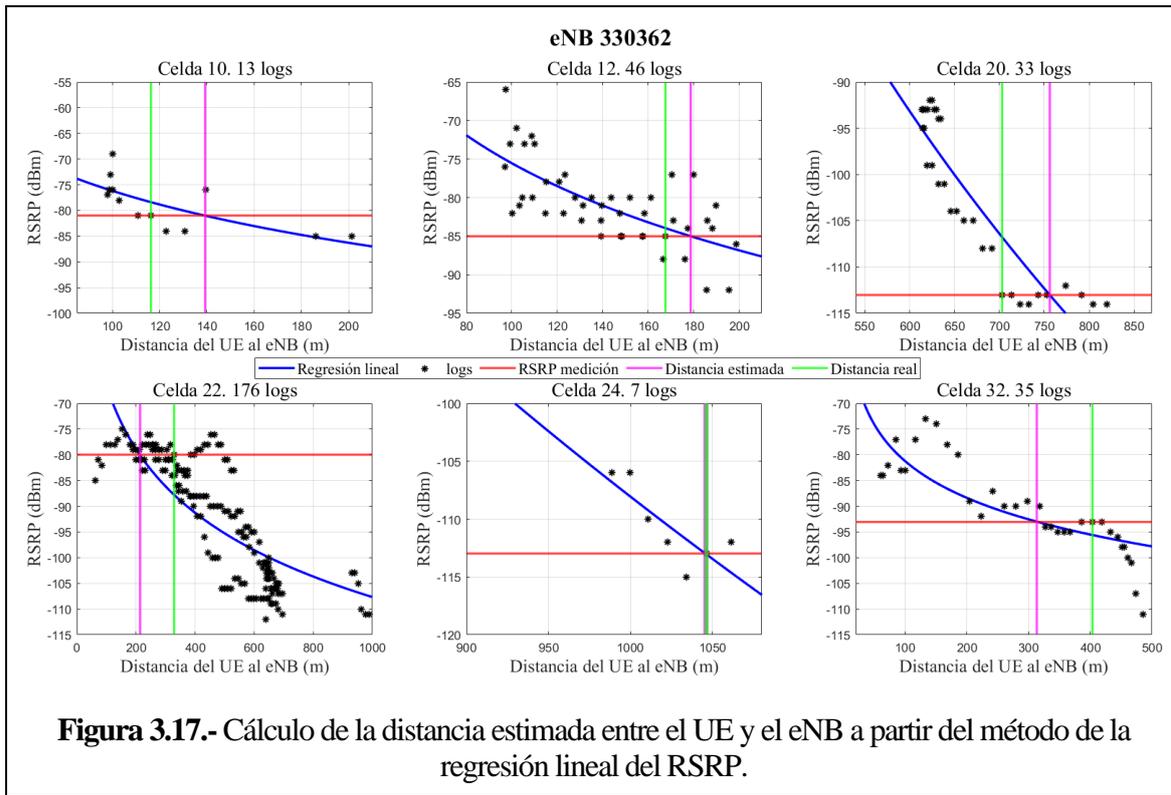
En primer lugar se describe el ajuste de regresión *lineal* del RSRP de los *logs* de cada celda. Para ello, mediante la función *polyfit* de *MatLab* [21], se han calculado los coeficientes del polinomio de grado 1 (es decir, un binomio formado por la pendiente y la ordenada en el origen) utilizando los *logs* pertenecientes a cada celda. Los datos necesarios para ello han sido el RSRP y la distancia entre la ubicación del *log* (conocida por las coordenadas proporcionadas por el receptor GNSS del UE) y el eNB, en unidades logarítmicas, debido a que el RSRP se encuentra en estas unidades.

Los coeficientes del ajuste del RSRP de los *logs* se guardan en la BBDD de celdas, Figura 3.12 del apartado 3.3, en las columnas 14 y 15, cada cual en la fila de su celda. El coeficiente de la columna 14, el '*Celda lin p1*', se trata del coeficiente de atenuación, el cual sería -2 de forma teórica en condiciones de espacio libre.

Respecto a la regresión *polinomial*, se han diferenciado dos tipos. El primero ha sido el general, utilizando todos los *logs*, mientras que en el segundo tiene en cuenta si el *log* se acerca o si se aleja al eNB, dividiéndolos de esta forma en dos grupos, y realizando la regresión *polinomial* para cada uno de ellos de forma independiente. Para el polinómico general, los coeficientes del polinomio se han guardado en las columnas de la 16 a la 21; para el polinómico de acercamiento, de la 22 a la 27; por último, para el polinómico de alejamiento, de la 28 a la 33.

### 3.6.1.- Regresión lineal del RSRP

El método de regresión lineal es el más sencillo de los implementados en el presente TFG. En este método, el punto de corte entre la recta de regresión (Figura 3.17, línea azul) y el RSRP de la medición (Figura 3.17, línea roja), devuelve la distancia estimada (Figura 3.17, línea magenta) del UE al eNB. Los resultados se pueden visualizar en la Figura 3.17 y en la Tabla 3.6. Cabe destacar que la regresión es lineal entre el RSRP (en dBm) y la distancia expresada también en escala logarítmica, o el RSRP en mW y la distancia en metros. En la Figura 3.17 se representa el RSRP en dBm y la distancia en metros para una mejor interpretación.



**Figura 3.17.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión lineal del RSRP.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancia estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia (m)
3	10	2	-81	139	116	23
	12	2	-85	179	167	12
0	20	7	-113	756	703	53
3	22	5	-80	213	328	115
6	24	13	-113	1046	1 046	0
2	32	2	-93	314	403	89

**Tabla 3.6.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión lineal del RSRP.

### 3.6.2.- Regresión polinómica general del RSRP.

La regresión polinómica es generalmente más precisa que la regresión lineal, ya que la curva de la función regresión se adapta mejor a las variaciones del par distancia-RSRP, es decir, permite un mejor modelado de la señal emitida por el eNB para un escenario determinado (correspondiente a donde se han tomado medidas). El número de medidas disponibles condicionará la bondad del ajuste.

El principal problema de este tipo de regresión es que un polinomio de grado  $X$  puede llegar a tener hasta  $X$  raíces reales de distancia para un cierto valor de RSRP. En la decisión de qué raíz del polinomio escoger es donde radica la complejidad del método.

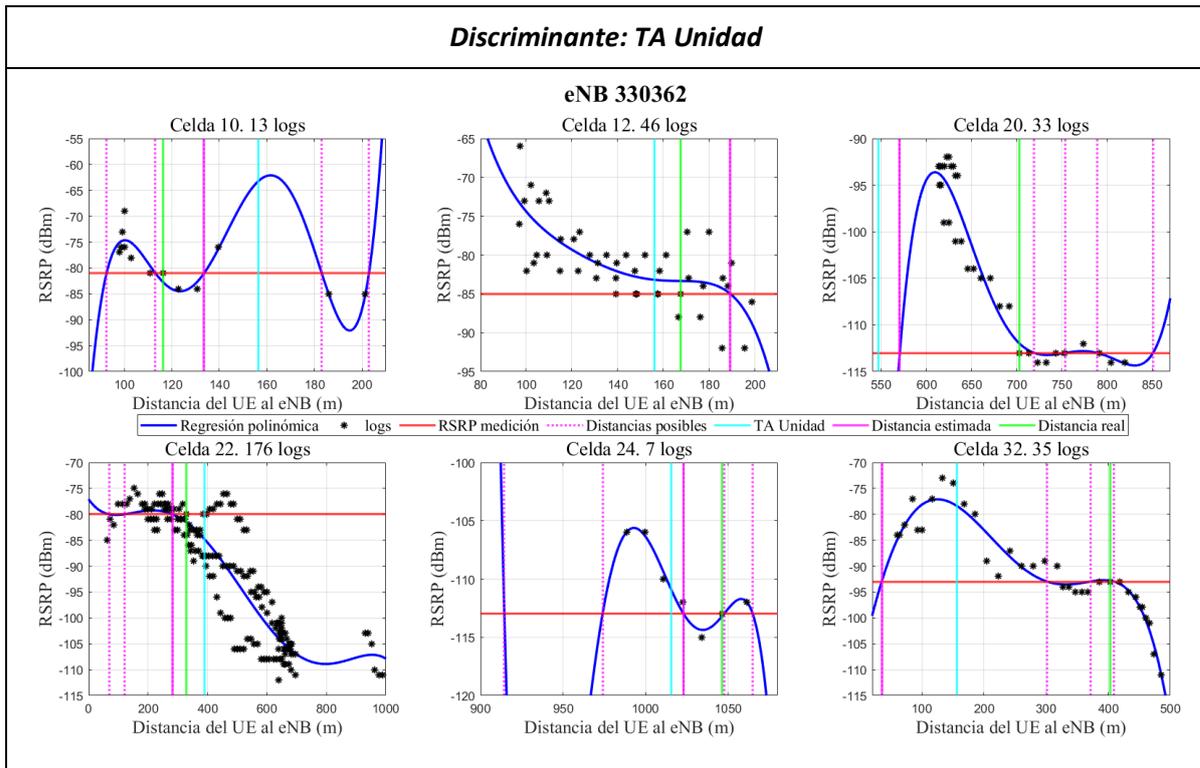
La solución ofrecida en el presente TFG pasa por tomar un valor de referencia de la distancia del UE al eNB, y escoger de las raíces del polinomio para el RSRP del *log*, la solución que minimice esa diferencia con el valor de referencia.

Para cuantificar este valor, se ha utilizado el parámetro Timing Advance, al proporcionarse también en cada *log*. Este parámetro, como se ha explicado, no ofrece la mayor precisión, al variar a saltos cada 78 metros. Sin embargo, sí puede ser útil para tener una referencia del rango de distancias en las puede rondar la distancia real.

Como resumen, la regresión polinómica presenta el problema de las múltiples soluciones, el cual se trata de solucionar con el uso de un parámetro para discriminar entre ellas. Como inicio, al valor de referencia se le asigna la distancia equivalente al producto entre el TA del *log* y el valor distancia del TA unidad. Este es la distancia a la que se encuentra el UE del eNB cuando el valor del TA es 1, que es 78,125 metros. Por tanto, el valor de referencia de distancia para un TA=1 es de 78 metros; para un TA=2, de 156 metros; para un TA=3, de 224 metros, etc.

En la Figura 3.18, se observa que la intersección entre la curva de regresión (en azul) y el RSRP de la medición (línea roja), puede dar lugar a varias distancias posibles (líneas verticales discontinuas de color magenta) entre el UE y el eNB. Como solución se escoge de las distancias posibles, cómo se ha explicado, la que su diferencia con el valor de la distancia del TA unidad sea mínima.

En la Figura 3.18 se puede ver el análisis gráfico del cálculo de la distancia estimada, cuál es la solución que se toma y cuáles se descartan (las líneas de color magenta en trazo discontinuo). Además, en la Tabla 3.7 se puede ver en detalle el error cometido con respecto a la distancia real.



**Figura 3.18.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con el TA unidad como discriminante.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancias posibles (m)	Distancia TA Unidad (m)	Distancia estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia	Elección
330362	10	2	-81	93	156	134	116	18	X
				113					
				134					
				183					
				203					
	12	2	-85	189	156	189	167	22	✓
	20	7	-113	571	547	571	703	132	X
				719					
				754					
				789					
	22	5	-80	282	390	282	328	46	✓
	24	13	-113	915	1 016	1 023	1046	23	X
974									
1 023									
1 047									
32	2	-93	35	156	35	403	368	X	
			302						
			371						
			410						

**Tabla 3.7.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con el TA unidad como discriminante.

En ella se puede comprobar que, al ser regresión polinómica, las múltiples soluciones elevan la complejidad del método. En solamente 2 de las 6 celdas se ha escogido de las distancias posibles, la más cercana a la distancia real (Tabla 3.7, número verde en negrita en la columna ‘Distancias posibles’), en las otras 4 celdas el algoritmo eligió otra distancia más alejada de la real (número en rojo en la columna ‘Distancias posibles’), aun cuando existía una solución más próxima a la real (número en verde). Este problema deriva de la poca precisión que ofrece el TA. En el sub-apartado 3.6.3 se presentarán una serie de mejoras para mejorar la precisión en la estimación de la distancia.

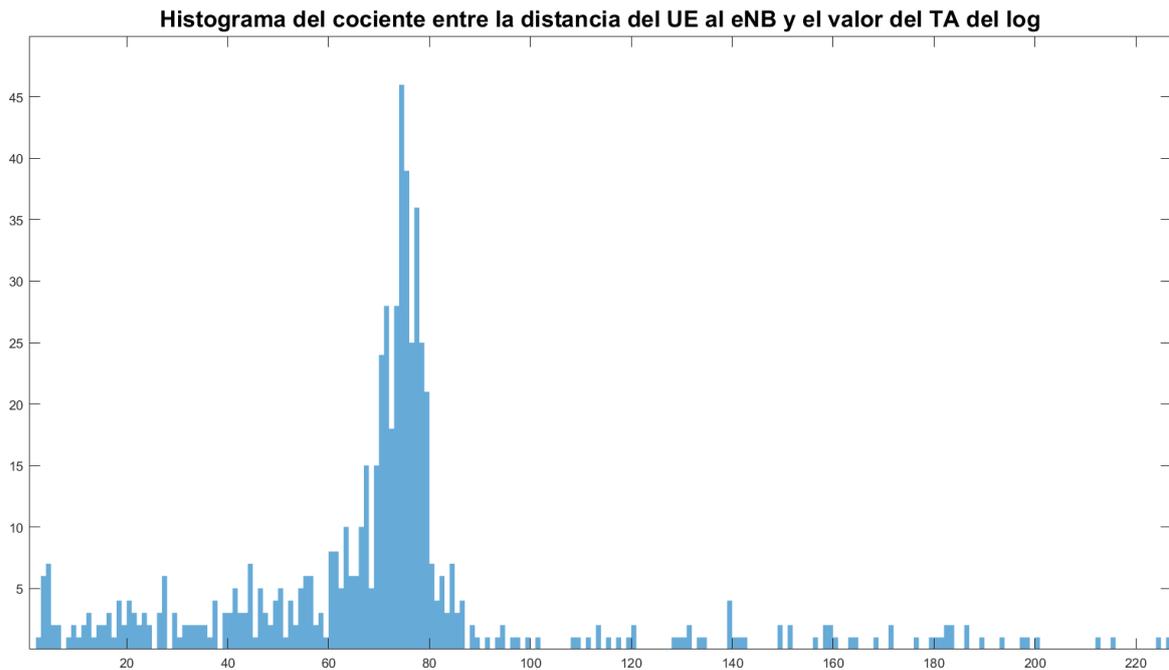
### 3.6.3.- Mejoras de la regresión polinómica general del RSRP.

La precisión de la regresión polinómica depende de la elección correcta de una de las posibles soluciones. Como se explicó en el apartado anterior, esta se realiza en base a un valor de referencia, el cuál ha sido el valor del Timing Advance unidad.

Sin embargo, tras analizar en profundidad la correlación entre el TA y la distancia del enlace entre UE y eNB, los resultados no han sido los esperados. Teóricamente, cada 78 metros que el UE se aleja del eNB, el valor del TA debe de aumentar en 1 unidad. Por tanto, al dividir la distancia del enlace entre el valor del valor del TA del *log*, este debería rondar los 78 metros, sin ser exacto siempre ya que la distancia del enlace no siempre es múltiplo de 78. Por ejemplo, para una distancia de enlace de 600 metros, el valor del TA lógico sería de 8, ya que el cociente entre la distancia y los 78 metros del valor en distancia del TA unidad es de 7,7, por tanto,  $TA=8$ . Si se divide  $600/8$ , este cociente es de 75 metros, el cual no son los 78 metros teóricos, pero es un resultado similar. El problema ha sido cuando se han encontrado resultados en donde este cociente podía ser de 10 metros, o de 150 metros, valores muy alejados del valor esperable para el TA.

En la Figura 3.19 se representa un histograma del cociente entre las distancias reales y los valores del TA de cada *log* correspondiente a la primera vez que el UE se conecta a una celda del eNB, en la cual se puede observar que la mayoría rondan los 78 metros teóricos.

Sin embargo, hay bastantes casos donde este cociente no representan un valor correcto. Esto implica que el cálculo del valor del TA del *log* por la red no ha sido realizado correctamente, resultando en un falso valor de referencia a la hora de elegir una de las posibles soluciones de la regresión lineal. Por ello, en este apartado se presentan una serie de mejoras para conseguir la máxima precisión del valor de referencia.



**Figura 3.19.-** Histograma del cociente entre la distancia real y el valor del TA del *log*. TA del primer *log* (de cuando el UE calcula el TA para la sincronización entre el eNB y el UE).

A continuación, se explican cada una de estas mejoras:

#### **A) Media del Timing Advance**

La primera mejora propuesta ha sido la de tomar la media del TA. Este valor es específico para cada una de las celdas. Para ello, se ha realizado el cociente entre las distancias del enlace y el valor del TA de todos los *logs* de cada celda independientemente, el cual debería de ser teóricamente el valor del TA unidad, pero ya se ha explicado que no es así. De entre todos los resultados, se toma el valor medio de ellos y se considera este como el valor ‘Media del TA’. Esto beneficia al cálculo de la distancia estimada debido a que, si la red calcula mal el valor del TA de cada *log*, se toma el valor medio que es más representativo que el valor TA unidad. En la Figura 3.22 y en la Tabla 3.8, se muestran los resultados obtenidos.

### ***B) Mediana del Timing Advance***

La segunda de estas mejoras es muy similar la anterior, pero se diferencia en que, en vez de escoger el valor medio del TA, se escoge el valor mediana de todos los cocientes entre la distancia del enlace y el valor del TA del *log*. La razón de esta elección se debe a que pueden existir valores atípicos (*outliers*), que distorsionen el cálculo de la media, siendo muy grandes o pequeños. De esta forma, el valor medio puede no representar con fiabilidad la proporción entre la distancia y el valor del TA. Sin embargo, el valor mediana no depende de esos *outliers*, con lo que representará un valor más acorde a la proporción deseada. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.23 y en la Tabla 3.9.

### ***C) Proporción Específica del Timing Advance***

Por si aún existiera diferencia entre el cociente entre la distancia y el valor del TA, se acota aún más el cálculo. En este caso, la mejora consiste en, además de calcular el cociente entre la distancia y el valor del TA para cada celda, hacerlo para todos y cada uno de los valores del TA que puede tomar un *log*. Es decir, existirá un cociente (proporción) específico para cada valor del TA de cada celda. Sus resultados se pueden consultar en la Figura 3.24.

A modo de resumen de los tres métodos desarrollados en el presente apartado, para calcular la distancia estimada, cada valor del TA del *log* se puede multiplicar por:

- Con el TA unidad, por el valor de la distancia del TA=1, es decir, siempre por 78,12m.
- Con la Media del TA, por la media de todos los cocientes de los *logs* de cada celda.
- Con la Mediana del TA, por la mediana de todos los cocientes.
- Con la Proporción Específica del TA, es decir, por la mediana de todos los cocientes calculados para cada valor de TA y para cada celda.

En la Figura 3.20, se puede observar una BBDD de *MatLab* [21] que recopila para cada celda de cada eNB, el valor media, el mediana, y el asociado a cada TA.

	Location Area Code	E-UTRAN Cell Identifier	Media Proporción	Mediana Proporción	Coef. Corr. Dist	TA=1	TA=2
64	33120	84480533	75.3891	73.5652	0.6781	NaN	NaN
65	33120	84480535	193.5955	193.4626	-0.9986	NaN	NaN
66	33120	84480542	69.5130	69.6378	NaN	NaN	NaN
67	33120	84480543	75.9089	75.6547	-0.7392	NaN	NaN
68	33120	84480544	76.1154	78.1822	NaN	NaN	NaN
69	33120	84481568	112.7988	74.5732	0.7019	NaN	517.6755
70	33120	84484620	67.0748	65.0469	-0.1785	NaN	NaN
71	33120	84484628	71.6704	71.4566	0.8628	NaN	NaN
72	33120	84484630	73.9732	73.9198	0.5747	NaN	NaN
73	33120	84484638	95.4391	78.1449	0.9947	NaN	NaN
74	33120	84484639	1.4722e+03	76.6888	0.1456	NaN	NaN
75	33120	84484642	151.8141	151.8235	-0.7781	NaN	NaN
76	33120	84486410	73.0370	73.4313	0.7620	NaN	NaN
77	33120	84486412	73.9104	73.6103	0.9365	NaN	NaN
78	33120	84486420	89.6213	78.2849	0.8014	NaN	NaN
79	33120	84486421	70.0049	65.7351	0.5803	NaN	NaN

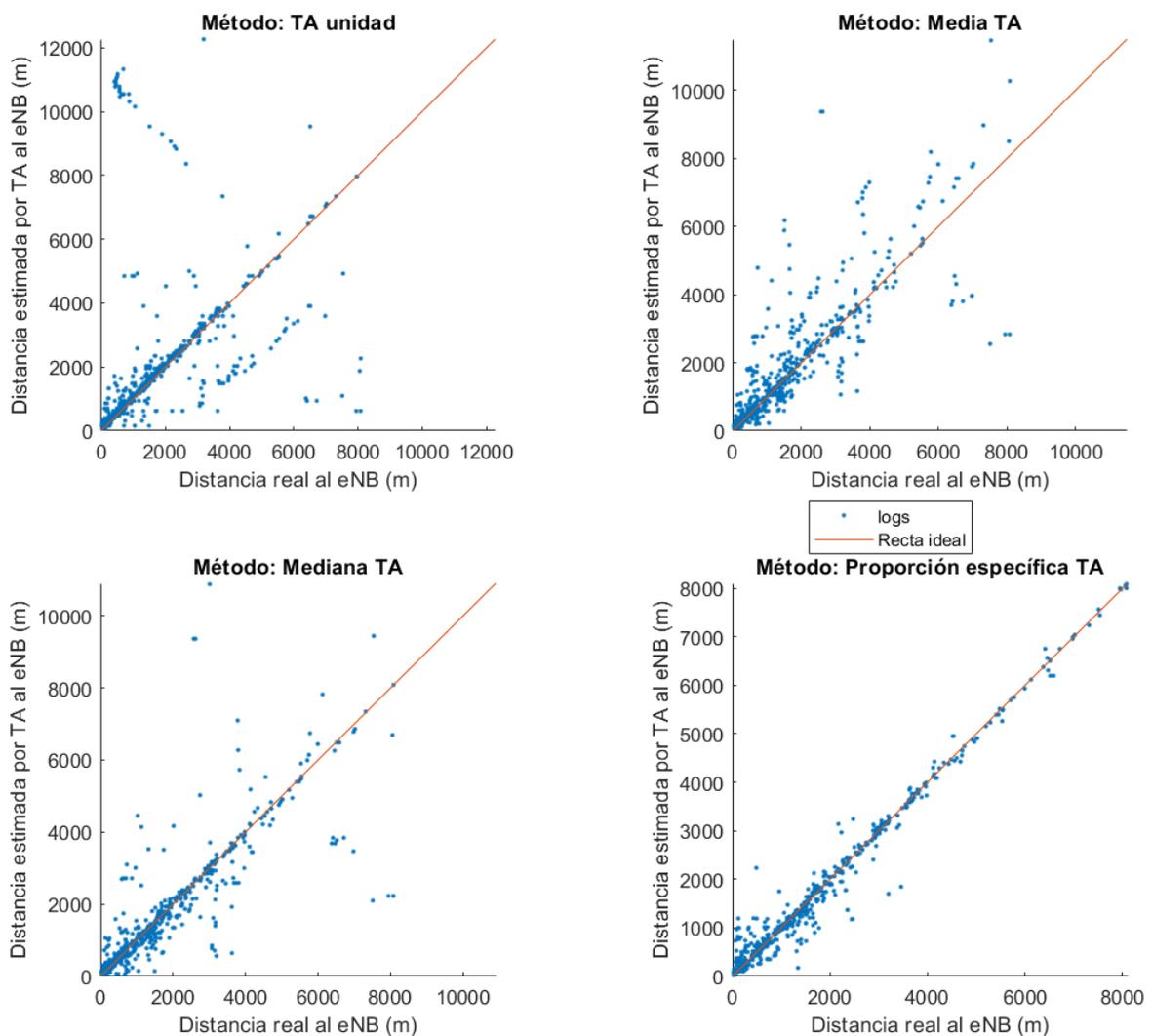
	TA=3	TA=4	TA=5	TA=6	TA=7	TA=8	TA=9	TA=10	TA=11	TA=12	TA=13
64	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	89.0481	69.9716	72.2637	NaN	85.9924
65	NaN	319.4495	NaN	NaN	NaN	NaN	67.4757	NaN	NaN	NaN	NaN
66	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
67	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
68	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	78.1822	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
69	NaN	NaN	NaN	74.5732	63.7159	80.1382	60.1348	80.4472	71.2020	74.8590	72.0909
70	NaN	NaN	NaN	70.2434	59.8503	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
71	NaN	NaN	NaN	NaN	76.2359	NaN	NaN	66.6774	NaN	NaN	NaN
72	NaN	NaN	NaN	78.6252	69.2144	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
73	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
74	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
75	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
76	NaN	NaN	NaN	70.7232	64.0344	78.5240	NaN	NaN	NaN	76.1395	NaN
77	NaN	NaN	NaN	71.1030	73.0144	64.3617	50.8590	75.7471	81.2508	NaN	78.4198
78	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	118.0874	132.7171	NaN	NaN
79	NaN	NaN	125.6866	NaN	NaN	NaN	64.5967	101.3621	55.3380	76.1084	61.8102

**Figura 3.20.-** Extracto de la BBDD ‘Proporciones Distancia TA’, en donde se recopila para cada celda el valor del cociente medio, mediano, y la proporción específica para cada TA.

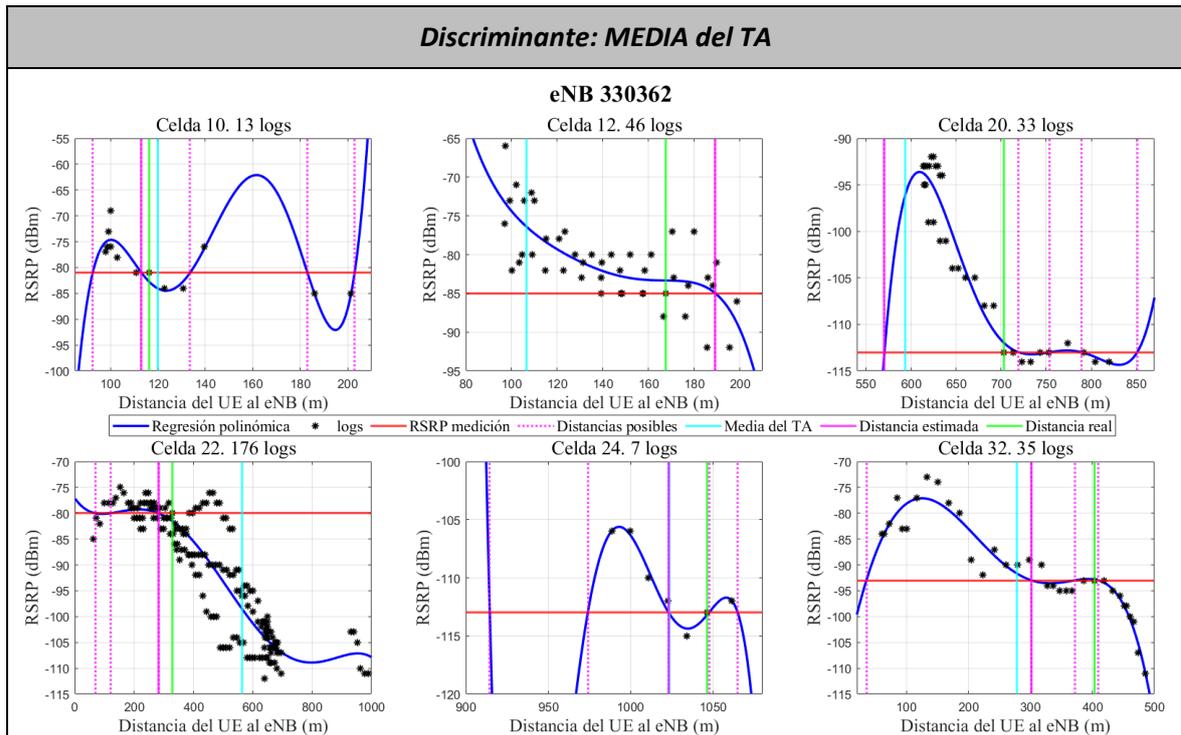
- En la fila 64 de la BBDD, se puede observar un buen ejemplo de la mejora ‘Media del TA’, ya que, para 4 valores de TA diferentes, los cocientes (89, 69, 72 y 85) son similares a la media (75).
- En la fila 69 de la BBDD, se puede observar un buen ejemplo de la mejora ‘Mediana del TA’, ya que, existen muchos cocientes similares (74, 63, 80, 60, 80, 71, 74 y 72), pero también existe la presencia de un cociente *outlier* (512), provocando una distorsión en el cálculo del valor medio (112), que no representa la mayoría de los cocientes cómo sí que lo hace el valor mediano (74).

- En la fila 79 de la BBDD, se puede observar un buen ejemplo de la mejora ‘Proporción Específica del TA’, ya que, existen muchos cocientes (125, 65, 101, 55, 76, 61...) sin que se encuentre la mayoría en torno a un valor concreto. La media (70) y la mediana (65) no representan a la mayoría de los cocientes, por lo que la mejor opción es asignar cada proporción a su valor de TA.

Por último, en la Figura 3.21 se representa la comparación de la distancia real entre UE y eNB frente a la estimada por cada una de las mejoras respecto del valor TA unidad.



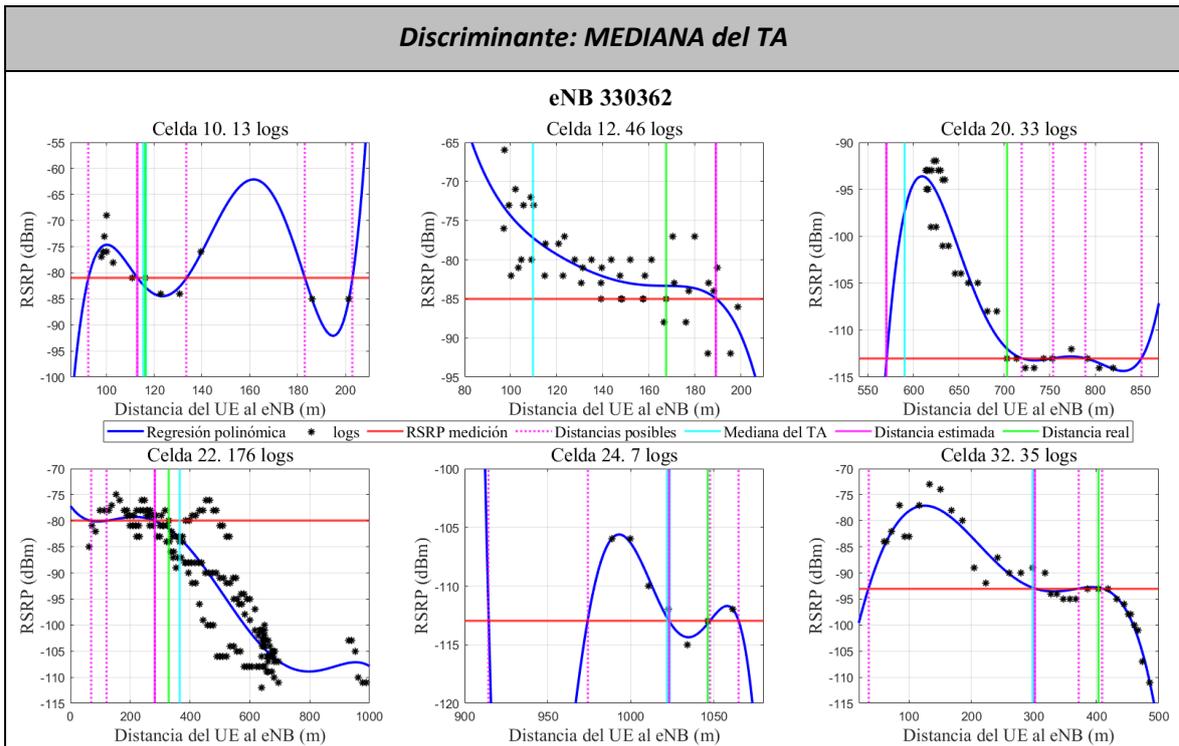
**Figura 3.21.-** Comparativa de las mejoras en el TA respecto al método del valor TA Unidad.



**Figura 3.22.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Media del TA como discriminante.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancias posibles (m)	Distancia Media del TA (m)	Distancia estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia	Elección
330362	10	2	-81	93	120	113	116	3	✓
				113					
				134					
				183					
	12	2	-85	203	107	189	167	22	✓
				189					
				719					
				571					
	20	7	-113	754	594	571	703	132	✗
				789					
				851					
				571					
22	5	-80	69	565	282	328	46	✓	
			121						
			282						
			915						
24	13	-113	974	1 023	1 023	1046	23	✗	
			1 023						
			1 047						
			1 065						
32	2	-93	35	278	302	403	101	✗	
			302						
			371						
			410						

**Tabla 3.8.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Media del TA como discriminante.



**Figura 3.23.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Mediana del TA como discriminante.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancias posibles (m)	Distancia Mediana del TA (m)	Distancia estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia	Elección
330362	10	2	-81	93	116	113	116	3	✓
				113					
				134					
				183					
	12	2	-85	189	110	189	167	22	✓
				571					
	20	7	-113	719	590	571	703	132	✗
754									
789									
851									
22	5	-80	69	367	282	328	46	✓	
			121						
			282						
24	13	-113	915	1 023	1 023	1046	23	✗	
			974						
			1 023						
			1 065						
32	2	-93	35	299	302	403	101	✗	
			302						
			371						
			410						

**Tabla 3.9.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir del método de la regresión polinómica general del RSRP, con la Mediana del TA como discriminante.



### 3.6.4.- Regresión polinómica del RSRP, distinguiendo si el UE se acerca/aleja del eNB

Como se ha analizado en el ejemplo empleado para describir los métodos presentados en el sub-apartado 3.6.3, se ha conseguido una mejora en la elección de la óptima solución del polinomio de regresión con los métodos implementados. Utilizando el TA Unidad, fueron en tan solo 2/6 celdas dónde la elección fue correcta. Con la Media y la Mediana del TA se aumentó a 3/6, mientras que, con la Proporción Específica del TA, esta elección fue correcta en 4/6 celdas. La mejora es apreciable, pero no es perfecta aún. Lo óptimo sería elegir la solución correcta en las 6 celdas.

Para ello se implementa un nuevo método, el cual también se basa en regresión polinómica del RSRP con la distancia, y en el que se utiliza el mejor discriminante de los explicados, es decir, la Proporción Específica del TA. A diferencia del método de la regresión polinómica general, en el método descrito en este sub-apartado 3.6.4, se diferencian los *logs* que se toman cuando el UE se acerca al eNB, de los *logs* que se toman cuando el UE se aleja del eNB, empleando para ello la variación de la distancia al eNB con respecto al *log* anterior.

Este método pretende ser una buena solución para las celdas que han recabado una gran cantidad de *logs*, ya que el RSRP recibido puede variar estando a la misma distancia en función de si el UE se acerca o se aleja al eNB. Para este método, por tanto, se dividen los *logs* en los 2 grupos mencionados y se calcula el polinomio de regresión para ambos casos, guardando sus coeficientes de forma independiente en la BBDD correspondiente.

A la hora de calcular la distancia estimada, como se desconoce si el UE se acerca o se aleja al eNB, se implementan 2 casos diferentes en función del RSRP del *log* correspondiente.

#### A) Implementación basada en la Variación del RSRP con respecto al *log* anterior

En este caso, si el RSRP del *log* para el que se quiere calcular la distancia estimada del enlace es superior al RSRP del *log* previo, implica que el UE se está acercando al eNB y por tanto se utilizaría el polinomio de regresión de acercamiento. Si por el contrario el RSRP del *log* fuera inferior, el UE se alejaría y se utilizaría el polinomio de regresión de alejamiento.

### B) Implementación basada en la Tendencia del RSRP de los *logs* anteriores

Profundizando un poco más en el método, la variación del RSRP con el log anterior puede no ser muy precisa, ya que pueden presentarse casos de *outliers*. Por tanto, se implementa esta versión en la que se calcula la tendencia del RSRP desde la medida actual hasta 3 *logs* antes, es decir, en total son 4 *logs* los que se tienen en cuenta para el cálculo de la tendencia. Esta tendencia se obtiene calculando la regresión lineal del RSRP de estas medidas y si la pendiente de la recta es positiva, el UE se acerca al eNB y se utiliza el polinomio de regresión de acercamiento, mientras que, si la pendiente de la recta es negativa, el UE se aleja del eNB y se utiliza el polinomio de regresión de alejamiento.

En la Tabla 3.11 y en la Tabla 3.12 se lleva a cabo una evaluación de si el *log* de la celda se acerca o se aleja en función de la variación del RSRP con el anterior, de la tendencia del RSRP con los anteriores, y cuál es realmente su variación en función de la distancia del *link*.

En función de la:			
CID	Variación del RSRP	Tendencia del RSRP	Distancia al eNB
10	variación = (→) <b>se aleja</b>	tendencia - (→) <b>se aleja</b>	distancia + (→) <b>se aleja</b>
12	variación = (→) <b>se aleja</b>	tendencia - (→) <b>se aleja</b>	distancia + (→) <b>se aleja</b>
20	variación = (→) <b>se aleja</b>	tendencia + (→) <b>se acerca</b>	distancia - (→) <b>se acerca</b>
22	variación + (→) <b>se acerca</b>	tendencia + (→) <b>se acerca</b>	distancia - (→) <b>se acerca</b>
24	variación + (→) <b>se acerca</b>	tendencia - (→) <b>se aleja</b>	distancia + (→) <b>se aleja</b>
32	variación = (→) <b>se aleja</b>	tendencia + (→) <b>se acerca</b>	distancia + (→) <b>se aleja</b>

**Tabla 3.11.-** Comparativa de las implementaciones del apartado 3.6.4. Si el RSRP aumenta, el UE se acerca al eNB. Si se trata del caso contrario, el UE se aleja del eNB.

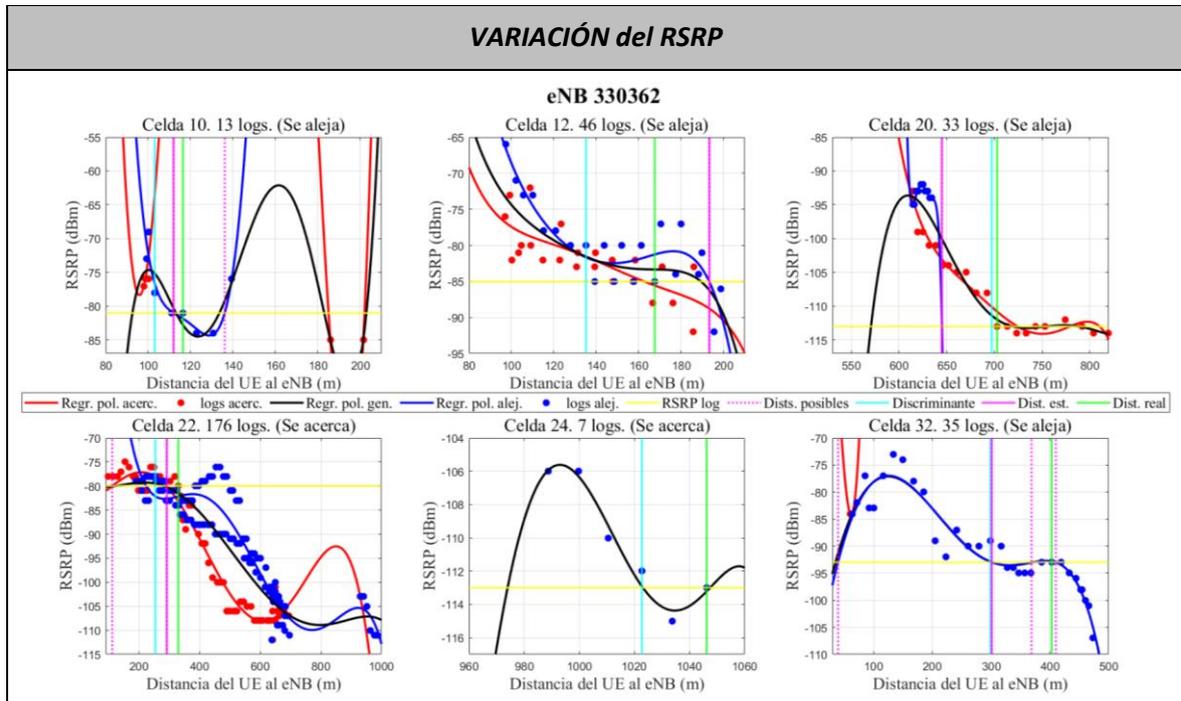
¿Los variación o la tendencia del RSRP es proporcional a la variación de la distancia?		
CID	Variación del RSRP	Tendencia del RSRP
10	✓	✓
12	✓	✓
20	X	✓
22	✓	✓
24	X	✓
32	✓	X

**Tabla 3.12.-** Comparativa de la correlación de las implementaciones del sub-apartado 3.6.4. con la variación real de la distancia para las celdas del eNB 33032.

Si el RSRP aumenta, el UE se acerca al eNB. Si es al contrario, el UE se aleja.

En general, la implementación de la variación es menos fiable debido a la presencia de *outliers* en los valores del RSRP. Tomando el RSRP de varios *logs* y calculando su tendencia, debería de mejorar teóricamente la precisión, al esquivar dichos *outliers*.

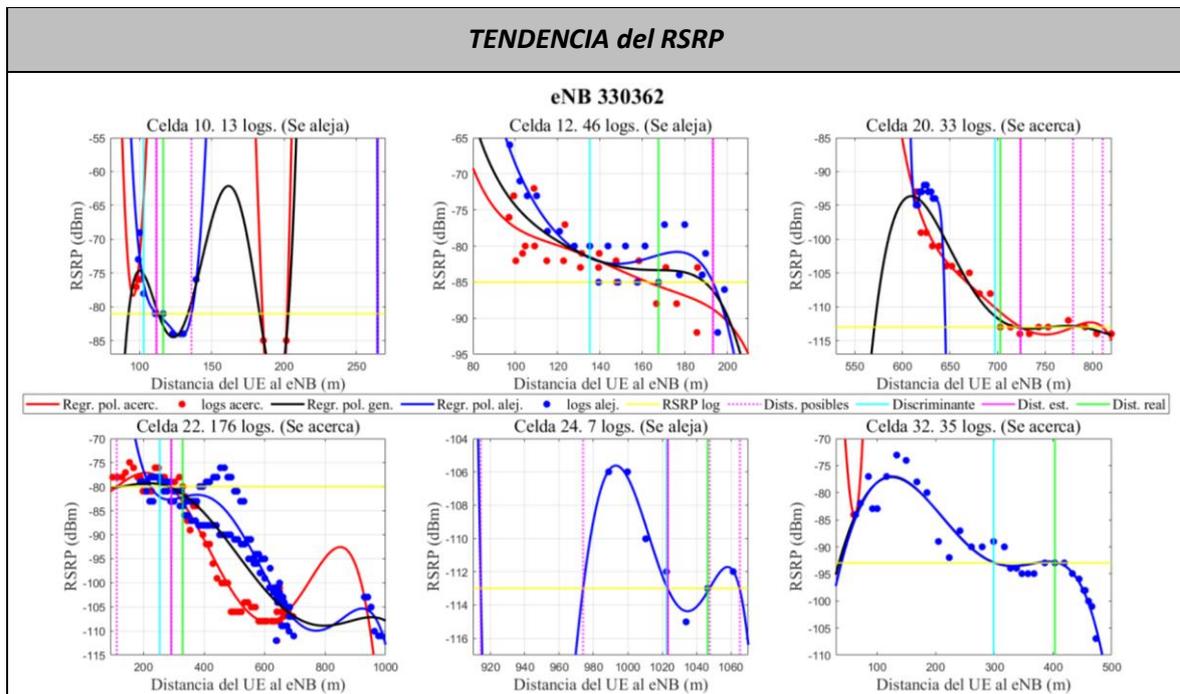
A continuación, se muestra el cálculo de la distancia estimada utilizando los dos métodos descritos en este apartado.



**Figura 3.25.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la variación del RSRP con el *log* anterior con la Proporción Específica del TA como discriminante.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancias posibles (m)	Distancia Proporción Específica del TA (m)	Distancia Estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia	Elección	
									Variación	Distancia
330362	10	2	-81	112 136 264	103	112	116	4	✓	✓
	12	2	-85	193	135	193	167	26	✓	✓
	20	7	-113	645	698	645	703	58	X	✓
	22	5	-80	111 290	253	290	328	38	✓	✓
	24	13	-113	-	79	1023	1046	-	X	-
	32	2	-93	39 301 369 410	299	301	403	102	✓	X

**Tabla 3.13.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Variación del RSRP con el *log* anterior con la Proporción Específica del TA como discriminante.



**Figura 3.26.-** Cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Tendencia del RSRP con los logs anteriores con la Proporción Específica del TA como discriminante.

eNB	CID	TA	RSRP (dBm)	Distancias posibles (m)	Distancia Proporción Específica del TA (m)	Distancia Estimada (m)	Distancia real (m)	Diferencia	Elección	
									Variación	Distancia
330362	10	2	-81	112 136 264	103	112	116	4	✓	✓
	12	2	-85	193	135	193	167	26	✓	✓
	20	7	-113	724 779 810	698	724	703	21	✓	✓
	22	5	-80	111 290	253	290	328	38	✓	✓
	24	13	-113	915 974 1023 1047 1065	1023	1023	1046	23	✓	✗
	32	2	-93	-	299	-	403	-	✗	-

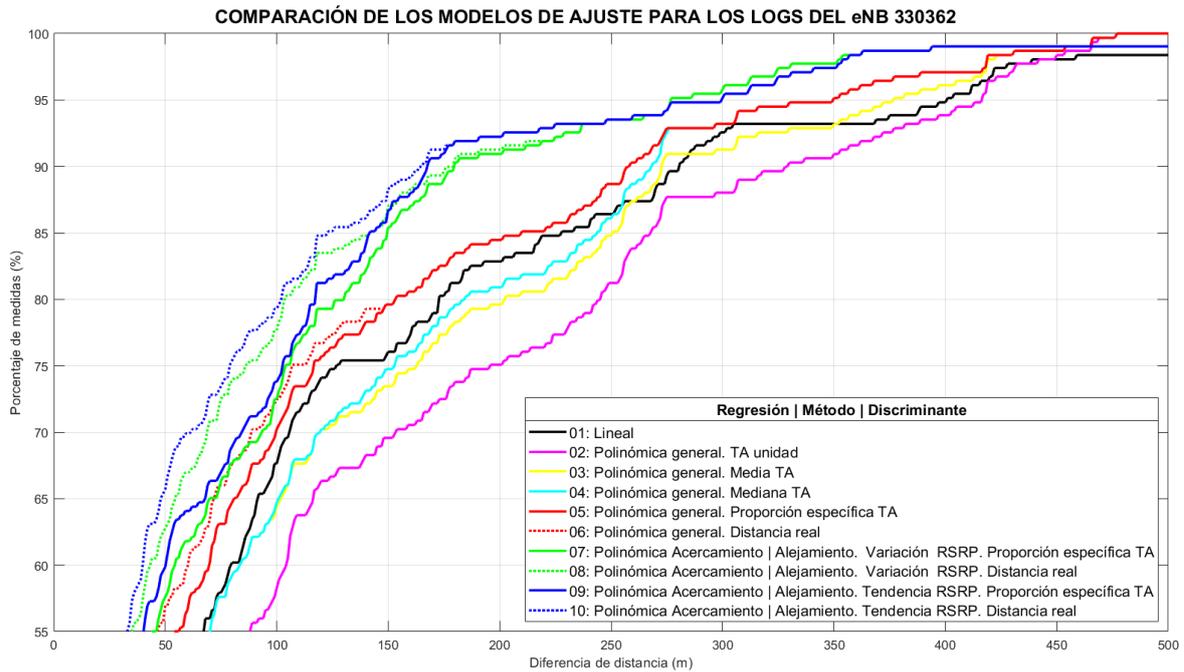
**Tabla 3.14.-** Resultados de la distancia estimada entre el UE y el eNB a partir de la regresión polinómica acercamiento vs alejamiento, basada en la Tendencia del RSRP con los logs anteriores con la Proporción Específica del TA como discriminante.

A modo de resumen de los métodos y discriminantes implementados y explicados en el presente apartado 3.6, en la Tabla 3.15 se muestra una comparativa del error cometido entre la distancia estimada y la distancia real para el ejemplo considerado en el presente apartado 3.6 (eNB 330362).

		Diferencia entre la distancia estimada y la distancia real según el método						
eNB	CID	Lineal	Polinómico general				Polinómico Acerc.   Alej.	
			TA Unidad	Media TA	Mediana TA	Proporción Específica TA	Variación RSRP	Tendencia RSRP
330362	10	23	18	3	3	3	4	4
	12	12	22	22	22	22	26	26
	20	53	132	132	132	16	58	21
	22	115	46	46	46	46	38	38
	24	0	23	23	23	23	-	23
	32	89	368	101	101	101	102	-

**Tabla 3.15.-** Comparativa de la diferencia (en metros) entre la distancia estimada y la distancia real en función de los diferentes métodos y discriminantes explicados en el apartado 3.6 para un *log* aleatorio de cada celda.

En la Figura 3.27 se representa la probabilidad acumulada de dicho error entre la distancia estimada y la distancia real. Al tratarse de un análisis para un ejemplo concreto, en este apartado no se expondrán las conclusiones sobre la precisión de cada uno de los métodos implementados, pues el objetivo en este apartado es describirlos e ilustrar su funcionamiento. El análisis de la precisión de cada método se analizará en el Capítulo 4 y en las conclusiones, una vez analizados múltiples escenarios.



**Figura 3.27.-** Probabilidad acumulada de la diferencia de distancias entre la estimada y la real de las diferentes regresiones, métodos y discriminantes para los *logs* del eNB 330362.

## 4. Resultados obtenidos.

### 4.1.- COMBINACIÓN DE TODOS LOS FICHEROS DE MEDIDAS.

En este primer análisis, se han combinado los *logs* de todas las mediciones realizadas para el TFG con la aplicación *GNetTrack* [6] en un mismo fichero. El motivo ha sido el de generar tanto la BBDD de las celdas y sus respectivos eNBs con los coeficientes de los polinomios de regresión del RSRP, así como la BBDD de las proporciones entre la distancia y el valor del TA.

En la Figura 4.1 se representa la ubicación de todos los *logs* (en negro), relacionándolos con sus respectivos eNBs (puntos en rojo) mediante líneas de colores, las cuales son del mismo color si se trata del mismo eNB. Las ubicaciones de los *logs* medidos en el presente TFG se encuentran, como se observa en la Figura 4.1, en la zona Norte de Asturias, concretamente entre el Aeropuerto de la región y la ciudad de Gijón (Autopista A-8), así como en el propio concejo de Gijón, tanto en entornos rurales como urbanos.

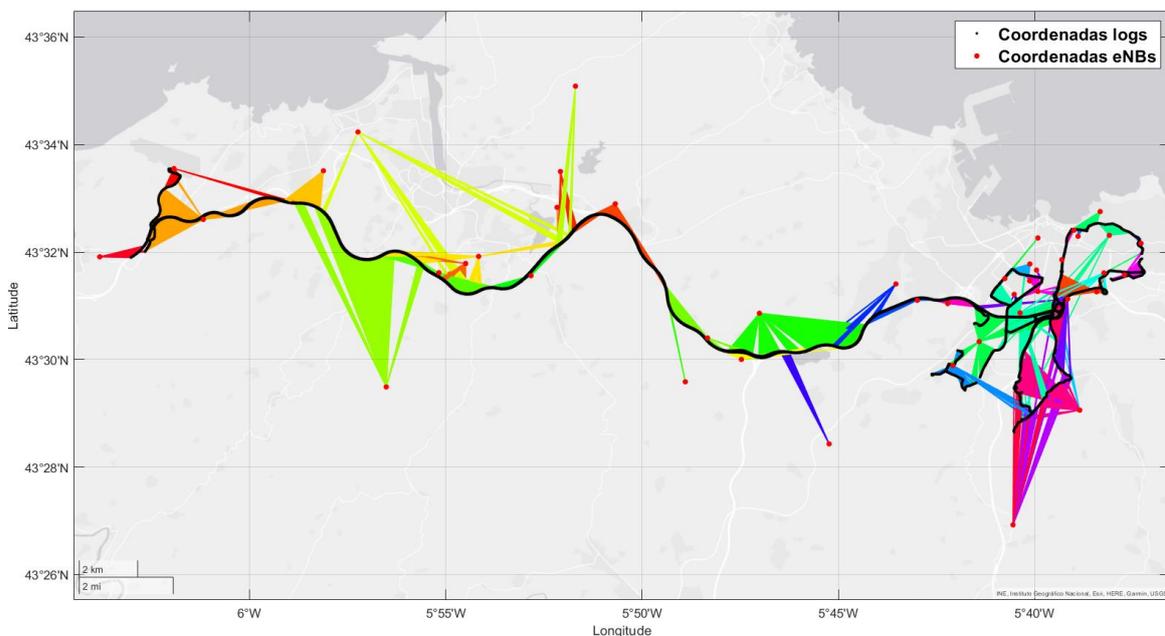
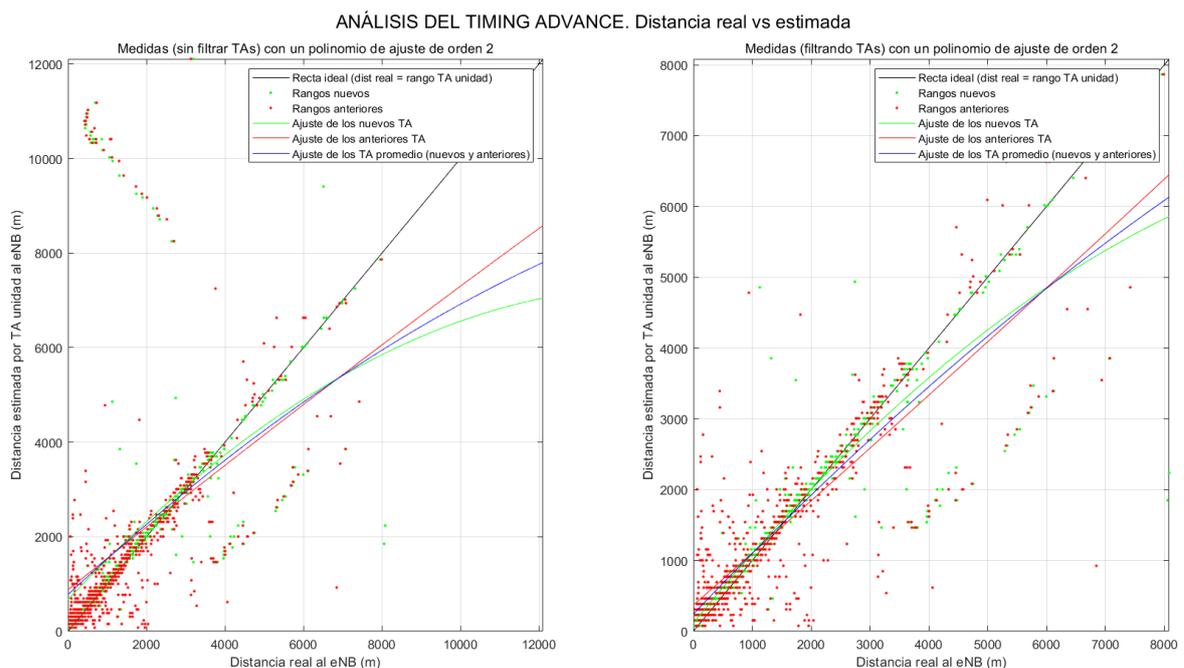


Figura 4.1.- Ubicación de los *logs* y eNBs utilizados en el TFG.

Para comenzar, se ha analizado en la Figura 4.2 la precisión del TA registrado por el UE, comparando la distancia real del UE al eNB frente al rango obtenido a partir de la multiplicación del TA unidad (valor de 78,12 metros) por el valor del TA presente en los *logs* en los que se mide un nuevo TA (en verde), así como en los inmediatamente anteriores (último *log* con el TA calculado con otro valor de distancia del enlace, en rojo).

En la Figura 4.2 se representan dos tipos de análisis: el primero se realizó tomando todos los *logs* donde se produce un cambio del valor de TA (es decir, tomando los *logs* inmediatamente antes y después del cambio) mientras que en el segundo se ha descartado aquellos *logs* en los que el valor de TA era superior a 100. Esto se debe a que se observó que se registraron medidas en las que este valor no tenía correlación con la distancia real del enlace: en la mayoría de los casos, la distancia real era inferior a los 2km por los más de 8km que se obtendrían empleando el valor de TA.

A su vez, en cada gráfica se representan los rangos de los *logs* en los que se registra un nuevo TA, los rangos de los *logs* inmediatamente anteriores, la curva de regresión obtenida para cada conjunto de datos, así como la regresión conjunta. También se representa la recta correspondiente a distancia estimada = distancia real (línea negra en la Figura 4.2).



**Figura 4.2.-** Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad.

En la Figura 4.2 se puede comprobar como filtrando los TAs superiores a 100, la dispersión de los rangos es menor, y las curvas de regresión de los rangos se asemejan más a la recta ideal. También se ve que los últimos *logs* con el mismo valor de TA no difieren de los primeros *logs* en los que el TA es calculado con mayor precisión. Sin embargo, este análisis demuestra que el TA no se puede utilizar como un valor fiable para estimar la distancia del enlace entre el UE y el eNB, ya que se representan muchos de los rangos alejados de la recta ideal.

Una de las causas observadas es que, dado que el valor de TA se actualiza principalmente cuando se pierde sincronismo entre el UE y el eNB, en el caso de desplazamientos a cierta velocidad (ej. con un automóvil), el valor de TA se actualiza ‘a saltos’, pudiendo pasar de un valor  $TA=5$  a un valor  $TA=11$ , lo que resulta en mayores errores para estimar la distancia.

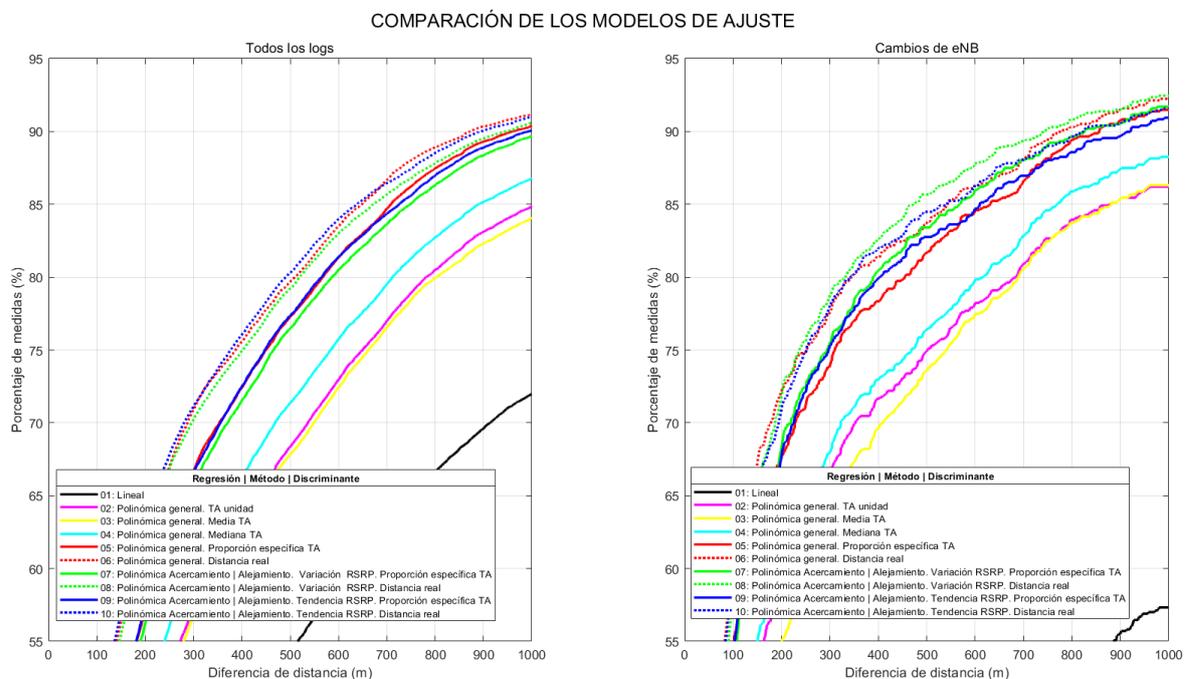
Cuando se toman medidas a baja velocidad (ej. caminando), los ‘saltos’ en los valores de TA se minimizan (observándose que llega a cambiar con paso de una unidad). Por esta razón, en el contexto del presente TFG se recurre a la regresión del RSRP para el cálculo de las distancias estimadas entre el UE y el eNB.

En la Figura 4.3 se representa la probabilidad acumulada de la diferencia de distancias entre la distancia real y la distancia estimada para cada uno de los métodos que utilizan la regresión del RSRP, explicados en el apartado 3.6, y así comprobar que precisión tienen estos métodos.

En la gráfica izquierda de la Figura 4.3 se representa la probabilidad acumulada para todos los *logs*, mientras que la gráfica derecha de la Figura 4.3 corresponde a la probabilidad acumulada de los *logs* en los que el UE realiza el cambio de eNB (momento en el cual se puede disponer de información de dos eNB diferentes, como se explicó en el Capítulo 3).

Para cada gráfica se muestra la probabilidad acumulada correspondiente a cada uno de los métodos de regresión explicados en el apartado 3.6: la lineal, la polinómica general, las mejoras de esta, y la polinómica en función del acercamiento o alejamiento al eNB.

Para las 3 mejores se representan los resultados para el mejor discriminante y, a modo de referencia, la probabilidad acumulada tomando como discriminante la distancia real. De esta forma es posible representar la precisión máxima del método si los discriminantes obtenidos en función del TA, escogieran siempre la mejor solución de las raíces del polinomio de regresión.



**Figura 4.3.-** Probabilidad acumulada. Utilizando el 100% de los *logs* para generar la BBDD y para calcular las distancias. Izquierda: Probabilidad acumulada para todos los *logs*. Derecha: Probabilidad acumulada de los *logs* en los que el UE cambia de eNB.

En base a los resultados de la Figura 4.3 se puede comprobar que, en el análisis de todos los *logs*, el peor método es la regresión lineal, con cerca de 15 puntos por debajo de la peor de las regresiones polinómicas. Entre ellas, el mejor de los discriminantes, la proporción específica del TA aumenta la precisión en unos 8 puntos respecto al TA unidad, con la media del TA con valores similares al TA unidad, y la mediana del TA como opción intermedia.

Utilizando ya siempre la proporción específica del TA como discriminante para los diferentes tipos de regresión polinómica (general vs variación del RSRP vs tendencia del RSRP), la precisión entre los mismos es similar. Como dato interesante, para los casos en que la diferencia de distancia es pequeña, la diferencia de probabilidad para el mismo método entre el uso de la proporción específica del TA y el de la distancia real ronda los 5 puntos, valor que decrece conforme la diferencia de distancia aumenta.

Comparando los resultados entre el cálculo utilizando todos los *logs* y aquellos en los que sólo se produce el cambio de eNB, a excepción de la regresión lineal, los resultados de la probabilidad acumulada son aproximadamente 5 puntos mejores para el caso del cambio de eNB.

Para un análisis más preciso de los resultados, se introduce el parámetro estadístico conocido como la regla empírica, la regla del 68-95-99,7, o la regla de los 3 sigmas, el cual determina la desviación estándar ( $\sigma$ , *sigma*) bajo la cual caerá cada uno de los datos.

En una distribución aproximadamente normal, los valores comprendidos en un intervalo de semiancho una desviación típica ( $\sigma$ ) respecto a la media aritmética ( $\mu$ ) de la muestra, abarcan el 68% de los datos; de semiancho dos desviaciones ( $2\sigma$ ), el 95%; y de semiancho tres desviaciones ( $3\sigma$ ), el 99,7%. Los porcentajes son probabilidades teóricas redondeadas, destinadas solo a aproximar los datos empíricos derivados de una población normal.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados para la probabilidad acumulada de la diferencia de distancias, en el caso de todos los *logs*, y en la Tabla 4.2, en el caso de los *logs* en los que hay cambio de eNB.

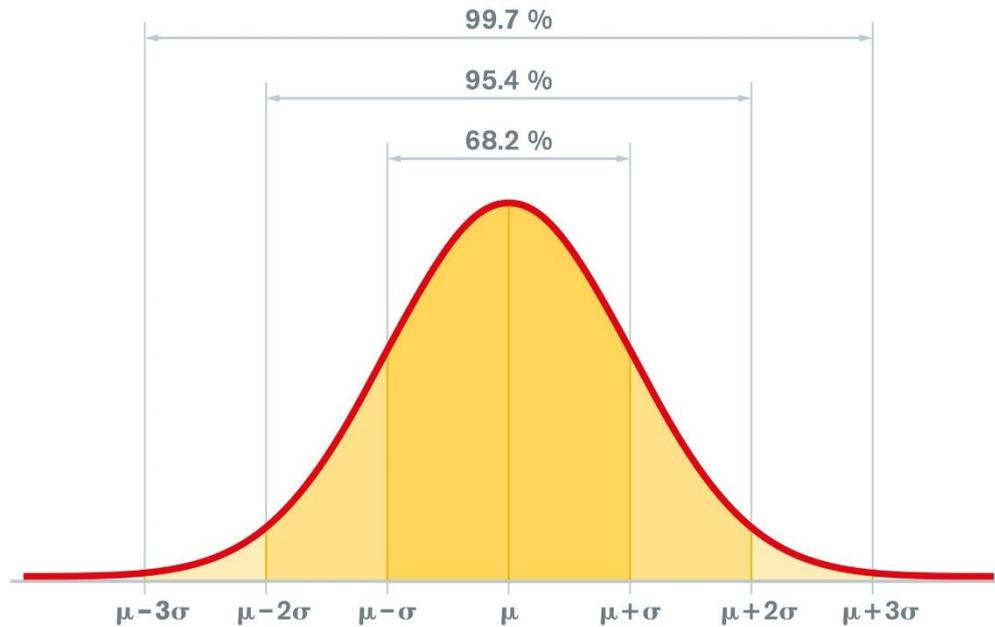


Figura 4.4.- Representación gráfica de la regla de los 3 sigmas.

Utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias (Todos los <i>logs</i> )										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	851	497	512	437	321	264	340	269	328	256
2 sigma (95%)	10000	2073	2118	1912	1694	1657	1780	1742	1725	1656
3 sigma (99.7%)	10000	4081	4123	4123	3954	3954	4963	4963	6413	6413

Tabla 4.1.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los *logs* utilizando el 100% de los *logs* para generar la BBDD y para calcular las distancias.

Utilizando el 100% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y para calcular las distancias ( <i>logs</i> cambio eNB)										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	1657	323	369	303	210	156	200	174	204	175
2 sigma (95%)	9981	2129	1933	1933	1514	1491	1570	1555	1577	1577
3 sigma (99.7%)	9981	3842	4853	4853	3424	3424	6714	6714	6714	6714

Tabla 4.2.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de los *logs* del cambio de eNB utilizando el 100% de los *logs* para generar la BBDD y para calcular las distancias.

La lectura de estos datos sería la siguiente: para el primer resultado de la Tabla 4.1, utilizando el método 1, el 68% de los *logs* tendrían un error entre la distancia estimada y la distancia real de, como mucho, 851 metros. Dicho de otra forma, empleando el método 1 para el cálculo de la distancia, se puede garantizar que el 68% de las medidas presentarán un error igual o inferior a 851 metros. Estos resultados confirman numéricamente lo observado previamente: los métodos implementados mejoran significativamente al primero de ellos (método 1), que es la regresión lineal. El uso del discriminante distancia real, mejora a la proporción específica en unos 50 metros para el caso de 1 sigma.

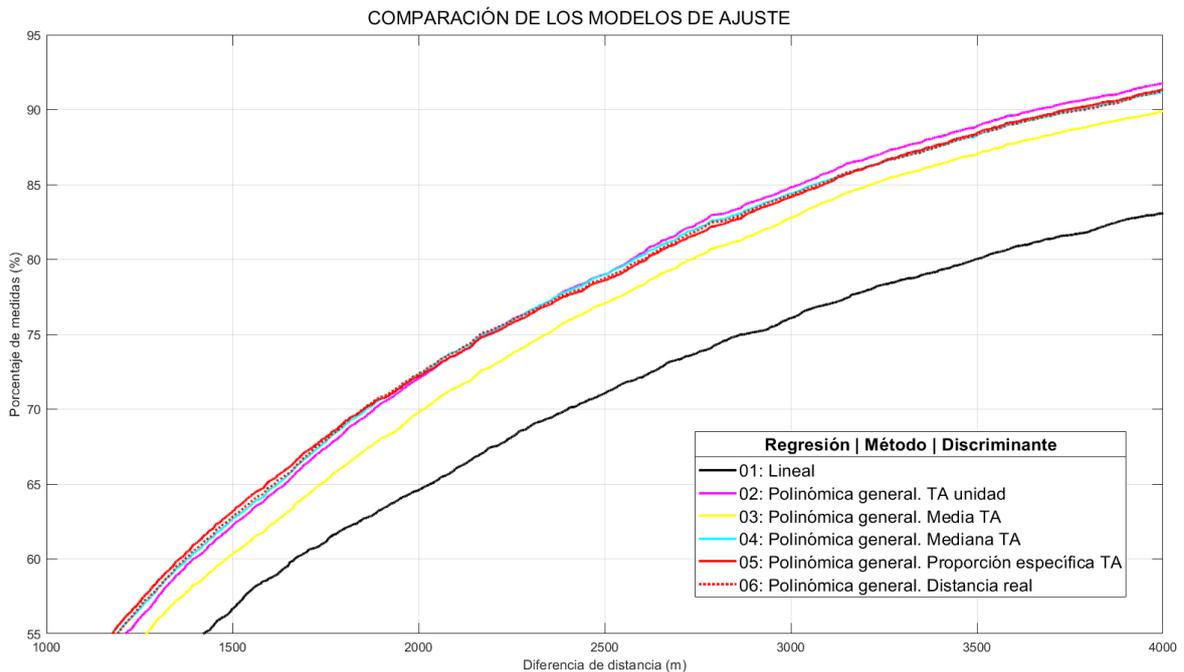
Una vez analizado el error cometido por los diferentes métodos implementados, se llevan a cabo los siguientes análisis para estudiar la robustez de dichos métodos.

### **1. Uso del 50% de los *logs* para crear la BBDD y el 50% restante para los cálculos**

En primer lugar, este análisis tiene su fundamento en ver cómo se comporta la BBDD con una reducción del 50% de los *logs* con los que se calculan los polinomios de regresión. Para que la BBDD fuese robusta, los resultados de la probabilidad acumulada deberían de ser lo más similares posible a los resultados obtenidos utilizando el 100% de los *logs* para crear la BBDD, ya que al reducir el número de *logs* con los que se ‘enseña’ a la BBDD, los resultados deberían de diferir de los resultantes del uso del 100% de los *logs*.

Se ha de indicar que no es posible comprobar el caso de los *logs* de cambio de eNB para la BBDD del 50% de las medidas, debido a que, al quitar la mitad de los *logs*, no se conoce si el *log* del cambio de eNB es realmente un cambio de eNB, o es el precedente o el posterior al cambio del eNB, ya que el del cambio de eNB puede no estar incluido ni en el 50% de la generación de la BBDD ni en el 50% utilizado para el cálculo de las distancias estimadas.

Tampoco es posible comprobar los resultados en los métodos que determinan si el *log* es de acercamiento o alejamiento en función del RSRP por la misma razón, porque puede faltar el *log* anterior (métodos 7 a 10). Por ello, en la Figura 4.5 y en la Tabla 4.3 se muestran solamente los resultados del análisis para los métodos 1 a 6.



**Figura 4.5.-** Probabilidad acumulada. Utilizando un 50% de los *logs* para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias.

Utilizando un 50% de los <i>logs</i> para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias						
MÉTODO	1	2	3	4	5	6
1 sigma (68%)	2259	1794	1919	1768	1760	1765
2 sigma (95%)	9999	4773	5484	4926	4787	4878
3 sigma (99.7%)	9999	7536	7650	7546	7524	7524

**Tabla 4.3.-** Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de todos los *logs* utilizando un 50% de los *logs* para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias.

## 2. Variación aleatoria del RSRP de los *logs* en 1, 3 y 5 dBs con la BBDD del 100%

En segundo lugar, con este análisis se pretende recrear una situación ligeramente diferente a la llevada a cabo durante la toma de medidas, simulando condiciones meteorológicas diversas (ej. lluvia intensa), presencia de diverso grado de multicamino, etc., que puede hacer que el RSRP sea diferente del usado para generar la BBDD estando a la misma distancia. La diferencia entre probabilidades volverá a ser determinante para comprobar la fiabilidad de los métodos. Tan solo se analizarán los métodos con el mejor discriminante, el 5, el 7 y el 9.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE AJUSTE

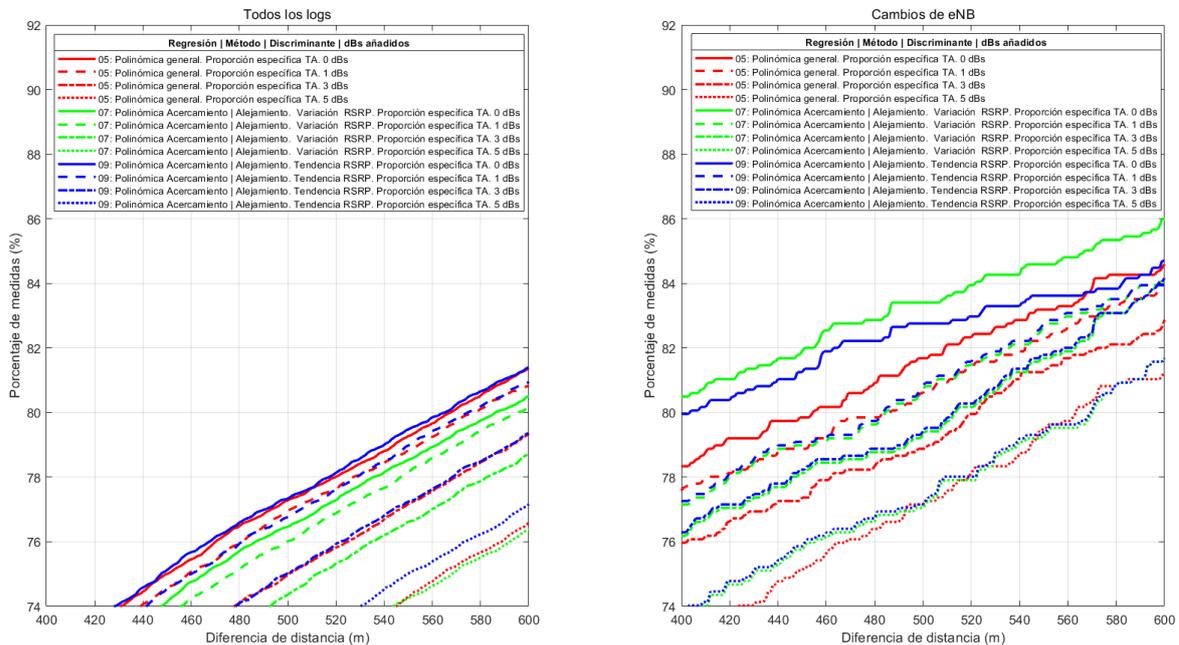


Figura 4.6.- Probabilidad acumulada. Utilizando la BBDD del 100% de los *logs* y variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.

Utilizando la BBDD del 100% de logs y variando RSRP para calcular distancias (Todos los logs)												
MÉTODO (dBs variación)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	321	329	370	438	340	350	382	437	328	340	376	424
2 sigma (95%)	1694	1718	1812	1981	1780	1810	1832	1964	1725	1754	1777	1882
3 sigma (99.7%)	3954	3980	4051	4169	4963	5329	5247	6714	6413	6714	6714	6799

Tabla 4.4.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de todos los *logs* utilizando la BBDD del 100% de los *logs* y variando el RSRP para calcular las distancias.

Utilizando la BBDD del 100% de logs y variando RSRP para calcular distancias (logs cambio eNB)												
MÉTODO (dBs variación)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	210	229	261	314	200	229	246	310	204	228	246	310
2 sigma (95%)	1514	1557	1665	1828	1570	1781	1902	2130	1577	1781	1902	2130
3 sigma (99.7%)	3424	3866	3867	6907	6714	6714	8164	8168	6714	6714	8164	8168

Tabla 4.5.- Diferencia de distancia para cada sigma en el caso de los *logs* del cambio de eNB utilizando la BBDD del 100% de *logs* y variando el RSRP para calcular las distancias.

Las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados mostrados en la Figura 4.6, en la Tabla 4.4 y en Tabla 4.5 han sido las siguientes:

Del primer análisis se extrae que es necesario generar la BBDD con el 100% de los *logs*, ya que, al contrario, la diferencia de distancia para una desviación estándar (68%) crece en casi 1500 metros con el uso de la BBDD del 50% de los *logs* con respecto a la del 100%. Por tanto, es necesario generar una BBDD con una buena cantidad de datos, de lo contrario no será lo precisa que se requiere. La explicación es que el parámetro RSRP es bastante sensible al entorno, y también depende del diagrama de radiación de las antenas que dan cobertura a cada celda del eNB. Por tanto, un correcto modelado de dicho parámetro RSRP también requiere disponer de suficientes medidas. Descartar medidas supone perder precisión en el modelado (si bien se puede establecer un compromiso entre el número de medidas necesarias y precisión obtenida).

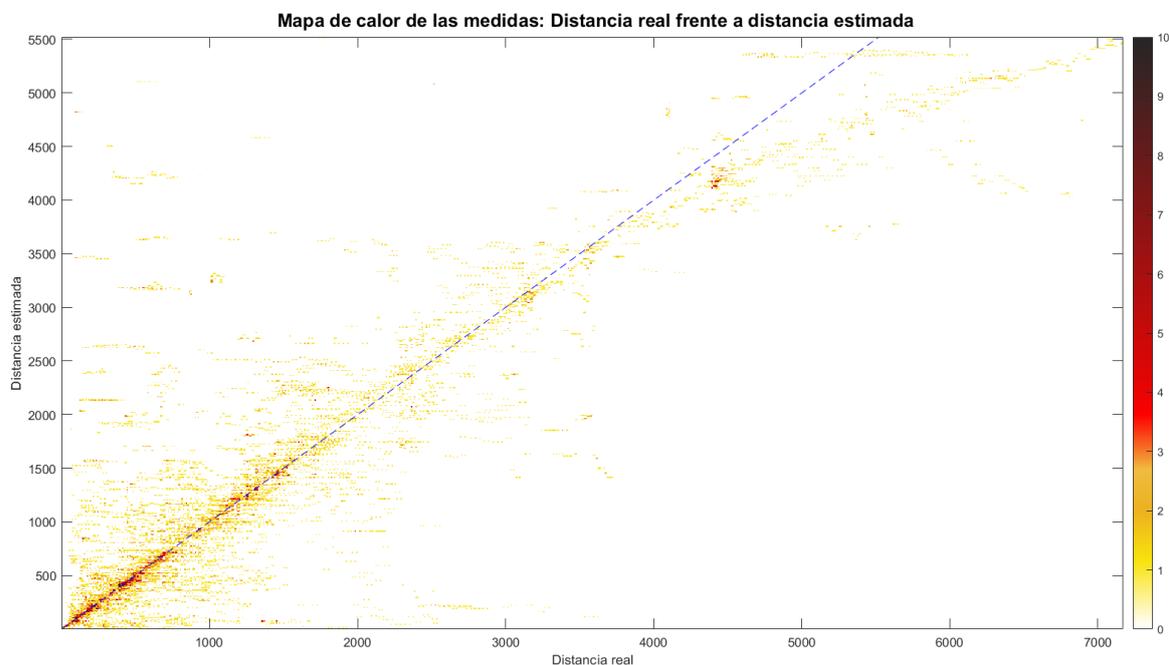
Sin embargo, con el segundo análisis se puede concluir que con el uso del 100% de los *logs* para generar la BBDD, es suficiente para tener unos resultados permisivos en cuanto a la diferencia de distancia. Si modificamos aleatoriamente hasta en 3 dBs el RSRP del *log*, la diferencia de distancia tan solo varía en 50 metros para la primera desviación estándar en los 3 casos analizados. Para 5 dBs de variación, ronda los 100 metros la diferencia entre la estimada y la real.

En particular, para una precisión de 2 sigma (95%), el método 5 difiere en 100 metros para 3 dBs de diferencia, pero se reduce a 50 metros la diferencia en los métodos 7 y 9, aunque ya las diferencias están cercanas a los 2 kilómetros, poca fiabilidad por tanto para el 95% de las medidas.

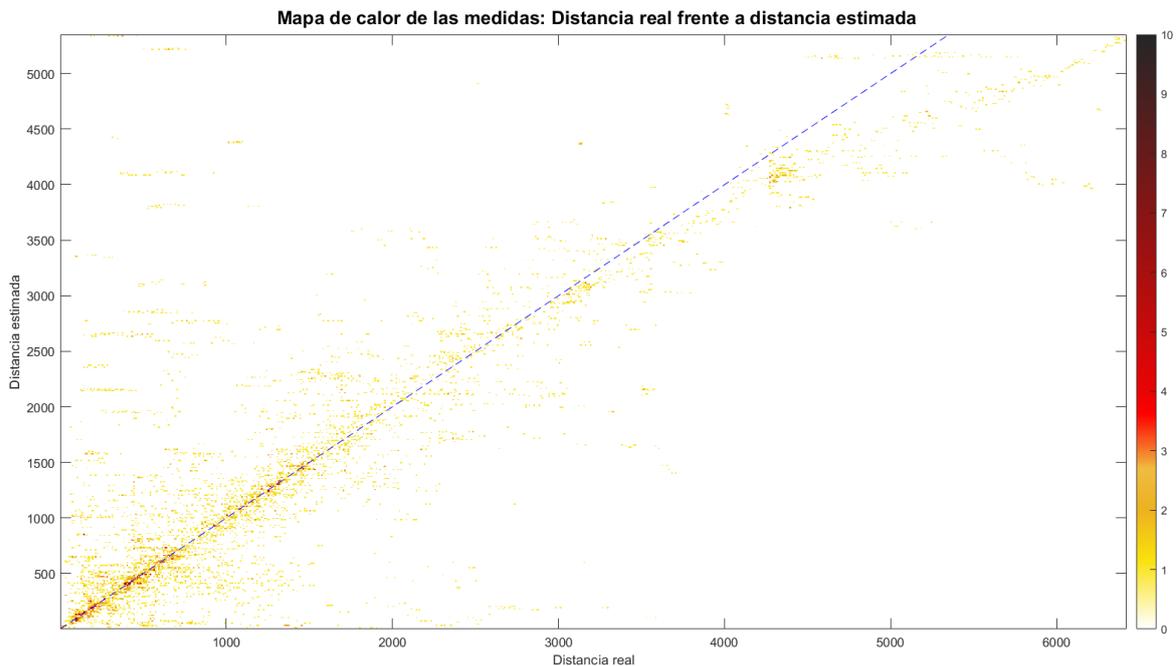
Por tanto, se puede concluir que los métodos son robustos en cuanto a la presencia de fluctuaciones pseudoaleatorias en los niveles de RSRP, pero sí son sensibles a la cantidad de medidas empleadas para construir los modelos que caracterizan la variación del RSRP con la distancia para cada celda de los diferentes eNB donde hay medidas (de forma similar a como sucede con las técnicas de *fingerprinting* para sistemas de radiolocalización, donde la cantidad de medidas tomadas es crucial para el correcto funcionamiento del método).

Para finalizar con el escenario de la combinación de todos los *logs* medidos, se muestran los mapas de calor resultantes de la comparativa entre la distancia real y la distancia estimada. Para ello se toma como referencia el método 5, correspondiente a la regresión polinómica general con el mejor discriminante, la proporción específica del TA. Al igual que en otras gráficas, se representa la línea correspondiente a distancia real = distancia estimada (trazo azul discontinuo en la Figura 4.7).

La escala de colores representa número de medidas o *logs* para cada par ordenado (distancia real, distancia estimada). Si no hay *logs* que tengan un par (distancia real, distancia estimada) concreto, esa posición se presenta con el color equivalente al número 0, el blanco. Si hay una, en amarillo; dos o tres, en naranja; y así sucesivamente hasta 10, que es el par que más repeticiones ha producido, en negro. En la Figura 4.7 se representa el mapa de calor sin modificaciones, mientras que en la Figura 4.8 y en la Figura 4.9 se representan los mapas de calor relativos a los análisis de robustez.



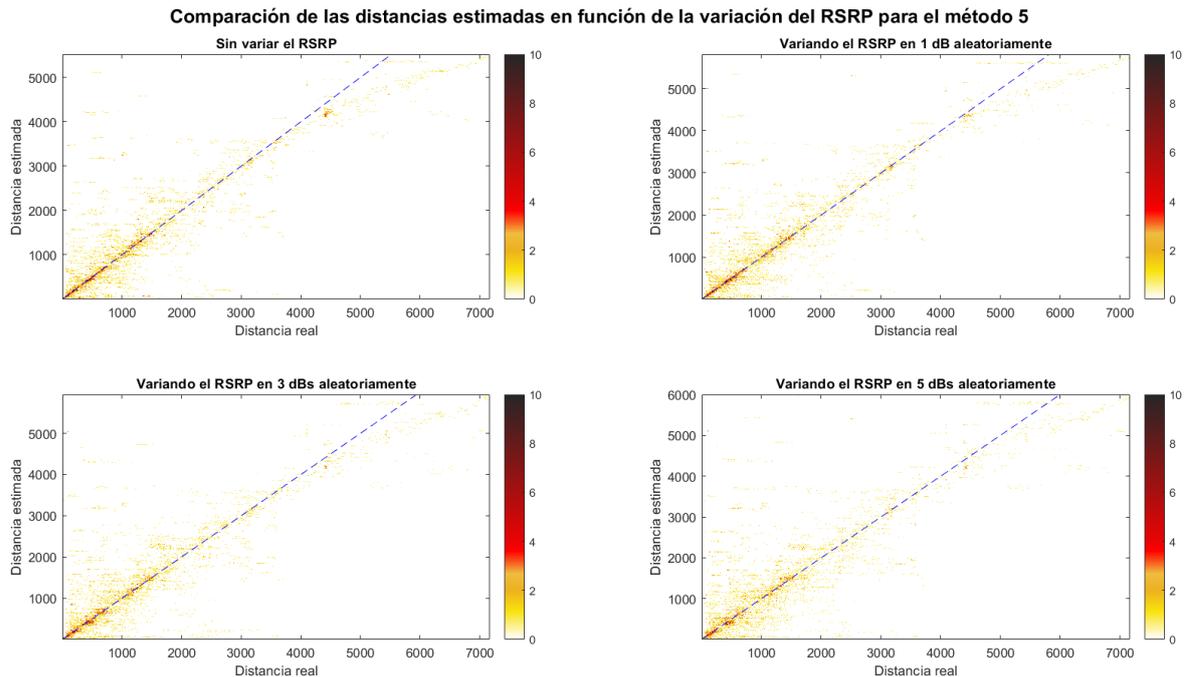
**Figura 4.7.-** Mapa de calor. Utilizando el 100% de los *logs* para generar la BBDD y para calcular las distancias.



**Figura 4.8.-** Mapa de calor. Utilizando un 50% de los *logs* para generar la BBDD y un 50% para calcular las distancias.

En la Figura 4.8, que representa el mapa de calor para la BBDD del 50% de los *logs* junto con el otro 50% para los cálculos, se pueden apreciar una importante reducción de la intensidad de los colores rojo y negro, debido a la menor presencia de repeticiones en los pares de distancia, los cuáles se convierten en más naranjas y amarillos. Esto tiene que ver en parte con la reducción en un 50% del número de medidas a representar. Sin embargo, no toda la reducción de la intensidad tiene que ver con la reducción de las medidas. Se puede comprobar que el número de medidas dispersas, donde no coinciden la distancia real y la estimada, sigue manteniéndose parecido. Por tanto, menor intensidad de los colores en la zona ideal y similar intensidad en la zona dispersa, representa una peor estimación en comparación con el uso del 100% de los *logs*.

Por último, en la Figura 4.9, se representa el mapa de calor para el método 5 variando el RSRP en 1, 3 y 5 dBs. A medida que se aumenta esta variación, decrece la intensidad en la zona ideal, pero no lo hace de forma tan brusca como en la Figura 4.8. Se puede comprobar que la diferencia entre no variar el RSRP y variarlo en varios dBs apenas es apreciable, lo que fundamenta la robustez del método en cuanto a fluctuaciones de RSRP frente a la cantidad de medidas empleadas.



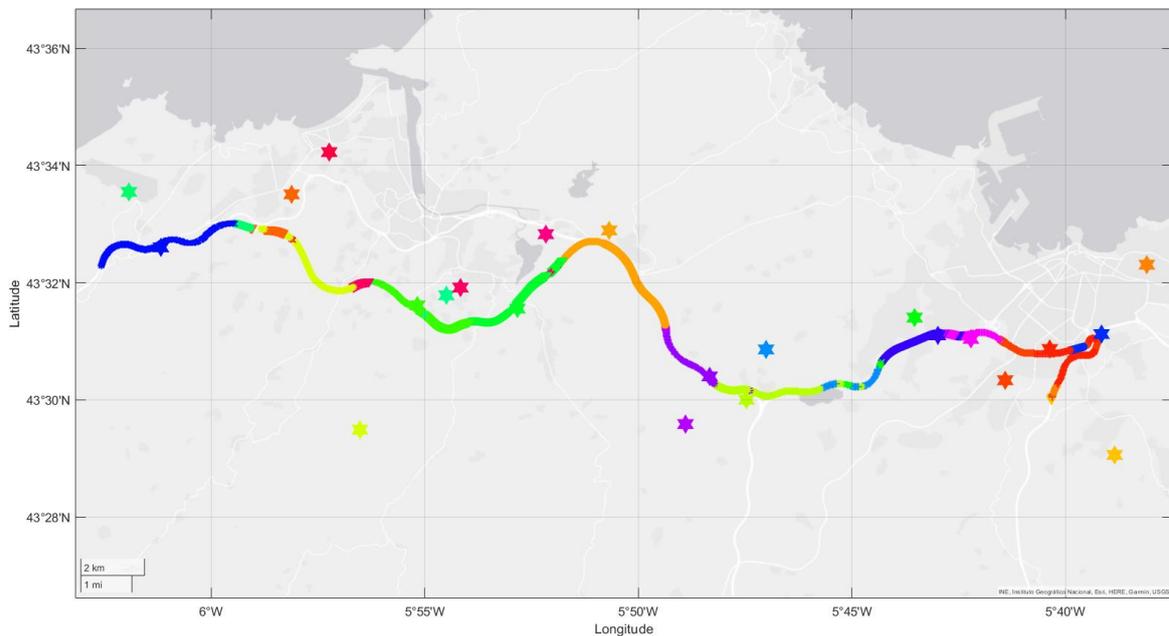
**Figura 4.9.-** Mapa de calor. Utilizando la BBDD del 100% de los logs y variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.

## 4.2.- ANÁLISIS DE UN ESCENARIO MIXTO EN UN VEHÍCULO.

En este apartado se va a analizar la precisión en el cálculo de la distancia estimada entre el UE y el eNB en un escenario en el que los *logs* se toman en un vehículo circulando por una autopista a velocidades entre 80 y 120 km/h en función de las condiciones del tráfico.

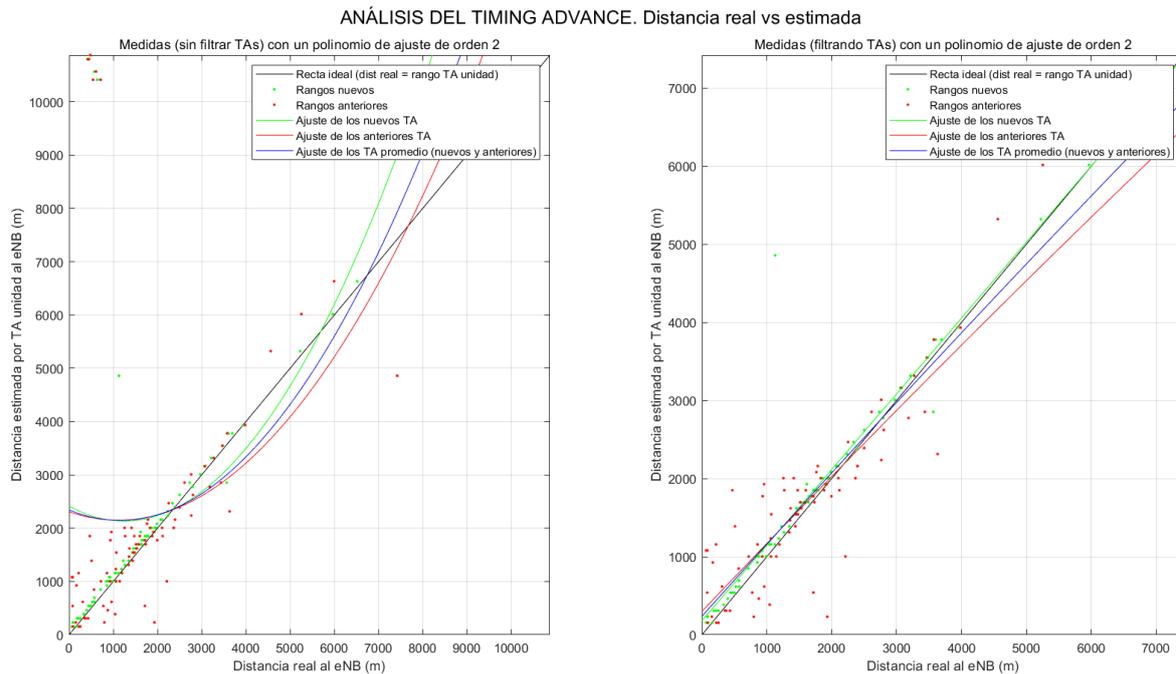
El trayecto registrado comienza en el Aeropuerto de Asturias, al Oeste de Avilés, en dirección a Gijón, al Este. En la Figura 4.10 se puede ver los *logs* que forman parte del trayecto, compartiendo color con los que coinciden en el eNB. Se puede observar que, generalmente, el UE se conecta los eNB más cercanos, aunque se pueden dar alguna excepción en la que, en el caso de saturación de ese eNB, se conecte a uno más lejano.

Otra excepción es la de algún eNB que se encuentre en una posición geográfica que ofrezca condiciones de LOS con el UE, como los *logs* de color amarillo cercanos a Avilés, cuyo eNB correspondiente se encuentra en el Pico Gorfolí (punto amarillo cercano a Avilés en la Figura 4.10), el cual se ve desde prácticamente toda la geografía del concejo de Avilés.



**Figura 4.10.-** Ubicación de los logs y eNBs del escenario mixto en un vehículo.

Como el trayecto se realiza en un vehículo a alta velocidad (aproximadamente 100 km/h), el empleo del valor de TA puede dar lugar a mayores errores en la localización del UE, ya que como se ha explicado, el valor del TA cambia a saltos y no se actualiza de manera constante. Por esta razón, la diferencia en distancia puede cambiar notablemente en pocos segundos. Esto significa que el nuevo valor del cálculo será fiable, pero teóricamente no debería de serlo el último TA del *log* previo al cambio de valor de TA. Para ello se analiza el rango del TA en la Figura 4.11, representando los valores del rango en función de la distancia real. Se representan dos casos, considerando y sin considerar los valores de  $TA > 100$ .



**Figura 4.11.-** Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de TA > 100.

En primer lugar, como se observa en la Figura 4.11 (izquierda), las curvas de regresión utilizando todos los TAs sin filtrar los superiores a 100, difieren de lo que es la recta ideal. Sin embargo, realizando el filtro, en la Figura 4.11 (derecha) se observa que tanto la regresión de los nuevos TA como la de los anteriores se asemejan a la recta ideal, con poca diferencia entre esta y el polinomio de regresión. Esto demuestra a simple vista que las distancias estimadas por el TA coinciden con la distancia real tanto en los nuevos TA como en los anteriores. Sin embargo, con un análisis más exhaustivo, se observa que la representación de los nuevos TA (en verde) presenta un error cuadrático mínimo, es decir, que los puntos en verde están cerca de la recta de regresión verde. Al contrario, la representación de los anteriores TA (en rojo), presenta un gran error cuadrático entre los puntos en rojo y la recta de regresión roja.

Esto coincide con la explicación proporcionada al principio del presente apartado: cuando el UE se desplaza a cierta velocidad, la distancia entre el eNB y el UE varía rápidamente, cuando aún no lo hace el TA. Por tanto, la distancia estimada para los anteriores TA al cambio del valor del TA no es calculada correctamente, por lo que el TA medido en un vehículo es poco fiable salvo en el momento en el cual se actualiza el valor del TA.

A continuación, en la Figura 4.12 se analizará la probabilidad acumulada con los métodos explicados anteriormente, y se compararán los resultados con los obtenidos en el apartado 4.1. En este apartado 4.2, el trayecto en un vehículo se ha realizado en un escenario mixto, la autopista, que combina zonas en las que el eNB se encuentra a poca distancia de la calzada de la autopista frente a otras en las que se encuentra más alejado.

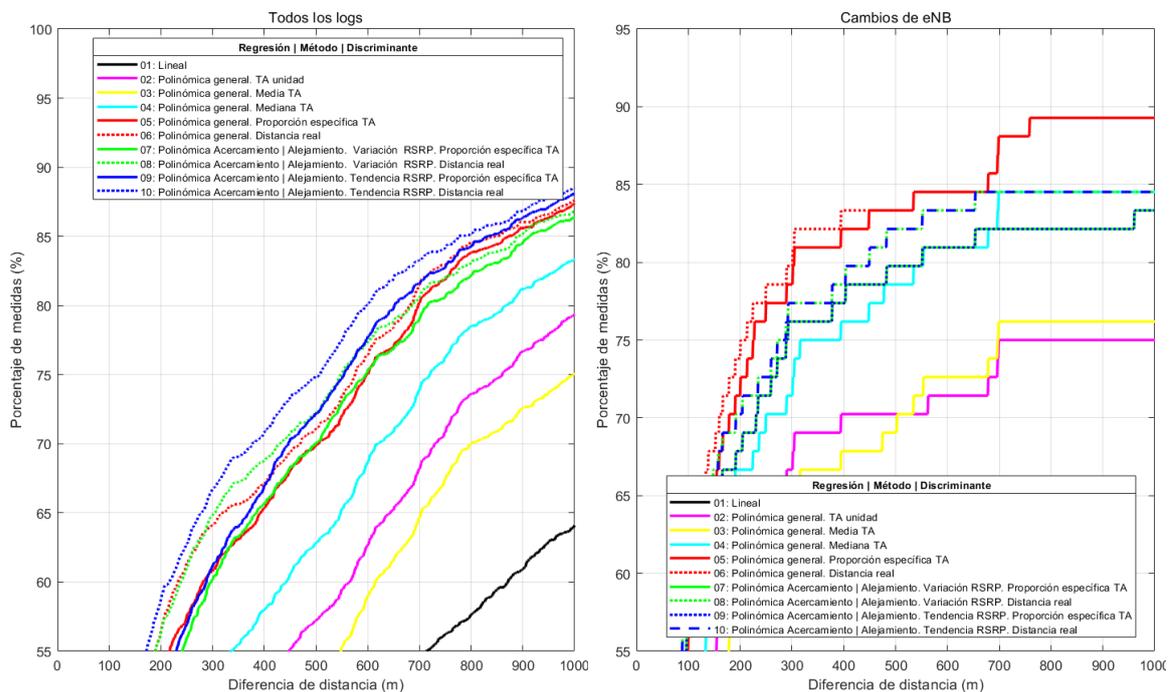


Figura 4.12.- Probabilidad acumulada para el escenario mixto en un vehículo.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en un vehículo en el escenario mixto										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	1187	699	762	595	453	421	450	381	418	327
2 sigma (95%)	10000	2001	1974	1889	1801	1801	1999	1999	1835	1835
3 sigma (99.7%)	10000	4700	4700	4700	4700	4700	4702	4702	3465	3465

Tabla 4.6.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los logs en el trayecto en un vehículo en un escenario mixto.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en un vehículo en el escenario mixto										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	4845	302	395	225	160	139	192	158	192	158
2 sigma (95%)	7719	1905	1826	1710	1072	1072	1831	1831	1831	1831
3 sigma (99.7%)	7719	2798	2182	2182	1710	1710	3982	3982	3982	3982

**Tabla 4.7.-** Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los *logs* del cambio de eNB en el trayecto en un vehículo en un escenario mixto.

Los resultados que salen de la comparación entre los *logs* del trayecto en un vehículo en un escenario mixto frente a todos los *logs* se pueden resumir en que para el 68% de las medidas (1 sigma), el trayecto en un vehículo reduce la precisión en 100 metros para todos los *logs* y en 50 metros en el cambio de eNB. Estos resultados son, por tanto, menos precisos que los obtenidos en el apartado 4.1 (resultados de localización cuando se emplea el conjunto completo de medidas realizadas en todos los escenarios).

La causa más probable de este empeoramiento se debe a una combinación de la imprecisión del discriminante (en este caso el TA se mide en un vehículo a cierta velocidad) junto a las grandes distancias del enlace formado entre el eNB y el UE en alguno de los casos. Aunque haya LOS entre ambos, a una distancia de 5 km, un error de 100 metros es muy posible en el cálculo de las soluciones del polinomio de regresión. Cabe reseñar que en este escenario no siempre se dan grandes distancias en el enlace. Por tanto, la unión de estas dos limitaciones es la explicación del empeoramiento observado.

A continuación, se analiza la robustez del escenario en situaciones en las que el RSRP medido en el trayecto pueda diferir al del utilizado para generar la BBDD encontrándose a la misma distancia el UE del eNB.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE AJUSTE VARIANDO EL RSRP ALEATORIAMENTE

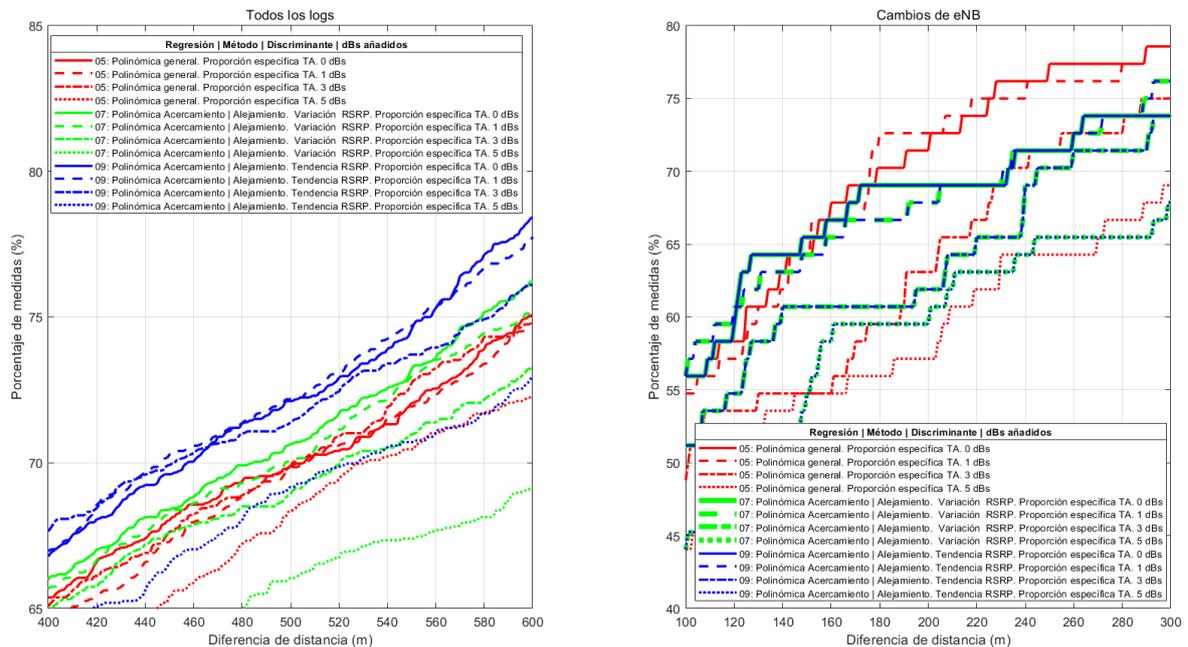


Figura 4.13.- Probabilidad acumulada para el escenario mixto en un vehículo variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en un vehículo en el escenario mixto variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	453	470	460	499	446	450	477	584	427	418	416	482
2 sigma (95%)	1801	1855	1889	1988	1997	1999	1944	2116	1780	1835	1831	1974
3 sigma (99.7%)	4700	4720	4755	4759	4718	4702	4731	4759	3529	3465	3982	3982

Tabla 4.8.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los logs en el trayecto en un vehículo en escenario mixto y variando el RSRP aleatoriamente.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en un vehículo en el escenario mixto variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	160	174	225	289	167	192	240	299	167	192	240	299
2 sigma (95%)	1072	1278	1269	1638	1831	1831	1831	1915	1831	1831	1831	1915
3 sigma (99.7%)	1710	2734	2739	2745	3465	3982	3982	3982	3465	3982	3982	3982

Tabla 4.9.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el trayecto en un vehículo en escenario mixto y variando el RSRP aleatoriamente.

Del análisis de la robustez de los métodos para este escenario se pueden sacar las siguientes conclusiones. En primer lugar, para el caso de todos los *logs*, en el 68% de los casos (1 sigma), las distancias estimadas variando el RSRP en 3 dBs no superan los 30 metros de error respecto a la real, llegando incluso en ocasiones a mejorar la distancia calculada con el RSRP recibido, sin variarlo, como en el caso del método 9. Esto se puede producir en el caso de que algunos de los valores con los que se generó la BBDD hayan sido *outliers* y con un RSRP diferente, que en teoría sea más realista para dicha distancia, se calcule mejor la misma. Aun así, la precisión de 1 sigma para todos los *logs* se sitúa en torno al casi medio kilómetro, valor muy elevado.

En el caso de los *logs* del cambio de eNB, la diferencia de distancia al variar el RSRP de manera aleatoria es más notable que en el caso de todos los *logs*. Esta puede variar hasta más de 50 metros para 3 dBs de modificación. Sin embargo, la precisión que ofrecían los métodos para los *logs* del cambio de eNB apenas superaba los 150 metros, por lo que aun así la fiabilidad es bastante buena.

Finalmente, se representa el mapa de calor de las distancias estimadas calculadas mediante el método 5, con el RSRP original y variando el mismo. En la Figura 4.14. se muestra el mapa de calor de las distancias calculadas con el valor original del RSRP, y que corrobora los resultados de las figuras y tablas precedentes. Para distancias pequeñas, los resultados son los esperados, con la mayor densidad de distancias en torno a la recta ideal. Sin embargo, a medida que la distancia real aumenta, la distancia estimada es menor, incrementándose dicho error con el valor de la distancia real. Este resultado se puede relacionar con que a mayor distancia entre el UE y el eNB, mayor puede ser el error cometido teniendo en cuenta también la imprecisión del TA al ser el registro en un vehículo.

Por último, en la Figura 4.15 se representan los mapas de calor variando aleatoriamente el RSRP. Se puede observar que, a medida que se aumenta el RSRP a variar, la densidad de los *logs* en torno a la recta ideal decrece, pero también lo hace algún *log* que ha subestimado la distancia real, debido a que la BBDD fue generada con algunos *outliers* y

al variar el RSRP se puede dar con el RSRP que correspondería al  $\log$  con el que se calculó la distancia.

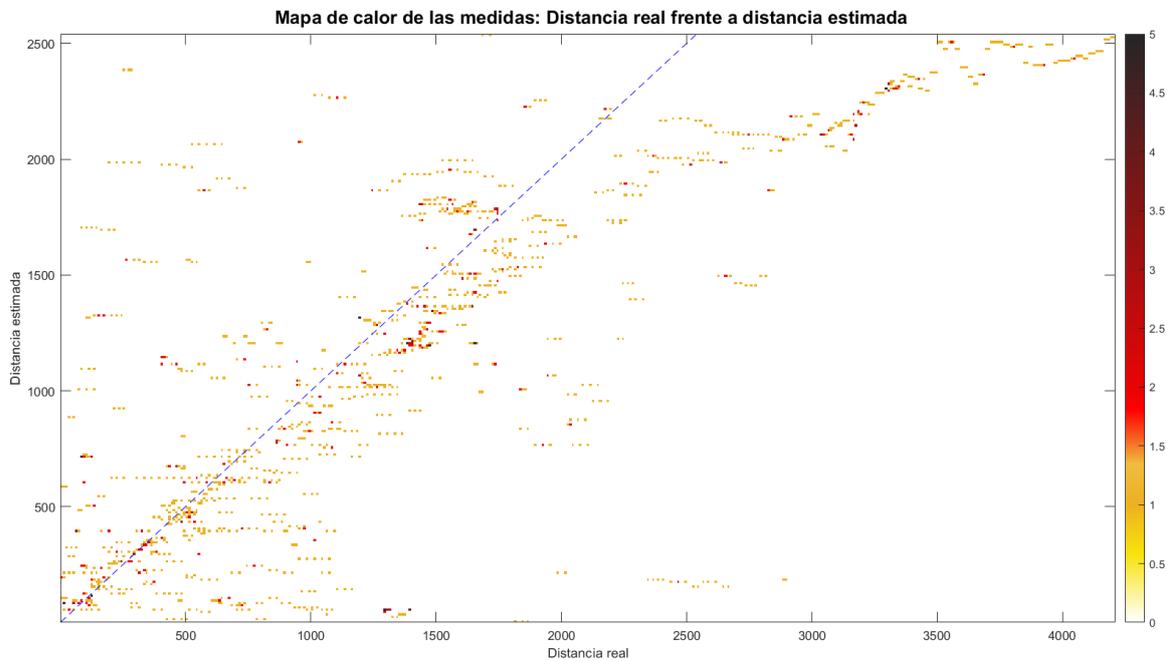


Figura 4.14.- Mapa de calor para los  $\log$ s del escenario mixto en un vehículo.

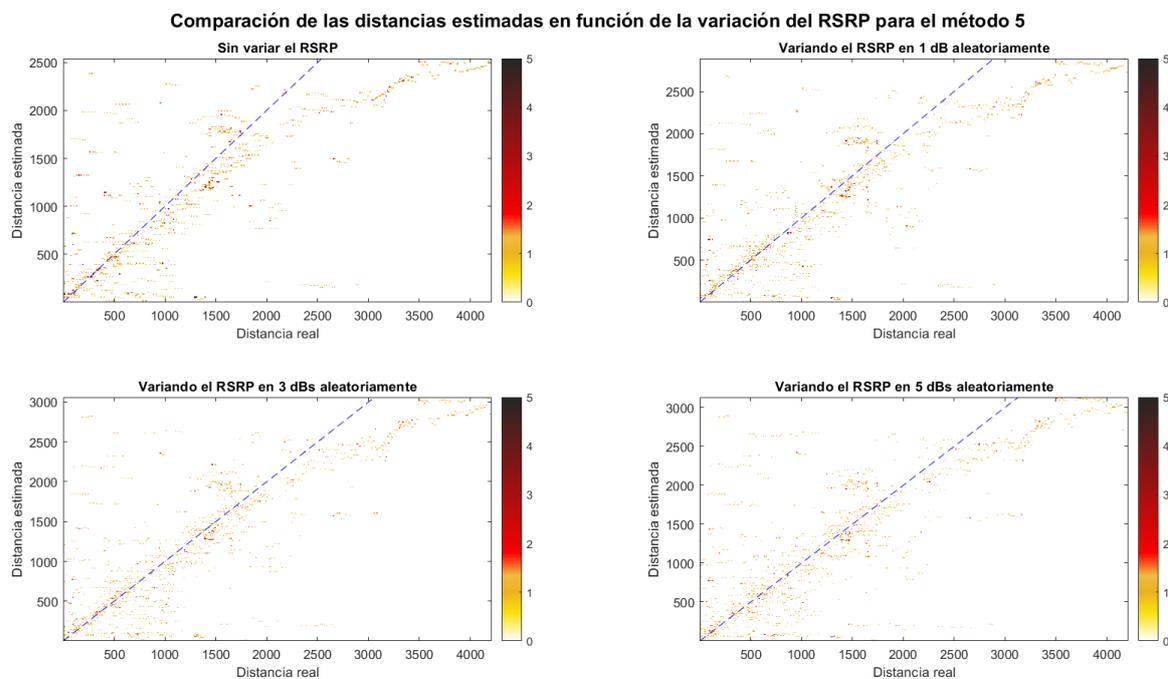


Figura 4.15.- Mapa de calor para el escenario mixto en un vehículo variando el RSRP.

### 4.3.- ANÁLISIS DE UN ESCENARIO CAMINANDO.

En este apartado el objetivo es analizar el comportamiento del TA en un escenario en el que las medidas se han registrado caminando. Las medidas que se han realizado caminando corresponden únicamente al eNB 330002, ubicado en el polígono de Porceyo de Gijón. Por ello, en este ejemplo concreto, no será posible el análisis en un cambio de eNB.

En este escenario, el eNB se encuentra en una posición en la que cuanto más se acerca el UE al eNB, se pasa de una situación donde hay LOS entre el UE y el eNB a un escenario NLOS. Ello contrarresta el incremento en el RSRP por la reducción de la distancia, con la disminución del RSRP por el aumento del NLOS. Por esta razón, no es un escenario fiable para analizar el RSRP, por lo que se analizará solamente el TA de una manera más detallada.

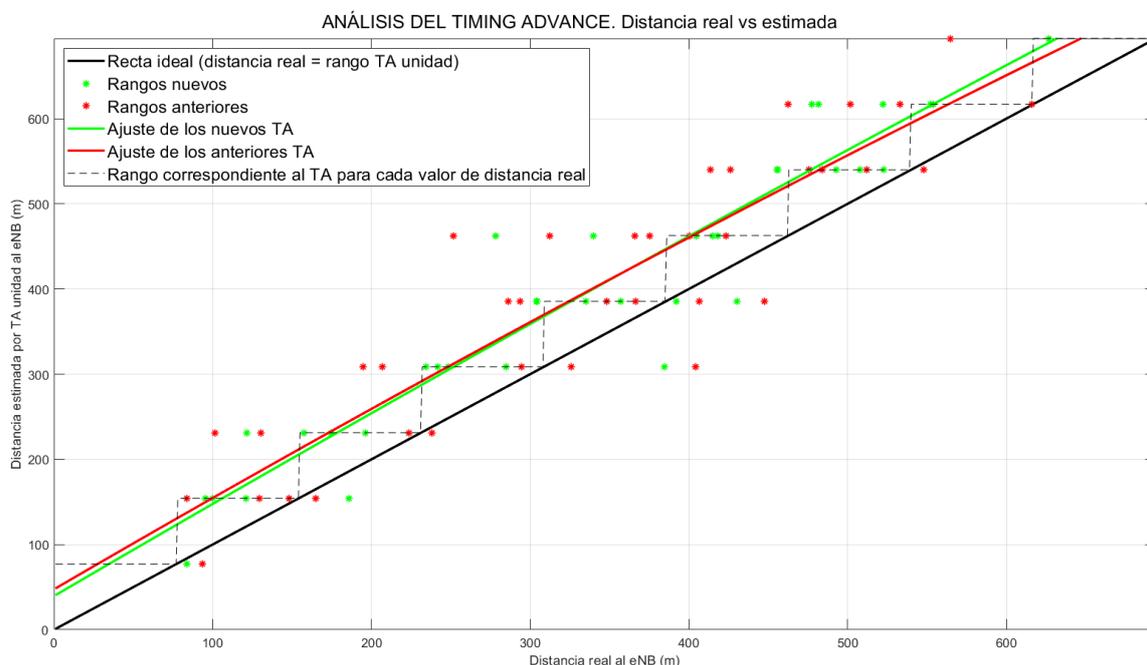
En la Figura 4.16 se muestra la ubicación de los *logs* junto con la del eNB, coloreándose los puntos de medida en función el TA. De esta forma se puede analizar qué valor tiene el TA en función de la distancia a la que se encuentra el UE del eNB.



Figura 4.16.- Ubicación de los *logs* y eNB utilizados en el escenario caminado.

En la Figura 4.16. se puede apreciar cómo, lógicamente, el TA aumenta cuanto mayor es la distancia entre el eNB y el UE. Sin embargo, su fiabilidad no es total, ya que hay mediciones a las que le correspondería otro valor del TA. Por ejemplo, a algunos de los *logs* que les correspondería un valor de TA de 2 presentan un valor de TA de 3, lo cual también se observa para algunos *logs* con TA de 5 y 6, así como de 7 y 8. En todo caso, el error no va más allá de un TA, es decir, se incrementa o decremента de forma consecutiva, y no a saltos de varias unidades de TA como en el caso de los escenarios donde se toman medidas a bordo de un vehículo.

A continuación se analiza la diferencia entre la estimación de la distancia al medir un nuevo TA frente a la estimación de la distancia del último *log* previo a un cambio de TA. Al ser un registro de un menor número de *logs*, también han sido menos los cambios de valor del TA. Aun así, son suficientes para analizar el comportamiento del TA en un escenario en el que las medidas se ha registrado caminando.



**Figura 4.17.-** Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad.

En primer lugar, la diferencia en la dispersión de los puntos entre los rangos nuevos y los anteriores se reduce por completo, como se observa en la Figura 4.17. Los rangos de

ambos colores se representan alternados, sin poder distinguirse qué color presenta una peor estimación. También se puede visualizar mejor el escalonamiento que produce el TA unidad.

En cuanto al ajuste por regresión de los rangos, se observa que son similares tanto el ajuste de los nuevos como el de los anteriores a los nuevos, con una pendiente similar. Además, se puede comprobar que ambas son paralelas a la recta ideal, es decir, el desfase que presenta la regresión de la distancia estimada en 0 metros es similar al que presenta en 600 metros, observándose que existe un offset (de valor menor que 1 TA) entre la distancia real y la estimada, para todo el rango de distancias analizado en este ejemplo.

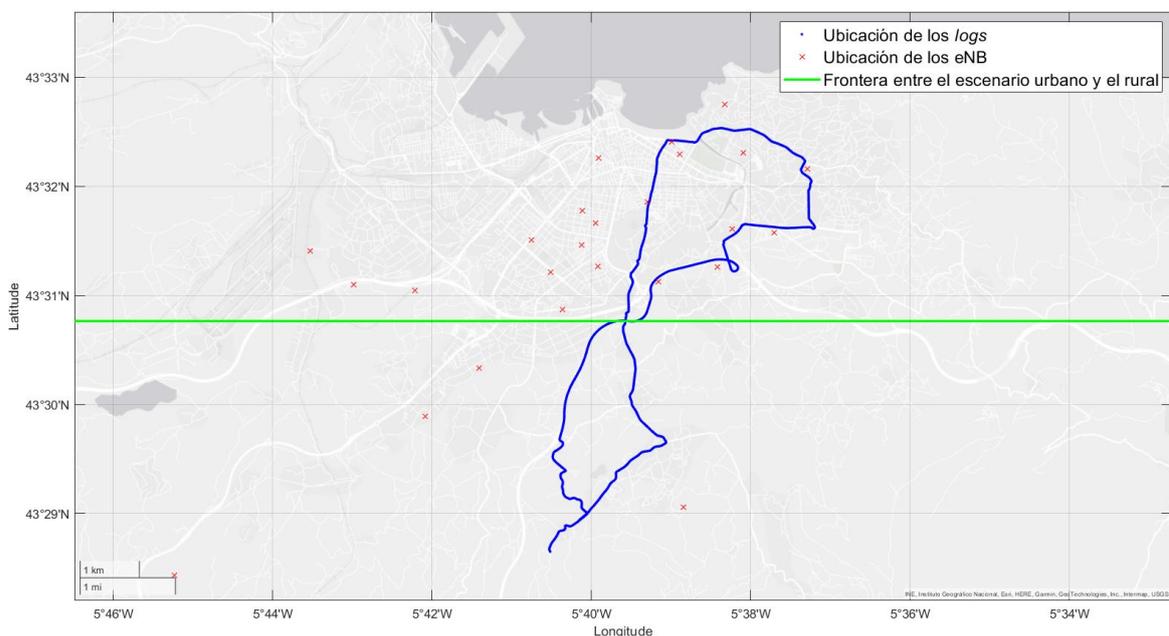
La Figura 4.17 ayuda a resolver una de las incógnitas que presenta el TA. Para 78 metros, la red asigna al UE un TA de valor 1, TA 2 para 156 m, TA 10 para 780 m, etc. Sin embargo, cuando la distancia es la mitad de un intervalo, ¿qué valor se le asigna al TA?

Por ejemplo, si la distancia es la mitad de 39 metros, qué valor se asigna, ¿0 o 1?; cuando la distancia es 117 metros, qué valor se asigna ¿1 o 2?, ya que correspondería a un TA de valor 1,5. La respuesta se obtiene del análisis de la Figura 4.17. Al sobreestimar la distancia con ese desfase en las regresiones, y con la representación de la gráfica escalón en negro discontinuo, se puede concluir que, generalmente, al TA se le asigna el valor inmediatamente superior. Por ejemplo, si el cociente entre la distancia real y 78,12 es 7,3, al TA se le asigna el valor 8. Aunque puede haber casos aislados en 240 logs, la media de la diferencia entre el valor del TA asignado y el del cociente mencionada ha sido de 0,788, mientras que la mediana ha sido de 0,791.

#### 4.4.- ANÁLISIS DE UN ESCENARIO URBANO.

En el presente apartado se analizará un escenario en el que los logs se han tomado circulando en un vehículo por una ciudad. Este se trata de un extracto de un registro del doble de medidas, el cual ha sido circular, y por el que se han pasado tanto zonas urbanas (la ciudad de Gijón) como rurales (pueblos del concejo de Gijón).

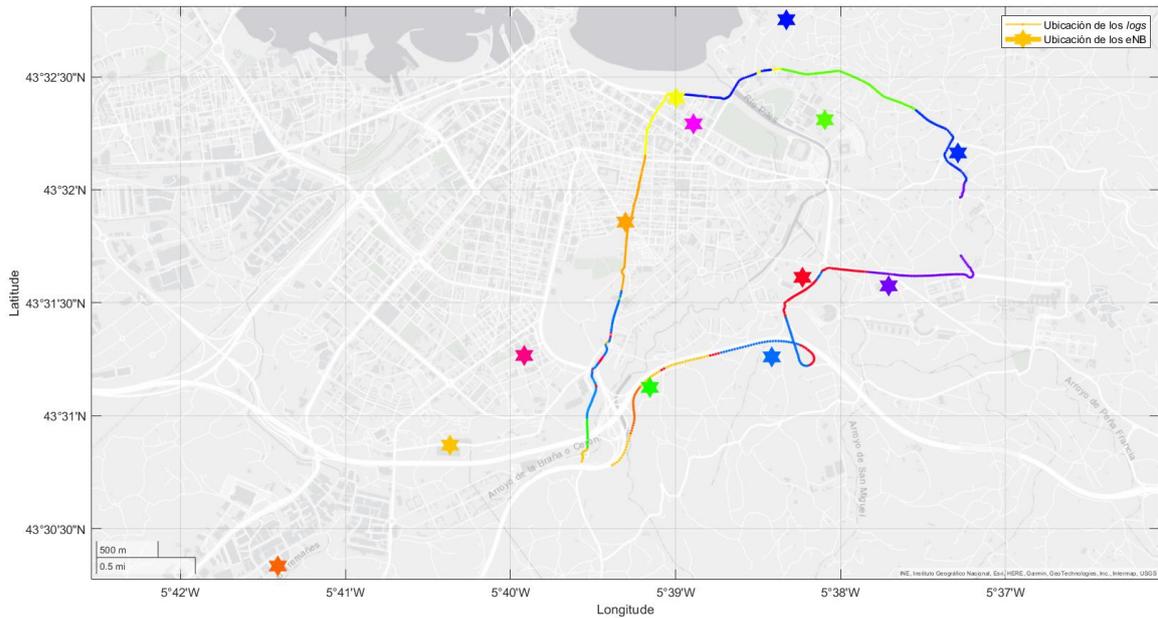
Como demarcación de la frontera entre estos escenarios se ha utilizado la Autopista A-8, la cual deja al Norte a la ciudad de Gijón, y al Sur, la zona rural. Por ello, se ha utilizado una latitud como la frontera entre estos escenarios. Todas las medidas cuya latitud haya sido superior a  $43,513^\circ$ , han formado parte del escenario urbano, mientras que las que su latitud haya sido inferior a  $43,513^\circ$ , han formado parte del escenario rural. En la Figura 4.18 se puede observar gráficamente la división geográfica de los escenarios junto con la posición de los *logs*.



**Figura 4.18.-** Representación de los *logs* y eNBs de los escenarios urbano y rural.

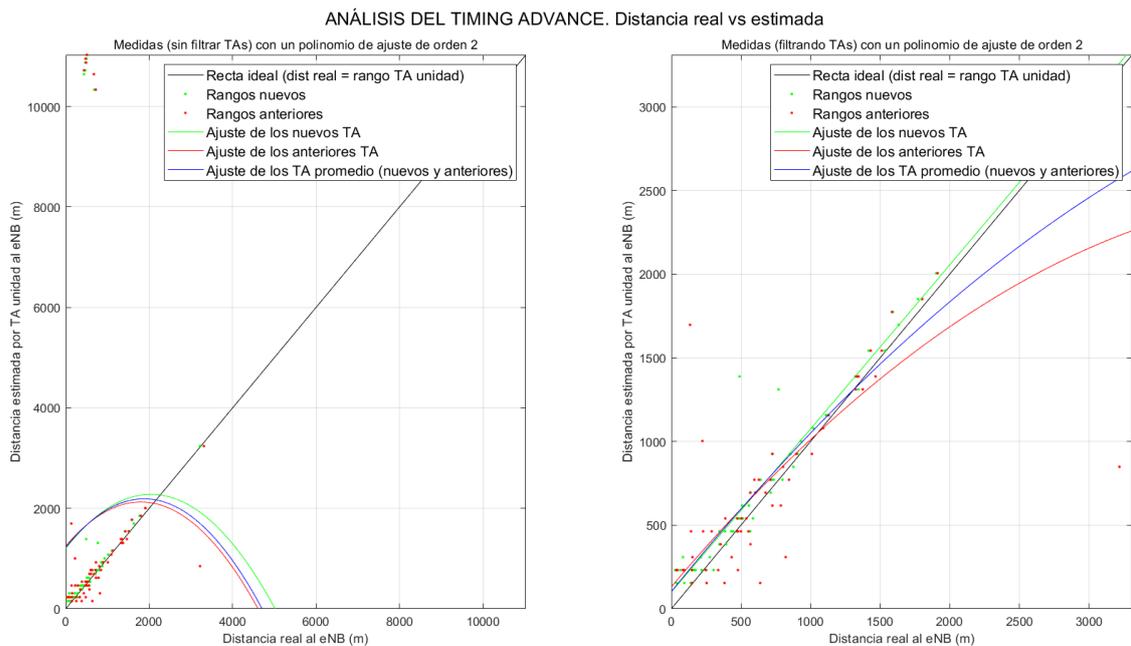
Como se puede observar, los *logs* que forman parte del escenario urbano se conectan a una mayor diversidad de eNBs, mientras que la presencia de eNBs en el entorno rural es más escasa, debido a la inferior cantidad de usuarios que se encuentran conectados.

En primer lugar, se analizará el entorno urbano. En la Figura 4.19 se representan los *logs* y eNBs que forman parte de este escenario, representados del mismo color los que forman parte del mismo eNB. Generalmente, el UE se conecta al eNB más cercano.



**Figura 4.19.-** Ubicación de los logs y eNBs del escenario urbano.

En la Figura 4.20 se analiza el cálculo del TA por parte de la red para el UE en función de la distancia al eNB. El trayecto se ha realizado en un vehículo, pero al ser entorno urbano, las velocidades del UE no superan los 50 km/h, alternándose con otras situaciones en las que la velocidad es muy baja debido a cruces, pasos de cebra, etc. De esta forma, el UE no varía tanto su posición como en autopista y, por tanto, las variaciones del TA son más pequeñas.



**Figura 4.20.-** Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad. Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de TA > 100.

Del análisis del TA se puede comprobar que, filtrando los valores TA erróneamente medidos, los rangos estimados son buenos. En los rangos nuevos, la precisión es alta, mientras que en los rangos anteriores, esta falla un poco debido al desplazamiento del UE. Se puede ver que la regresión de los rangos nuevos se ajusta bastante bien a la distancia real.

El siguiente estudio será el de la probabilidad acumulada para los métodos desarrollados en el escenario urbano. En la Figura 4.21, como en la Tabla 4.10 y en la Tabla 4.11, se pueden comprobar los resultados, los cuáles, debido a la cercanía del UE al eNB en una ciudad, proporcionan un margen de error inferior comparado con el resto de escenarios.

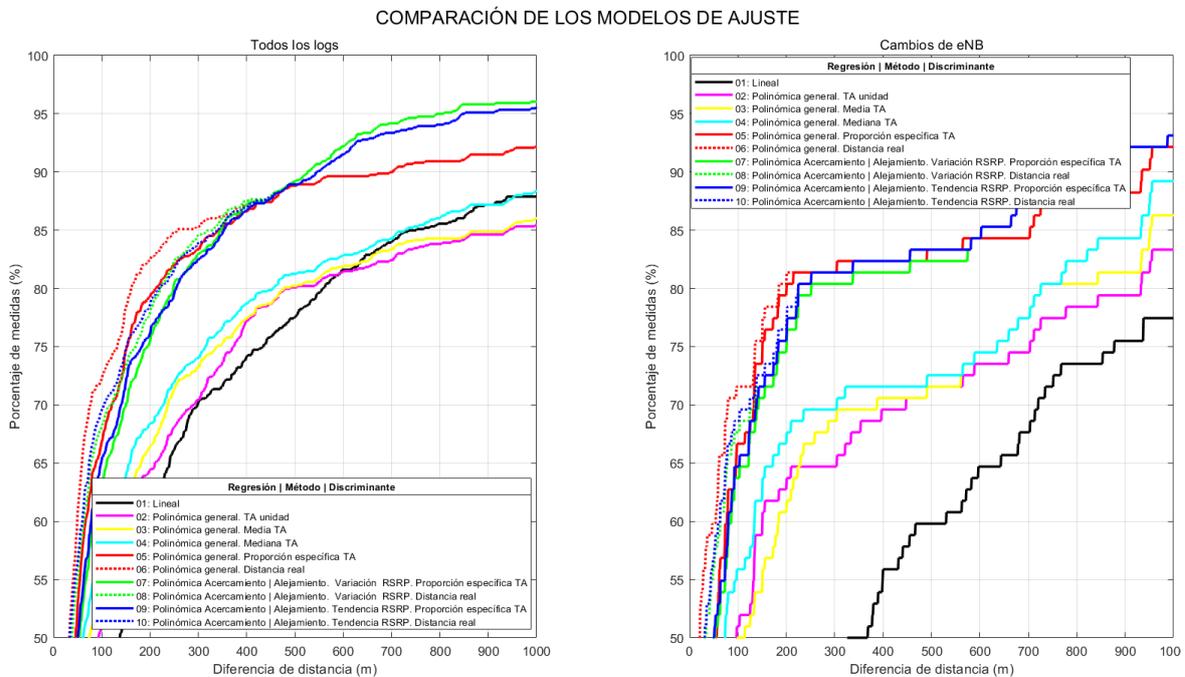


Figura 4.21.- Probabilidad acumulada para el escenario urbano.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en el escenario urbano										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	276	252	223	197	108	69	138	101	130	89
2 sigma (95%)	3996	2689	2120	2120	1537	1537	838	838	988	988
3 sigma (99.7%)	6335	2799	2787	2787	2707	2707	2749	2749	2690	2690

Tabla 4.10.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los logs en el escenario urbano.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en el escenario urbano										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	704	354	287	210	126	74	136	104	125	93
2 sigma (95%)	4109	2752	1515	1501	1445	1445	1332	1332	1332	1332
3 sigma (99.7%)	4109	2800	3757	3757	1552	1552	2721	2721	2721	2721

**Tabla 4.11.-** Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los *logs* del cambio de eNB en el escenario urbano.

El primer resultado llamativo que se desprende de la Figura 4.21 es la mejora de la regresión lineal comparado con otros escenarios. En los análisis previos, el método 1 se encontraba destacadamente inferior al resto de métodos, con apenas el 70% de las medidas estimadas con un error máximo de 1 km. Sin embargo, en este escenario urbano, para una diferencia de distancias de un máximo de 1 km, la probabilidad acumulada es de casi el 90% para el caso de todos los *logs*, incluso mejor que algunos de los métodos polinómicos.

Otra mejora apreciable visualmente es que, a partir de 500 metros de error en el cálculo de la distancia estimada, se observa una mejoría en la probabilidad acumulada con la utilización de los polinomios de regresión que discriminan entre acercamiento y alejamiento del UE al eNB, en función de la variación o la tendencia del RSRP.

En aquellos métodos en los que se considera el caso correspondiente a un discriminante perfecto (uso de la distancia real), se puede comprobar en ambas gráficas de la Figura 4.21 que el trazo discontinuo del mismo color de cada método es solamente apreciable para errores de distancia pequeños. Esto quiere decir que el utilizar la distancia real como discriminante no mejora al uso del TA. Por tanto, se confirma que el TA en este escenario urbano, presenta una buena fiabilidad para estimar distancias.

Analizando las tablas de la probabilidad acumulada de este escenario, se observan valores inferiores a 100 metros para la primera sigma, tanto en el caso de todos los *logs*, como en el de los del cambio de eNB. También, para este escenario, los resultados de la Tabla 4.10 de todos los *logs* presentan unos resultados similares a la de los del cambio de

eNB, incluso mejores en más de la mitad de los casos. De hecho, para 2 de cada 3 medidas (aprox. 67%), el error cometido por los peores métodos es inferior a 300 metros, mientras que se pueden llegar a alcanzar diferencias de distancia que apenas llegan a los 100 metros para los mejores. Además, utilizando los métodos de regresión que discriminan entre acercamiento y alejamiento, se consiguen diferencias de distancia inferiores al kilómetro para 2 sigma.

Los resultados obtenidos en este apartado se justifican por los siguientes factores. Uno, que las distancias entre el UE y el eNB en un escenario urbano suelen ser las más pequeñas, y dos, que unido a la fiabilidad que presenta el TA en este escenario, el cual se usa como discriminante para elegir la distancia más próxima a la real, los resultados son los mejores de los analizados.

Para verificar la robustez de los métodos en este escenario, se someten al análisis habitual de la variación aleatoria del RSRP en 1, 3 o 5 dBs. Los resultados de este análisis se pueden ver en la Figura 4.22, así como en la Tabla 4.12 y en la Tabla 4.13.

En el análisis de la robustez se observa que la precisión sigue siendo bastante alta variando el RSRP en algunos dBs. Tomando como valor de referencia un error de 500 metros, a probabilidad acumulada de cada método no varía ni en un 5% entre el RSRP original y el variado en hasta 5 dBs. Además, para 1 sigma, las diferencias de distancia máximas no alcanzan ni el valor de los 200 metros para una modificación del RSRP que es significativa.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE AJUSTE VARIANDO EL RSRP ALEATORIAMENTE

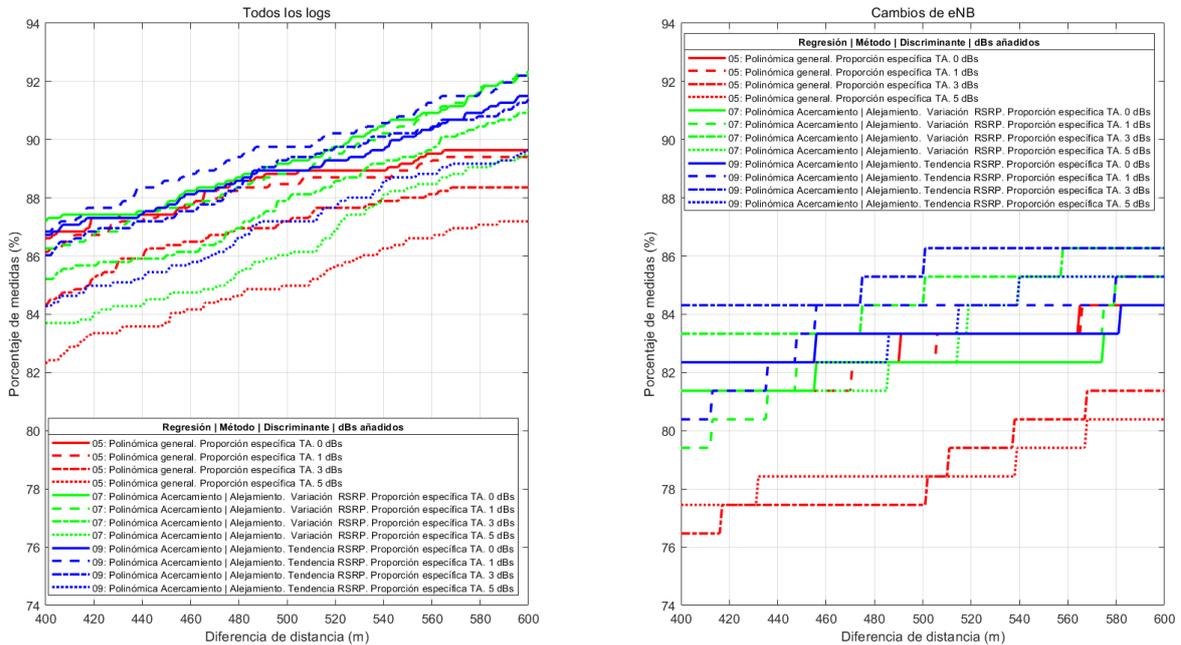


Figura 4.22.- Probabilidad acumulada para el escenario urbano variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en el escenario urbano variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	108	128	156	181	138	143	178	200	130	133	163	191
2 sigma (95%)	1537	1550	1544	1604	838	836	1291	1333	988	999	1302	1333
3 sigma (99.7%)	2707	2735	2721	2746	2749	2757	2757	2757	2690	2714	2733	2733

Tabla 4.12.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los logs en el escenario urbano y variando el RSRP aleatoriamente.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en el escenario urbano variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	126	146	170	170	136	172	161	170	125	167	159	164
2 sigma (95%)	1445	1496	1525	1567	1332	1332	1332	1332	1332	1332	1332	1332
3 sigma (99.7%)	1552	2746	2746	2746	2721	2721	2721	2721	2721	2721	2721	2721

Tabla 4.13.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el escenario urbano y variando el RSRP aleatoriamente.

Para 2 y 3 sigma, los errores cometidos con los métodos 7 y 9, son iguales para el RSRP original como para las variaciones de 1, 3 y 5 dBs, lo que se puede explicar con que existe un 5% de medidas (del 95% al 100%) que el RSRP, al escoger una solución de distancia errónea, esta continuará siendo igual de errónea. Lo más probable es que el polinomio de regresión sea de grado par y no alcance dicho RSRP, y al buscar el RSRP más cercano que tenga distancia estimada asociada, este difiera en más de 5 dBs, y aunque se reduzca el RSRP en 5 dBs, seguirá sin alcanzar el polinomio de regresión el RSRP, y la distancia asociada será la misma. Esto ocurre en los métodos 7 y 9 por que dividen las medidas en 2 (acercamiento y alejamiento) y por tanto hay menos información, lo cual no ocurre por ejemplo con el método 5.

Para finalizar el escenario, se representan en la Figura 4.23 y en la Figura 4.24 los mapas de calor de las distancias estimadas, tanto con el RSRP original como con él variado. En la Figura 4.23 se muestra el mapa de calor del escenario urbano, en el cual las distancias estimadas se concentran en torno a la recta ideal, aunque ligeramente por debajo, hasta los 2 kilómetros y medio. A partir de este valor, las distancias son subestimadas en comparación con la distancia real que hay entre el UE y el eNB. Los buenos resultados en torno a la recta ideal, con ligero error, concuerdan con los resultados de la probabilidad acumulada, mientras que los malos hacen referencia a ese 5% de medidas que se han calculado mal.

En cuanto al mapa de calor de los *logs* en los que se ha variado el RSRP, la principal diferencia observable es la intensidad de las medidas que se encuentran en torno a la recta ideal. Esto se traduce en una transición de las distancias estimadas hacia valores más alejados de la recta ideal, pero mínimamente, ya que no se observan valores más dispersados que los vistos en la Figura 4.23, referente a las distancias estimadas de los *logs* con el RSRP original.

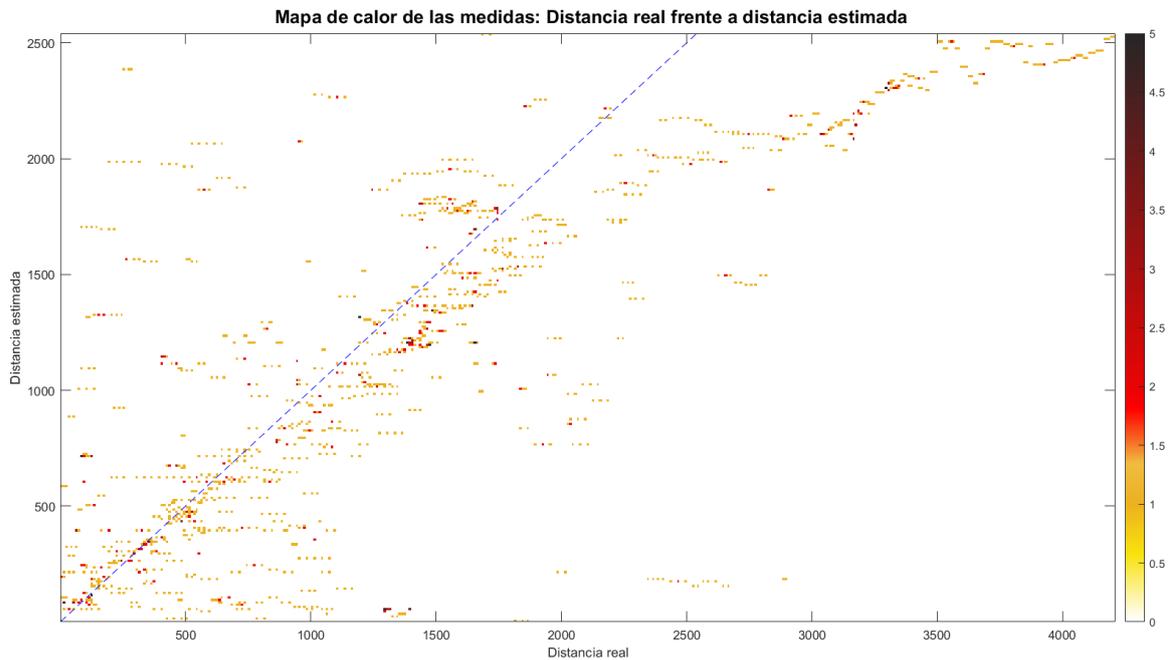


Figura 4.23.- Mapa de calor para los *logs* del escenario urbano.

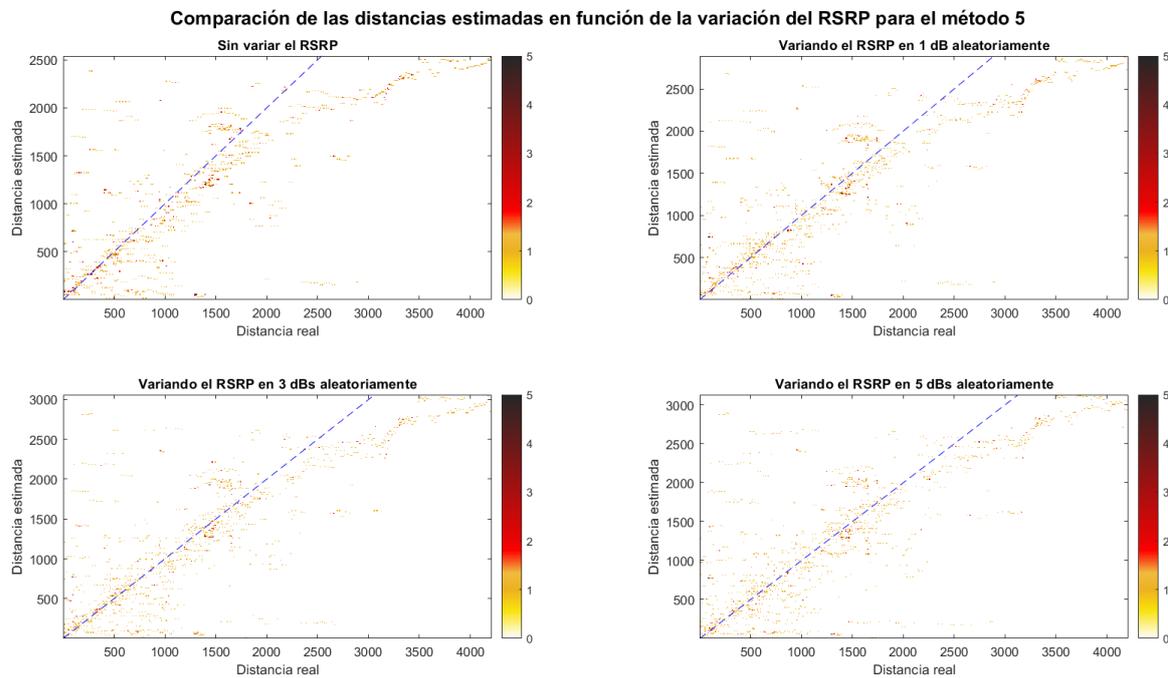
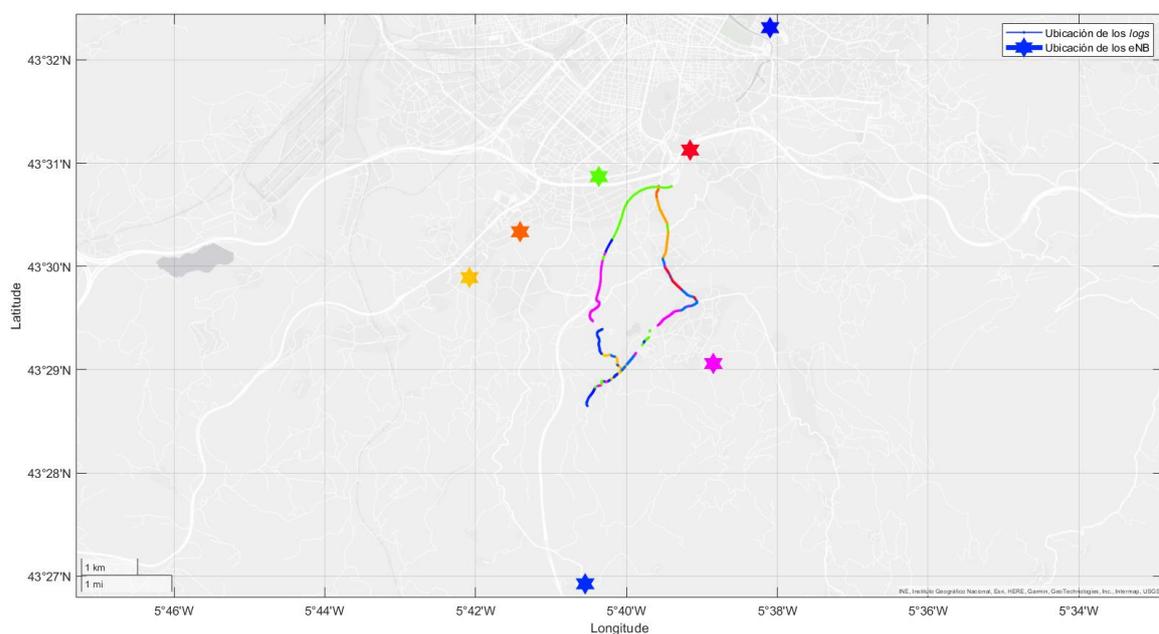


Figura 4.24.- Mapa de calor para el escenario urbano variando el RSRP.

#### 4.5.- ANÁLISIS DE UN ESCENARIO RURAL.

En este apartado se analizará la precisión del cálculo de la distancia estimada en un entorno rural, en el cual la presencia de eNBs es menor que en uno urbano, así como las condiciones de NLOS son más frecuentes por la geografía del terreno, provocando conexiones de los UEs a eNBs más lejanos de lo habitual. En la Figura 4.25 se ven las ubicaciones de los eNBs y del UE, representados los *logs* del color de cada eNB.



**Figura 4.25.-** Ubicación de los *logs* y eNBs del escenario rural.

A diferencia del escenario urbano, las conexiones del UE a los eNB son menos obvias. Por ello, en la Figura 4.26 se relacionan los *logs* con su eNB. El frecuente cambio de eNB por parte del UE debido a las condiciones del entorno indica que, en algunas zonas, el enlace es inestable, ya que el UE busca continuamente un mejor eNB.

El primero de los análisis será el TA, el cual es premonitorio de cómo será la probabilidad acumulada del acierto en la distancia estimada. Para ello se representan en la Figura 4.27 tanto todos los TA, como solamente los filtrados porque su valor supere el límite establecido en 100.

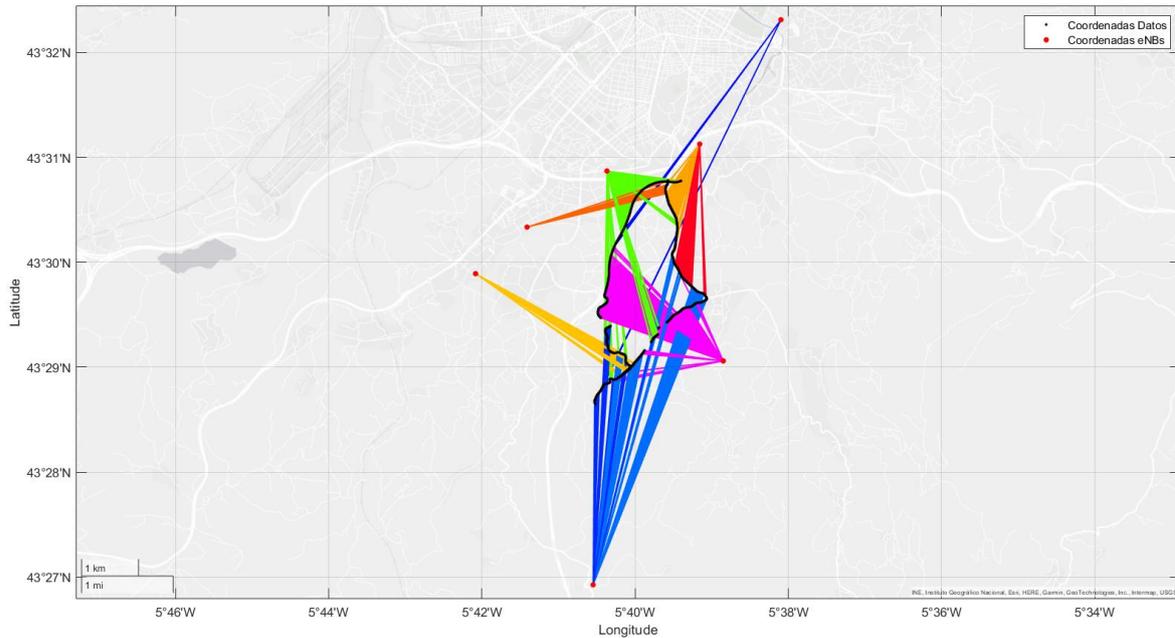


Figura 4.26.- Relación de los logs con sus eNBs en el escenario rural.

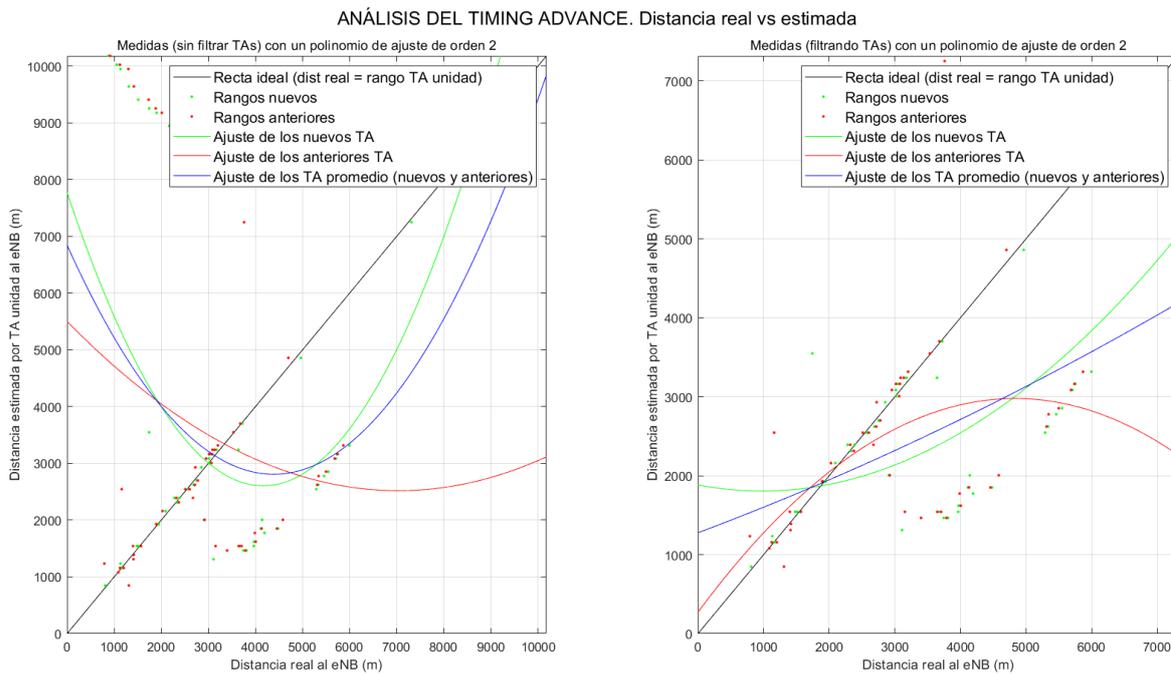
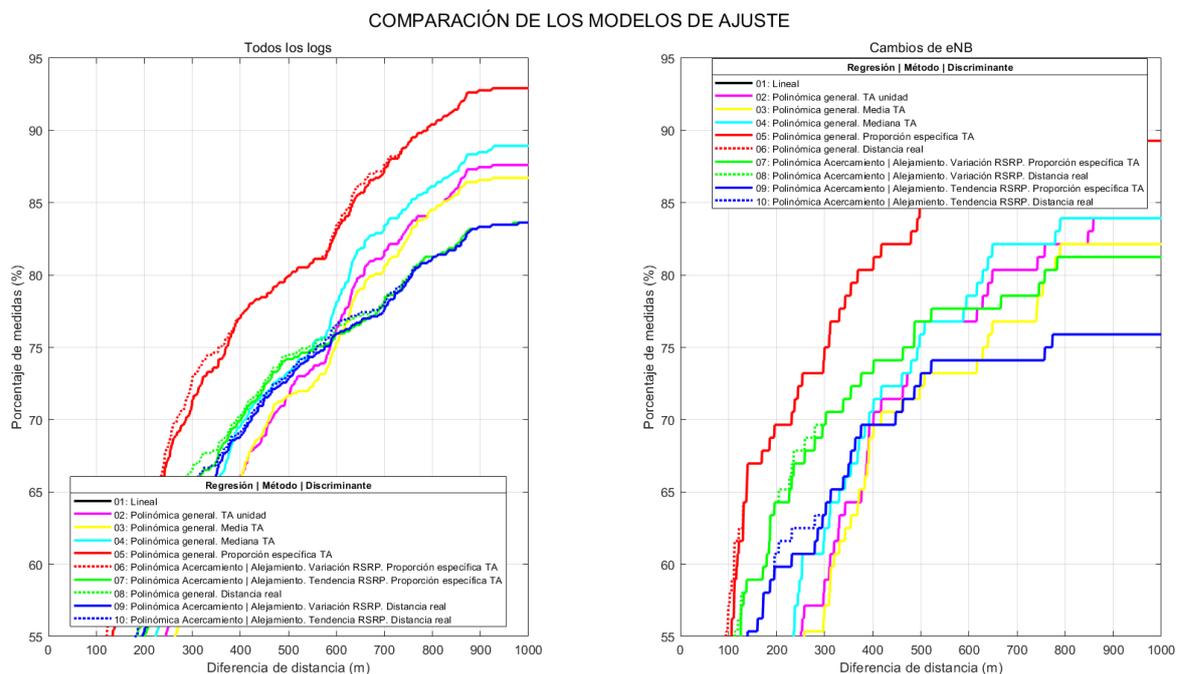


Figura 4.27.- Análisis del TA. Distancia real frente a distancia estimada por TA unidad.  
Izquierda: todos los valores de TA. Derecha: se descartan los valores de TA > 100.

Alrededor de la mitad de los rangos, tanto de los TAs nuevos como de los anteriores, se concentran en puntos asociados a la recta ideal. Sin embargo, la otra mitad se encuentran dispersos por valores de distancias que son duplicados por la distancia real, es decir, que se

ha infraestimado la distancia en la mitad de lo que debería de ser el valor calculado. Si a esto se le suma que otra cantidad reseñable de *logs* presentan unos TAs muy altos, las conclusiones extraídas se centran en la poca precisión del uso del TA para estimar distancias. En la Figura 4.28 se analiza la probabilidad acumulada de la diferencia de distancias entre la real y la estimada teniendo en cuenta los métodos que utilizan el RSRP para calcular la distancia estimada. A su vez, en la Tabla 4.14 y en la Tabla 4.15 se resumen los errores cometidos en el cálculo de la distancia para cada una de las tres sigmas explicadas.



**Figura 4.28.-** Probabilidad acumulada para el escenario rural.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en el escenario rural										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>1 sigma (68%)</b>	2063	437	427	382	257	249	363	355	378	372
<b>2 sigma (95%)</b>	9437	1716	2141	2128	1662	1662	1849	1849	1853	1853
<b>3 sigma (99.7%)</b>	9437	3855	3865	3865	3855	3855	8848	8848	8848	8848

**Tabla 4.14.-** Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los *logs* en el escenario rural.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en el escenario rural										
MÉTODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1 sigma (68%)	2073	389	392	369	170	170	259	236	355	355
2 sigma (95%)	7884	1811	2291	2291	1811	1811	2202	2202	2922	2922
3 sigma (99.7%)	7884	2301	3814	3814	2301	2301	3158	3158	3162	3162

**Tabla 4.15.-** Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de los *logs* del cambio de eNB en el escenario rural.

Analizando las gráficas de la probabilidad acumulada en la Figura 4.28, destaca a simple vista la poca fiabilidad de los métodos que discriminan entre acercamiento y alejamiento, tanto en el caso de todos los *logs* como en el caso de los *logs* del cambio de eNB. Estos se encuentran en niveles similares al método de la regresión lineal, la cual suele ser generalmente, la peor opción para calcular la distancia estimada. La imprecisión de los métodos 7 y 9 para este escenario deja únicamente como opción más fiable al método 5, como se puede ver en ambas gráficas de la Figura 4.28, donde el trazo rojo lidera con amplia ventaja sobre el resto de los métodos.

También es reseñable que los métodos que utilizan la distancia real como discriminante, apenas mejoran en algún intervalo al mismo método cuando se utiliza la proporción específica del TA como discriminante. La explicación más probable de la no mejora se debe a que en un escenario rural, al encontrarse los UEs de los eNB a unas distancias bastante grandes, las soluciones posibles de distancia estimada para un RSRP concreto se separan entre sí por amplias distancias.

Al contrario, en un entorno urbano, donde las distancias entre UE y eNB son más pequeñas, estas posibles distancias solución difieren entre ellas en pocos metros. Por tanto, en un entorno rural, si las diferencias entre posibles soluciones son amplias, el discriminante relativo al TA puede acertar con la solución más probable en las mismas situaciones en las que se acierta con la distancia real como discriminante.

Comparando los resultados de la Tabla 4.14 y la Tabla 4.15 con los del escenario urbano por ejemplo, la distancia estimada empeora para 1 sigma en:

- El caso del método 5, 150 m para todos los *logs* y 50 para los del cambio de eNB.
- El caso del método 7, 250 m para todos los *logs* y 150 para los del cambio de eNB.
- El caso del método 9, 250 m para ambos análisis.

Estos resultados demuestran la dificultad que precisa el cálculo de la distancia estimada en un entorno rural. Entre que la distancia en este entorno será más sensible a la variación de 1 dB que en el urbano, y que los valores del TA no ayudan como en otros entornos a calcular con precisión la distancia, los resultados de la probabilidad acumulada no son buenos.

Una ventaja del cálculo de la distancia estimada en este escenario es que, aunque el registro se haya producido desde un vehículo, la velocidad no es tan alta como en una autopista, donde el UE varía muy rápidamente la posición sin variar el TA ya que conectado al mismo eNB, el TA no se actualiza frecuentemente. También el continuo cambio de eNB, aunque el TA se calcule en ocasiones de manera incorrecta, provoca que la red termine acertando en la asignación del valor del TA correcto.

Por ello, este escenario es peor que el urbano, pero mejor que el mixto, donde los *logs* se registraron a velocidades superiores, y el TA no actuó bien como discriminante.

En la Figura 4.29, junto con la Tabla 4.16 y la Tabla 4.17 se analiza la robustez de los métodos para el cálculo de la distancia alterando el RSRP. Este análisis es importante ya que, en teoría, la distancia es más sensible a la variación de algún dB en el RSRP que en otros casos donde las distancias entre eNB y UE son inferiores.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS DE AJUSTE VARIANDO EL RSRP ALEATORIAMENTE

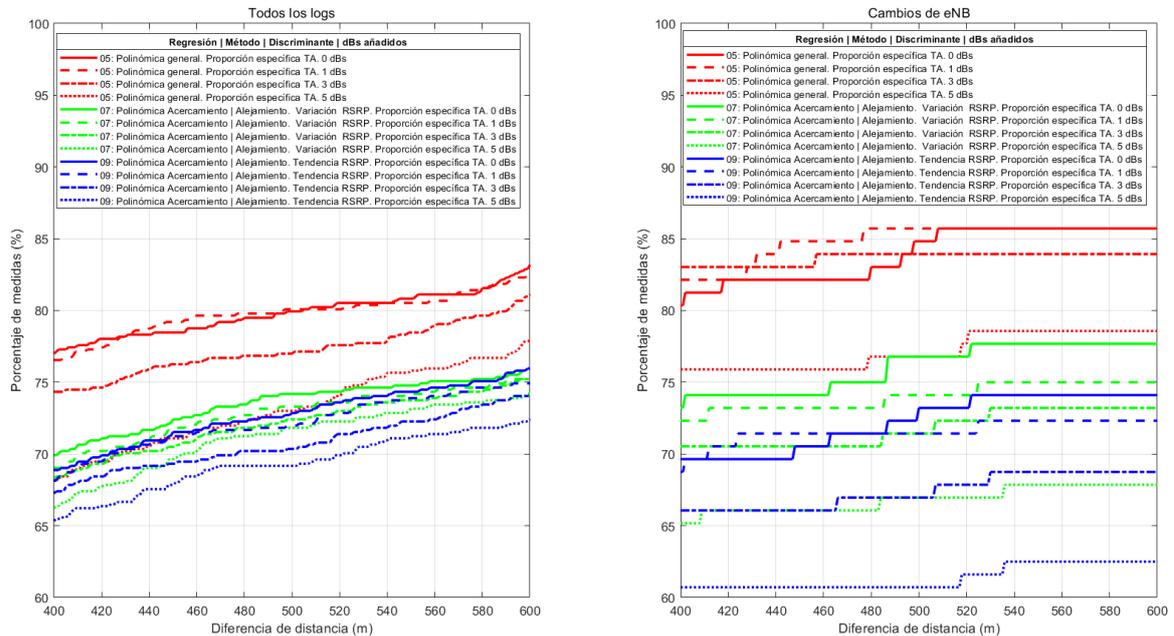


Figura 4.29.- Probabilidad acumulada para el escenario rural variando aleatoriamente el RSRP en 1, 3 y 5 dBs para calcular las distancias.

Comparación de los modelos de ajuste para todos los logs en el escenario rural variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	257	256	306	399	363	380	397	431	378	396	415	454
2 sigma (95%)	1662	1655	1732	2007	1849	1900	1909	1950	1853	1910	2015	2120
3 sigma (99.7%)	3855	3859	3862	3867	8848	8846	8488	8168	8848	8846	8864	8868

Tabla 4.16.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso de todos los logs en el escenario rural y variando el RSRP aleatoriamente.

Comparación de los modelos de ajuste en el cambio de eNB en el escenario rural variando el RSRP aleatoriamente												
MÉTODO (variación en dB)	5 (0)	5 (1)	5 (3)	5 (5)	7 (0)	7 (1)	7 (3)	7 (5)	9 (0)	9 (1)	9 (3)	9 (5)
1 sigma (68%)	170	165	166	247	259	298	245	536	355	342	507	955
2 sigma (95%)	1811	1680	1870	2195	2202	2908	2908	2908	2922	3111	3111	3111
3 sigma (99.7%)	2301	3804	3804	3804	3158	8484	8488	8493	3162	8486	8491	8495

Tabla 4.17.- Diferencia de distancia (en metros) para cada sigma en el caso del cambio de eNB en el escenario rural y variando el RSRP aleatoriamente.

En la Figura 4.29 se observan las gráficas de la probabilidad acumulada. Para cada método se asigna un color, y para cada número de dBs variados, un trazo. El comportamiento es similar en todos los métodos: la alteración en 1 dB prácticamente no difiere de los resultados con el RSRP real. Sin embargo, para 3 y 5 dBs, se observa que las líneas de probabilidad acumulada comienzan a dejar un margen de distancia notable.

En base a los resultados cuantitativos de la Tabla 4.16 y de la Tabla 4.17, para la probabilidad acumulada de 1 sigma, se puede apreciar un patrón que aplica a casi todos los casos. Para una variación de 1 dB, el error aumenta en 20 m; para 3 dBs, en 50 m; mientras que para 5 dBs, en 100 m. Existen algunos casos atípicos, en los que la variación del RSRP provoca una mejor estimación de la distancia. Como se ha explicado, esto se debe a la presencia de *outliers* en la generación de la BBDD, lo que se solucionaría con un aumento en el tamaño de la muestra (más *logs*).

En lo respectivo a las sigmas 2 y 3, los errores en distancia cometidos con el RSRP original son tan elevados que el análisis del RSRP modificado no aporta valor añadido.

Para finalizar con el análisis del escenario, se procede a la representación de los mapas de calor del cálculo de la distancia estimada con el método 5. En la Figura 4.30 se representan las distancias obtenidas con el RSRP original, en la cual se observa una clara tendencia a la subestimación de las distancias. La tendencia de alejarse cada vez más de la recta ideal coincide con los resultados del TA, como se puede corroborar en la Figura 4.27. Esto se explica con que, aunque la curva de regresión sea buena y una de las posibles soluciones se asemeje a la distancia real, si el discriminante asociado al TA es erróneo, el método elegirá como solución estimada la más similar al TA y no a la distancia real. Este resultado demuestra que el punto débil de los métodos implementados es que dependen de la fiabilidad del discriminante para obtener una buena precisión en el cálculo de la distancia por ajuste de regresión del RSRP.

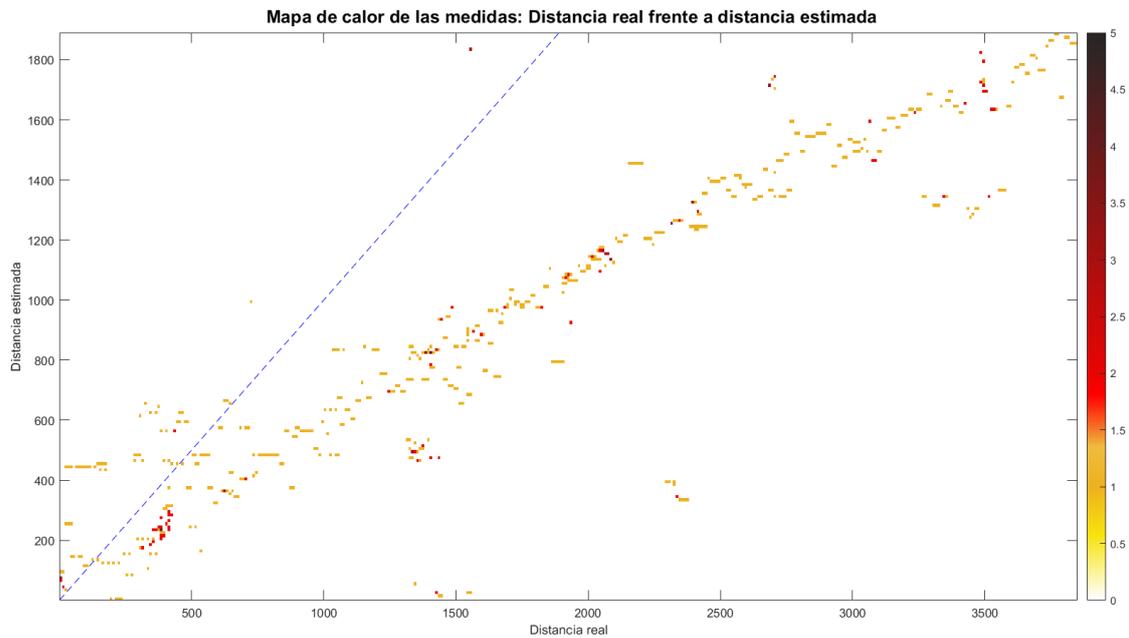


Figura 4.30.- Mapa de calor para los *logs* del escenario rural.

En cuanto a los mapas de calor de la distancia estimada variando el RSRP original (Figura 4.31), se observa nuevamente una desviación significativa entre la distancia real y la distancia estimada. No obstante, si bien no es un buen escenario en cuanto a fiabilidad en el cálculo de la distancia estimada, sigue siendo robusto el método de la variación del RSRP.

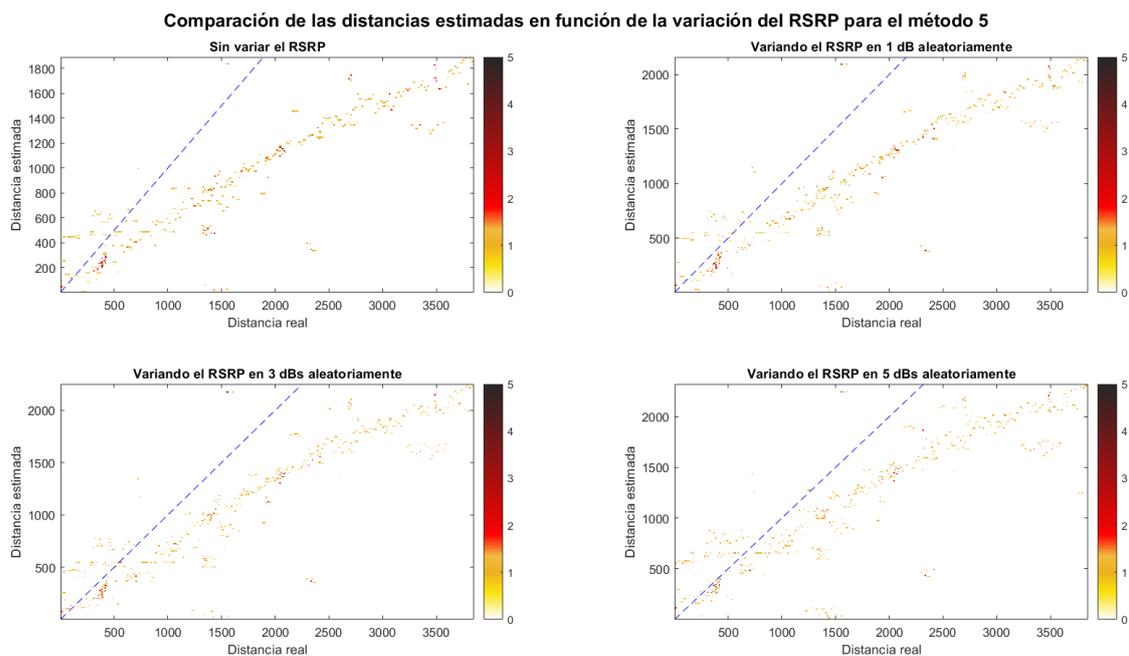


Figura 4.31.- Mapa de calor para el escenario rural variando el RSRP.

#### 4.6.- CÁLCULO DE LA LOCALIZACIÓN DEL DISPOSITIVO MÓVIL CON LOS MÉTODOS DESARROLLADOS

En este apartado se muestran una serie de ejemplos de cómo, a raíz del cálculo de la distancia estimada del eNB al UE, se puede intentar geolocalizar al UE con el método del cambio de eNB. A modo de resumen, cuando se produce un cambio de eNB, se calcula la distancia estimada del eNB al UE en el último *log* correspondiente al eNB anterior, así como la distancia estimada del eNB al UE en el primer *log* correspondiente al eNB nuevo. Teóricamente, trazando una circunferencia de radio igual a la distancia estimada desde el centro de cada eNB correspondiente, se obtendrían dos puntos de intersección, siendo uno de ellos la ubicación estimada del UE.

Para el cálculo de las distancias con este método se necesitan: la BBDD con la información de los eNBs y las celdas (principalmente la de los identificadores y los coeficientes de los polinomios de regresión), el tipo de regresión, y de ambos *logs*, el del eNB anterior y el del eNB nuevo, los ECI correspondientes, los RSRP y los TA.

En primer lugar, en la Figura 4.32 se muestra un ejemplo en el que las distancias estimadas se han quedado pequeñas y no se produce intersección entre las circunferencias del eNB anterior y del eNB nuevo. En la figura, el punto verde representa la ubicación *real* (o de referencia) del UE, calculada como la posición media entre la posición del UE para el *log* correspondiente al eNB anterior y la posición del UE para el *log* correspondiente al eNB nuevo.

El segundo ejemplo se muestra en la Figura 4.33, donde se observa un amplio abanico de posibles distancias a las que se puede encontrar el UE del eNB. Esta distancia varía en función del método utilizado, y es llamativo que, en este segundo ejemplo, la regresión lineal sea una de las mejores en acercarse a la posición de referencia del UE (punto verde) con los puntos de intersección de las circunferencias, cuando ha sido en los análisis el método que siempre ha presentado la probabilidad acumulada más baja. Este resultado seguramente será debido al valor incorrecto del TA que se utiliza como discriminante en los métodos polinómicos.

GEOLOCALIZACIÓN EN EL CAMBIO DE eNB PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS

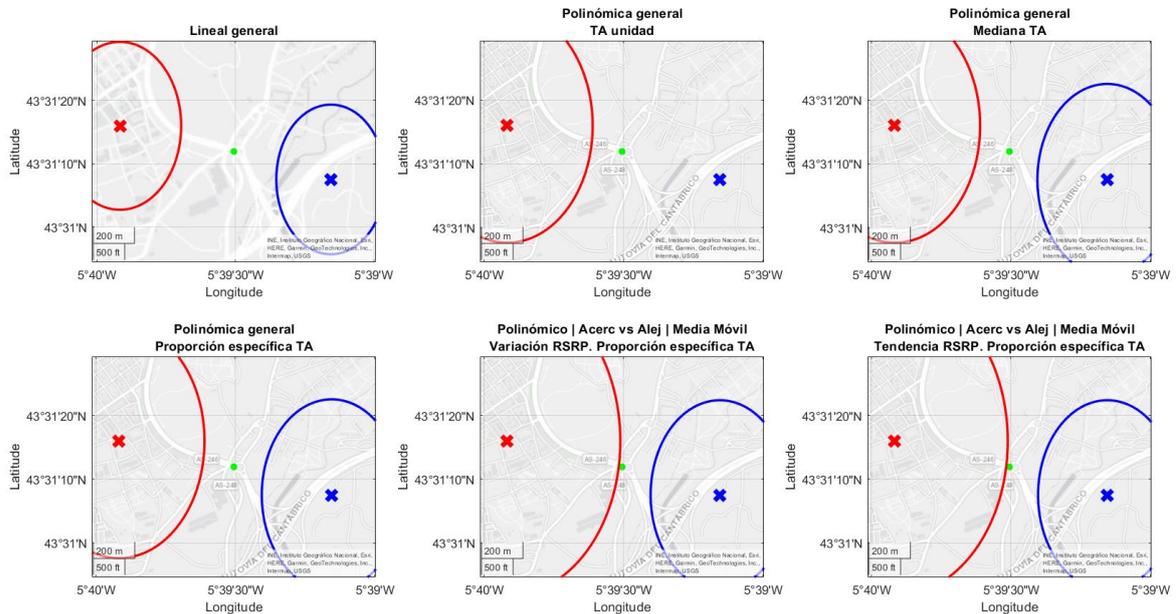


Figura 4.32.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 1.

GEOLOCALIZACIÓN EN EL CAMBIO DE eNB PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS

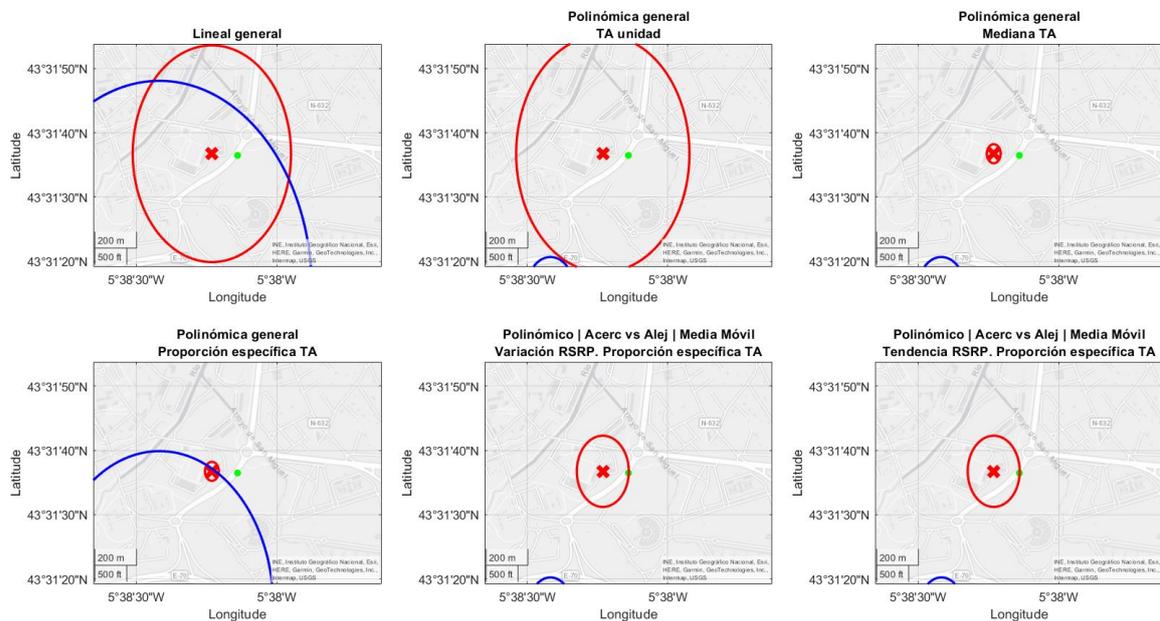
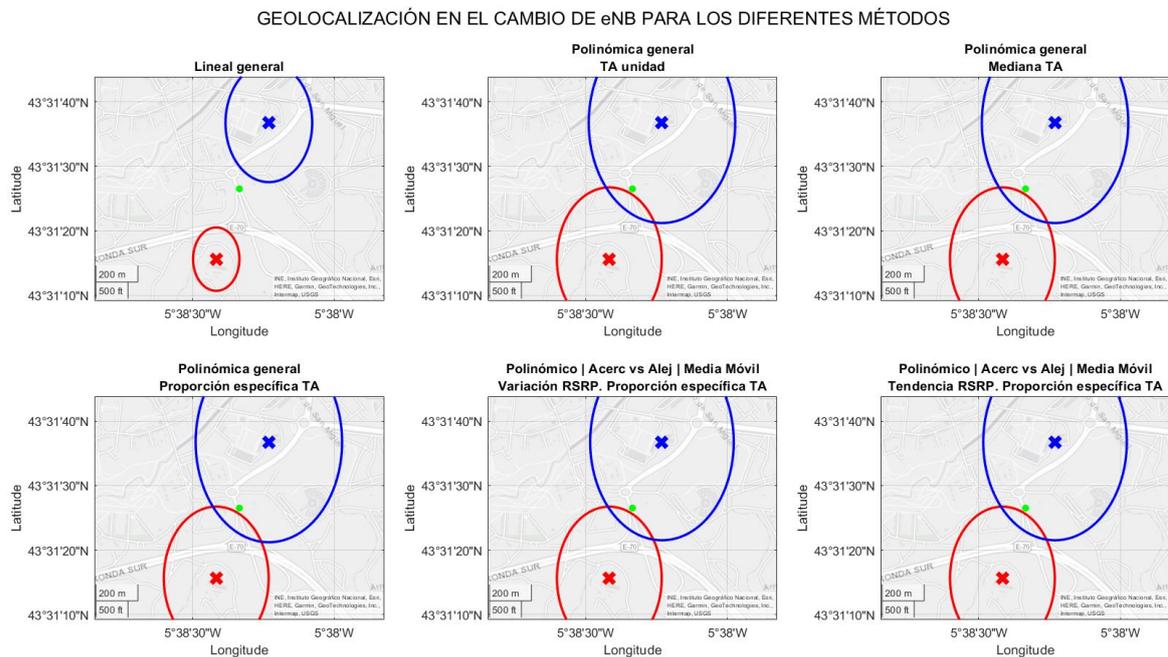


Figura 4.33.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 2.

En el ejemplo 3, Figura 4.34, se puede ver un resultado más lógico. El método lineal calcula incorrectamente las distancias (no se intersecan las circunferencias), mientras que los polinómicos dan una posición estimada más próxima a la posición de referencia del UE.



**Figura 4.34.-** Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 3.

Sin embargo, esto no será siempre así. Aunque lo lógico es que cuantos más parámetros y factores se tengan en cuenta en el método de estimación de la posición, mejor será el resultado, pueden producirse en ocasiones casos como el mostrado en la Figura 4.35. En este ejemplo (el cuarto), las distancias estimadas con el método lineal son muy buenas, empeoran para los métodos polinómicos más sencillos, y vuelven a mejorar para los métodos polinómicos más complejos, en los que se utiliza el mejor discriminante con la media móvil.

El quinto y último de estos ejemplos se muestra en la Figura 4.36, en la cual se puede ver cómo, aumentando la complejidad del método, las distancias estimadas comienzan a aproximarse a la distancia real, y terminan intersecándose ambas para provocar que uno de los dos puntos de intersección prácticamente sea la posición del UE.

GEOLocalización EN EL CAMBIO DE eNB PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS

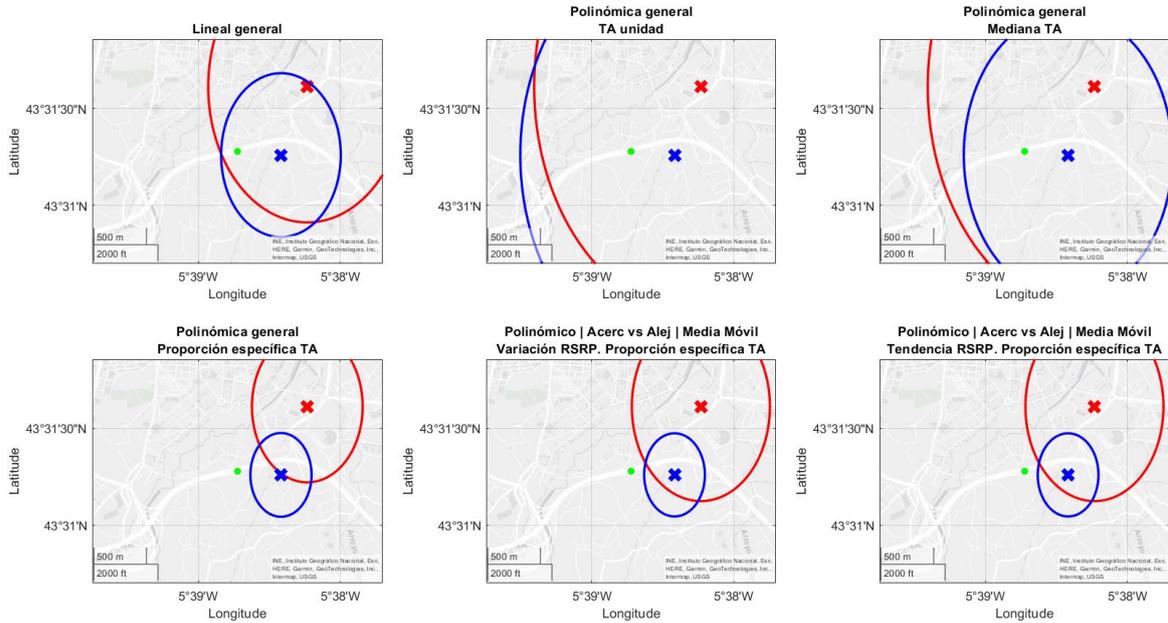


Figura 4.35.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 4.

GEOLocalización EN EL CAMBIO DE eNB PARA LOS DIFERENTES MÉTODOS

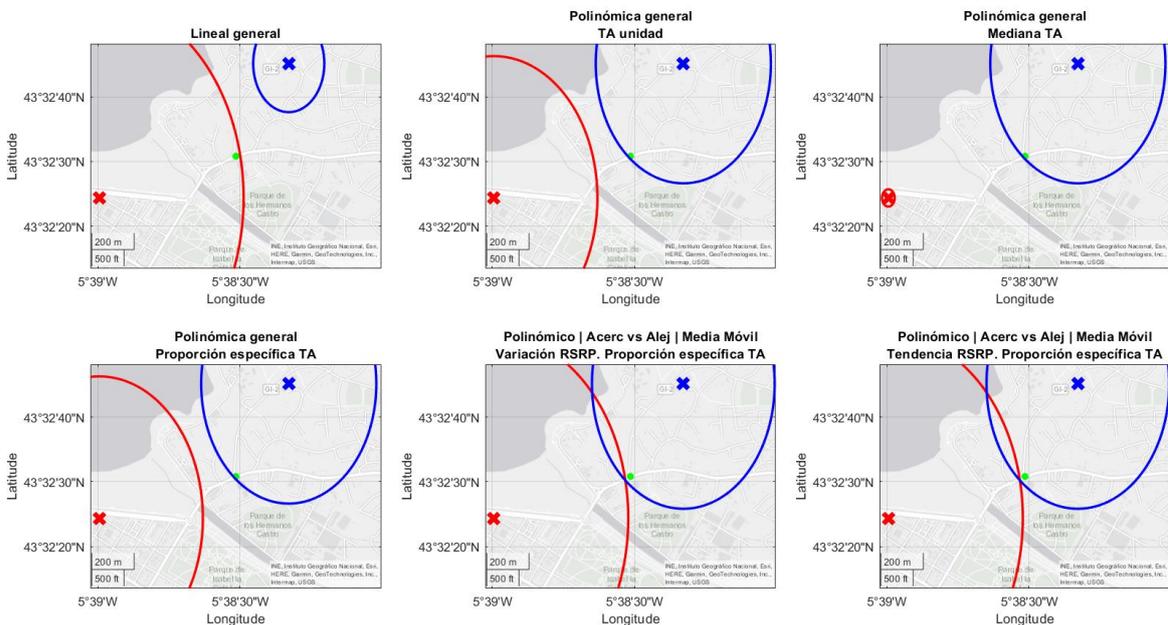
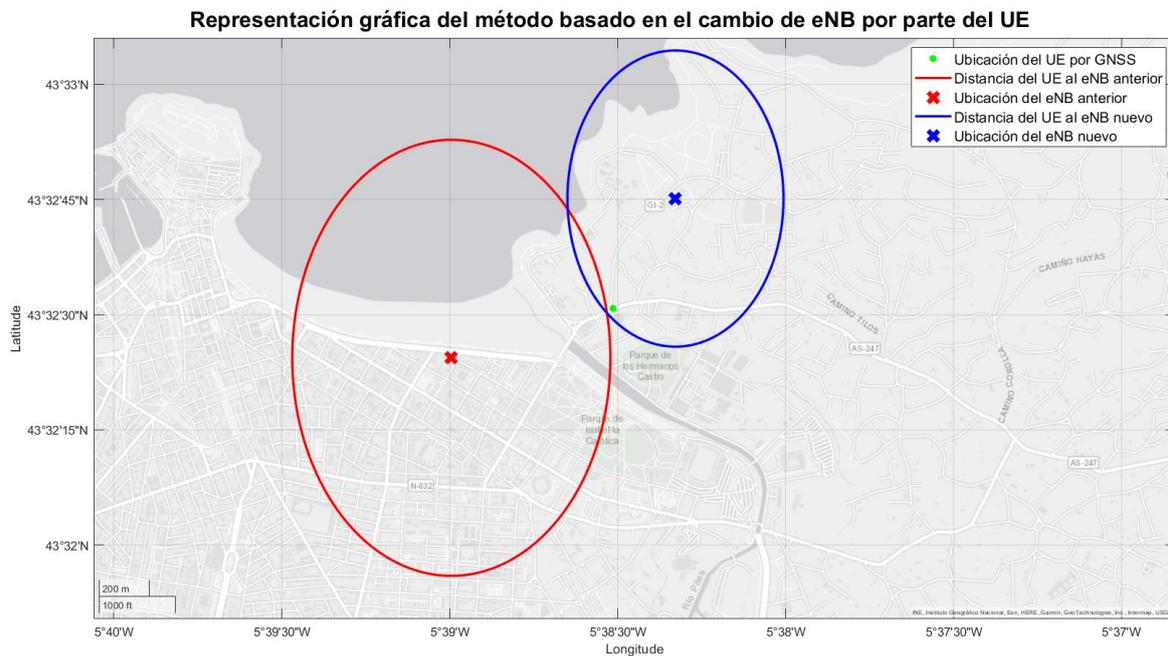


Figura 4.36.- Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 5.

En la Figura 4.37 se representa en mayor tamaño únicamente el mapa correspondiente al ajuste polinómico con media móvil del RSRP, en base a su tendencia y con la proporción específica del TA como discriminante, de este ejemplo 5, a modo de ejemplo definitivo.



**Figura 4.37.-** Representación gráfica del método del cambio de eNB. Ejemplo 6.

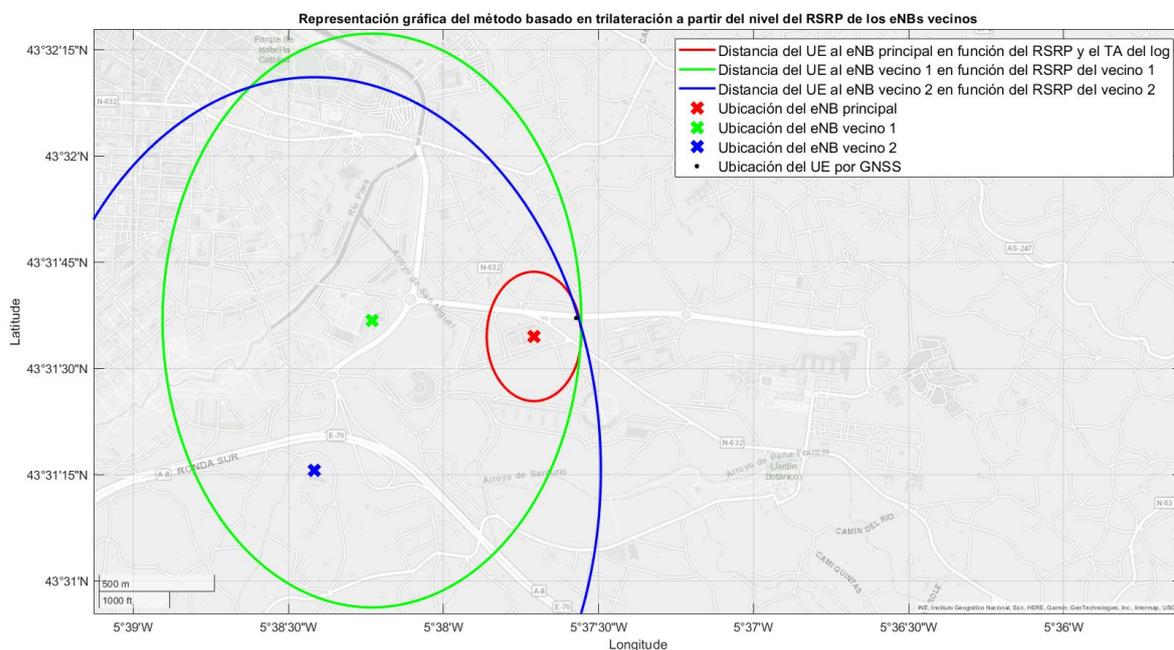
Como se ha comentado en el Capítulo 3, con los datos que se han registrado empleando la aplicación móvil *GNetTrack* [6] en el dispositivo móvil considerado para la realización de las medidas, solamente es posible estimar la posición del UE cuando hay un cambio de eNB. Sin embargo, con otro dispositivo móvil que ofrezca además del nivel del RSRP correspondiente a las celdas del eNB vecino, la información de dicho eNB y de su CID, podría calcularse la localización del método basado en trilateración a partir del RSRP de estas celdas vecinas. El método basado en la trilateración de la posición a partir del RSRP de las celdas vecinas necesita para su desarrollo la siguiente información:

- En primer lugar, y común a todos, la BBDD con la información de los eNBs.
- Después, para calcular la distancia estimada desde cada eNB, es necesario:
  - Para el eNB principal, el tipo de regresión, que podrá ser cualquiera, pero se escogerá principalmente la proporción específica del TA, el RSRP y el TA.
  - Para los eNBs vecinos, su información especificadora (eNB y CID), así como el nivel del RSRP. No será necesario el tipo de regresión, ya que al no disponer del TA referente al eNB vecino, no se podrá utilizar como

discriminante en los métodos que usen la regresión polinómica y por tanto solo se podrá usar el ajuste lineal del RSRP.

Respecto al eNB principal se conoce toda la información, es un *log* más, pero de los eNBs vecinos tan solo se conoce el RSRP, sin que *GNetTrack* [6] aporte la información del eNB o del ECI y así no poder asociar el RSRP a una distancia.

En la Figura 4.38 se muestra un ejemplo de localización del UE mediante este método de trilateración empleando el RSRP de eNB vecinos, y utilizando algunas de las medidas tomadas en el marco del presente TFG. Dado que se dispone de los valores de RSRP de los eNB vecinos, pero no cuáles son dichos eNBs, la solución escogida para representar el método en la Figura 4.38 ha sido la de buscar los eNBs vecinos más cercanos al eNB de un *log* real, y asignar un valor de RSRP ficticio a la celda más probable que pudiera cubrir la zona donde se registró el *log*, conocida por GNSS.



**Figura 4.38.-** Representación gráfica del método basado en trilateración a partir del RSRP de los eNB vecinos.

Si se conociera la información del eNB al que está asociado ese RSRP podría representarse como en la Figura 4.38. Dicha información podría conseguirse con un

dispositivo que soporte la versión necesaria que *GNetTrack* [6] indica en el listado de dispositivos y la información que proporciona cada uno.

## 5. Conclusiones.

El objetivo principal del TFG ha sido desarrollar técnicas que permitan geolocalizar al UE desde el eNB con la ayuda de parámetros como el RSRP y el TA, medidos en un dispositivo móvil (UE) empleando la aplicación *GNetTrack* [6].

La elección del método de localización del UE queda condicionada a la información que aporte el dispositivo de los registros o *logs*. Independientemente de si se conoce información de los nodos vecinos, el método que se puede aplicar si el UE realiza el *handover* (cambio de eNB) es el método homónimo.

Este requiere por tanto de la información de los *logs* asociados a ambos eNBs, el anterior y el nuevo. La información necesaria es el ECI (para identificar el eNB y el CID), el tipo de ajuste de regresión, el RSRP para el que se desea asociar una distancia, y el TA si fuese necesario para utilizar como discriminante de distancias si varias de ellas estuviesen asociadas a un mismo RSRP, así como la BBDD de los eNBs para conocer la información de cada uno de ellos (y de sus celdas).

Este método, si las distancias estimadas a cada eNB son correctas, ofrece dos posibles soluciones de localización del eNB, que son las intersecciones de las dos circunferencias de radio la distancia estimada con centro en cada eNB, respectivamente. La elección de una de esas dos soluciones para la ubicación del UE se basa en criterios subjetivos y objetivos.

Los criterios subjetivos se basan en el análisis de la ubicación geográfica de la posible localización. Si una de las dos se encuentra en el mar, en una ubicación de difícil acceso, etc. se descarta por la otra solución siempre que esta última esté en un lugar más accesible para el posible UE. También según a qué eNBs se realizan las conexiones, se puede descartar una de ellas, ya sea por lejanía, o por otra característica.

Si no se puede determinar con los criterios subjetivos, se pasa a los objetivos. Aquí son claves los parámetros de la capa física, en concreto, el ECI (formado por el eNB y el CID). Con un buen mapeo de los *logs* según su Cell ID, o con ayuda de webs como *CellMapper* [14], se puede asociar el *log* según su CID a un sector del área que cubre el eNB, los cuales suelen ser trisectoriales, es decir, con ángulos de  $120^\circ$ . Sectorizando el área del eNB anterior, así como la del eNB nuevo, e intersecando ambas áreas, el área resultante será el área donde debería localizarse el eNB. El punto intersección de las dos circunferencias que esté sobre el área intersección de los dos CID asociados a cada eNB respectivamente, será la solución estimada de la localización del UE.

Para no recurrir a este análisis más profundo, si se dispone de la información de los eNB vecinos, se puede recurrir al método basado en la trilateración de la posición. Para desarrollar este método es necesario conocer la misma información que en el método del cambio de eNB para estimar la posición desde el eNB principal. Sin embargo, del eNB vecino tan solo se conoce su identificación y el RSRP medido, sin el TA. Esto implica que no se dispone de un discriminante, por lo que obliga a utilizar el ajuste de regresión lineal.

Este método, si la regresión lineal estima bien la distancia y conoce de la información de los vecinos, es más preciso que el del cambio de eNB ya que tan sólo ofrece una solución, la intersección de la circunferencia principal con las de, al menos 2, eNBs vecinos.

Para conseguir la máxima precisión del método de localización con los parámetros de capa física accesibles, se han mejorado los métodos de localización mediante el empleo de ajuste por regresión del RSRP.

El primero de ellos fue la regresión polinómica lineal, la cual es la más sencilla, pero que no es subjetiva a las condiciones del terreno. Tan solo representa un aumento de la distancia inversamente proporcional a la variación del RSRP. Por ello, es la más imprecisa, pero no imprescindible, debido a su utilización en el método de la trilateración de la posición.

Para mejorar la precisión, se recurrió al ajuste por regresión polinómica, la cual se adapta a las variaciones del RSRP, con una mayor precisión. Sin embargo, este método presentó un problema. Para un cierto RSRP, pueden estar asociadas varias soluciones de distancia, por lo que hay que decidir cuál de ellas utilizar. Para ello se introdujo el concepto de discriminante, cuya función es escoger una de las soluciones. Este una distancia que calcula la diferencia en distancia al resto de posibles soluciones, y la que sea mínima será la distancia estimada, es decir, la distancia más parecida. Como discriminante se ha utilizado el parámetro TA, el cuál es un valor que corresponde a la distancia entre el eNB y el UE.

El uso de discriminantes también ha evolucionado para buscar la máxima precisión. Este comenzó con el uso del TA unidad, valor fijo de 78,125m, pero que no siempre su multiplicación por el valor del TA resulta en la distancia entre eNB y UE.

Para solucionar este problema, se han desarrollado los siguientes discriminantes:

- Media del TA, el cual asigna a cada celda la media de los cocientes entre la distancia real del enlace y el valor del TA.
- Mediana del TA, mismo concepto que la Media del Ta, pero sustituyendo el valor medio por el valor de la mediana. Es útil cuando se han producido cocientes que distorsionan el cálculo, muy altos o bajos, y no es sensible a esos extremos como sí lo es la media.
- Proporción Específica del TA, igual que la Mediana del TA, pero en vez de asignarlo a cada celda, lo asigna a cada TA de cada celda, es decir, más preciso.

La Proporción Específica del TA ha resultado ser el discriminante que ha proporcionado los resultados más precisos en cuanto al cálculo de la distancia estimada.

Sin embargo, se ha querido dar un paso más, y utilizando el ajuste por regresión polinómica con la Proporción Específica del TA como discriminante, se ha diferenciado el conjunto de *logs* en dos subconjuntos, en función de si se acerca el UE al eNB o si se aleja. Para ello se ha utilizado el valor del RSRP, y se ha analizado su media móvil.

El primer método ha sido la Variación del RSRP (media móvil entre el *log* actual y el anterior) y el segundo ha sido la Tendencia del RSRP (media móvil entre el *log* actual y los tres anteriores).

A partir del análisis y validación de los métodos desarrollados en el presente TFG, se ha determinado que el proceso para estimar la distancia del enlace depende principalmente de tres factores:

1. Entorno en el que se desea estimar la distancia. Es importante conocer si se trata de un escenario urbano o rural, y de si el UE se desplaza o no en un vehículo.
2. Método de localización a utilizar. En este TFG se han desarrollado dos principalmente: método del cambio de eNB, y método de trilateración con la información de celdas vecinas.
3. Elección del método de regresión para el ajuste de los datos medidos. Es necesario conocer su tipo particular si tiene (por ejemplo, el polinómico puede ser el general, el de acercamiento, etc.), y el discriminante, si el ajuste lo requiriese. Entre los métodos desarrollados en el presente TFG se encuentran la regresión lineal, la polinómica; y discriminantes como el TA unidad, la proporción específica del TA, etc.

Existen limitaciones y restricciones a la hora de aplicar los métodos desarrollados. Así, no se puede utilizar el método de trilateración con un ajuste por regresión polinómica, ya que la información de las celdas vecinas no aporta información del TA para utilizarla como discriminante. También, aunque no sea obligatorio, es recomendable conocer el entorno, ya que entre los tipos de regresión polinómica con la proporción específica del TA como discriminante, según el tipo de escenario, puede ser más preciso un ajuste u otro.

En resumen, para conocer la distancia a la que se encuentra el UE del eNB es necesario conocer el entorno, después elegir el método y, por último, el tipo de ajuste de regresión de entre los disponibles para ese método, o el más recomendable para el entorno en cuestión.

En este TFG se han analizado cuatro entornos o escenarios, que son vehículo-urbano, vehículo-rural, caminando-urbano, y caminando-rural. A partir del análisis de los resultados de estos cuatro escenarios, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

En primer lugar, se tiene que, por muy bien que se ajuste la curva de regresión a las medidas según el nivel de potencia y la distancia del enlace, en un ajuste polinómico (el más preciso) la clave es la adecuada elección del discriminante, el cual, en dicho método, está directamente relacionado con el TA. Como se ha explicado en los diferentes análisis, el TA medido por el UE es más fiable cuanto menor sea la velocidad de desplazamiento del UE, debido a la variación de distancia del eNB al UE entre los *logs*.

Con un buen discriminante es cuestión de que el ajuste por regresión se realice correctamente, el cual se realiza sobre el RSRP. En los escenarios analizados se ha determinado que el que más precisión aporta es el urbano, debido a las condiciones físicas de la red, caracterizada por una: mayor densidad de eNBs. En el escenario rural, la poca densidad de eNBs y las situaciones NLOS (cuando la distancia entre UE y eNB es muy grande), debilitan la precisión del ajuste de regresión.

En un escenario urbano, el empleo de los métodos que diferencian el conjunto de *logs* en dos subconjuntos, en función de si el UE se acerca o se aleja al eNB han presentado la mejor precisión. Sin embargo, en un entorno rural, la fiabilidad del ajuste por regresión polinómica utilizando todo el conjunto de datos ha sido el más fiable a la hora de calcular la distancia estimada. Finalmente, si se ordenan los escenarios de mayor precisión a menor precisión obtenida, el orden sería: caminando-urbano, caminando-rural, vehículo-urbano y vehículo-rural.

## 6. Bibliografía.

- [1] O’Keefe, Bryan. (2017). Finding Location with Time of Arrival and Time Difference of Arrival.  
([https://sites.tufts.edu/eeseniorshandbook/files/2017/05/FireBrick\\_OKeefe\\_F1.pdf](https://sites.tufts.edu/eeseniorshandbook/files/2017/05/FireBrick_OKeefe_F1.pdf))
- [2] Soderini, Aurn Pink (2015). Outdoor Positioning Algorithms Based on LTE and WiFi Measurements. Tampere University of Technology.  
(<https://core.ac.uk/download/pdf/196556495.pdf>)
- [3] Huawei. Nota Técnica (2021). ¿Cuáles son las diferencias entre RSRP, RSRQ, RSSI, y SINR?  
(<https://forum.huawei.com/enterprise/es/%C2%BFcu%C3%A1les-son-las-diferencias-entre-rsrp-rsrq-rssi-y-sinr/thread/709875-100239>) [Consultado el 7-6-2023]
- [4] Shu Wang, Jungwon Min and Byung K. Yi. (2008). Location Based Services for Mobiles: Technologies and Standards. IEEE International Conference on Communication.  
([https://www.researchgate.net/publication/265758564\\_Location\\_Based\\_Services\\_for\\_Mobiles\\_Technologies\\_and\\_Standards](https://www.researchgate.net/publication/265758564_Location_Based_Services_for_Mobiles_Technologies_and_Standards))
- [5] Jyrki T. J. Penttinen (2019). 5G Explained: Security and Deployment of Advanced Mobile Communications. (<https://www.wiley.com/en-ie/5G+Explained:+Security+and+Deployment+of+Advanced+Mobile+Communications-p-9781119275688>)
- [6] *GNet Track*. Aplicación para la monitorización de la red para dispositivos Android, elaborada por Gyokov Solutions. (<https://gykovsolutions.com/g-nettrack/>) [Consultado el 7-6-23]
- [7] *Antenas GSM*. Mapa con la ubicación y localización de toda la red de antenas de telefonía móvil con cobertura GSM, 2G, 3G, 4G y 5G de las operadoras de España. (<https://www.antenasgsm.com>) [Consultado el 7-6-2023]

- [8] Valera Sánchez, Francisco Javier (2012). Técnicas de Acceso Múltiple. OFDMA y SCFDMA. Universidad de Sevilla.  
(<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12081/fichero/OFDMA+y+SC-FDMA+en+la+Interfaz+Radio+de+LTE%252F4.+T%C3%A9cnicas+de+acceso+m%C3%BAltiple.+OFDMA+y+SC-FDMA.pdf>)
- [9] López Pradas, Gonzalo (2011). LTE o la cuarta generación de redes móviles (4G). Universidad de Sevilla.  
(<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/11983/fichero/Cap%C3%ADtulo+2+-+LTE.pdf>)
- [10] Blog LTE. Nota Técnica. Señal de referencia de posicionamiento (PRS) en LTE.  
<https://lte-question.blogspot.com/2014/09/PRSLTE.html> [Consultado el 7-6-2023]
- [11] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent (2010). LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles. (<https://proyectolte.files.wordpress.com/2012/09/lte-nuevas-tendencias.pdf>)
- [12] iTecNote. Nota Técnica. CGI y CGI evolucionado para redes GSM y LTE.  
(<https://itecnote.com/tecnote/android-ecgi-and-cgi-for-lte-and-gsm-networks/>) [Consultado el 7-6-2023]
- [13] 5G Tools. Nota Técnica (2021). Calculadora de la distancia asociada al Timing Advance en redes 4G. (<https://5g-tools.com/4g-lte-timing-advance-distance-calculator/>) [Consultado el 7-6-2023]
- [14] *Cell Mapper*. Servicio de mapeo de antenas y de su cobertura colaborativo.  
(<https://cellmapper.net>) [Consultado el 7-6-2023]
- [15] Santosh Subedi and Jae-Young Pyun (2020). A Survey of Smartphone-Based Indoor Positioning System Using RF-Based Wireless Technologies.  
(<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/24/7230>)

- [16] Yuan You and Chang Wu (2019). Indoor Positioning System with Cellular Network Assistance Based on Received Signal Strength Indication of Beacon. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8945428>)
- [17] Huiyu Liu, Yunzhou Zhang, Xiaolin Su, Xintong Li, and Ning Xu (2015). Mobile Localization Based on Received Signal Strength and Pearson's Correlation Coefficient. ([https://www.researchgate.net/publication/281753273\\_Mobile\\_Localization\\_Based\\_on\\_Received\\_Signal\\_Strength\\_and\\_Pearson's\\_Correlation\\_Coefficient](https://www.researchgate.net/publication/281753273_Mobile_Localization_Based_on_Received_Signal_Strength_and_Pearson's_Correlation_Coefficient))
- [18] Shrestha, Shweta (2012). RSS-based position estimation in cellular and WLAN networks. Tampere University of Technology. (<https://core.ac.uk/download/pdf/250163548.pdf>)
- [19] *infoAntenas*. Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital, MINETUR. (<https://geoportal.minetur.gob.es/VCTEL/vcne.do>)
- [20] *OpenCellID*. Proyecto comunitario colaborativo que recopila las posiciones GPS de las torres de telefonía móvil. (<https://opencellid.org/>)
- [21] *MatLab*. Software de programación y computación numérica para analizar datos, desarrollar algoritmos y crear modelos. (<https://es.mathworks.com/>)

## 7. Anexos

En este Capítulo de Anexos, se van a desarrollar las expresiones analíticas para el cálculo de la posición del UE.

Las variables que se utilizan son:

- $c$ , la velocidad de la luz.
- $t_{arrival}$ , el momento en el que se recibe la señal.
- $t_{sent}$ , el momento en el que se envía la señal.
- $t_n$ , el tiempo de transmisión de la señal.
- $d_n$ , la distancia de la transmisión de la señal o distancia del enlace.
- $(X_n, Y_n)$ , las coordenadas del n-eNB.
- $(x_n, y_n)$ , las coordenadas del UE.
- $\Delta t_{12}$ , es la diferencia en tiempos de llegada entre 2 eNBs.
- $\Delta d_{12}$ , es la diferencia en distancia entre 2 eNBs.
- $\theta_n$ , es un ángulo de la Figura 2.11,

### 7.1.- Desarrollo de las expresiones para el Tiempo de Llegada, TOA.

$$\begin{array}{c|c|c}
 t_1 = t_{arrival(1)} - t_{sent} & t_2 = t_{arrival(2)} - t_{sent} & t_3 = t_{arrival(3)} - t_{sent} \\
 d_1 = t_1 * c & d_2 = t_2 * c & d_3 = t_3 * c \\
 d_1 = \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} & d_2 = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} & d_3 = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} \\
 d_1^2 = (X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2 & d_2^2 = (X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2 & d_3^2 = (X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2
 \end{array}$$

$$d_1^2 = X_1^2 + x^2 - 2 \cdot X_1 \cdot x + Y_1^2 + y^2 - 2 \cdot Y_1 \cdot y$$

$$x^2 + y^2 = 2 \cdot X_1 \cdot x + 2 \cdot Y_1 \cdot y + d_1^2 - X_1^2 - Y_1^2 \quad (1)$$

$$x^2 + y^2 = 2 \cdot X_2 \cdot x + 2 \cdot Y_2 \cdot y + d_2^2 - X_2^2 - Y_2^2 \quad (2)$$

$$x^2 + y^2 = 2 \cdot X_3 \cdot x + 2 \cdot Y_3 \cdot y + d_3^2 - X_3^2 - Y_3^2 \quad (3)$$

$$(1) \text{ y } (2) \quad 2 \cdot X_1 \cdot x + 2 \cdot Y_1 \cdot y + d_1^2 - X_1^2 - Y_1^2 = 2 \cdot X_2 \cdot x + 2 \cdot Y_2 \cdot y + d_2^2 - X_2^2 - Y_2^2$$

$$(1) \text{ y } (3) \quad 2 \cdot X_1 \cdot x + 2 \cdot Y_1 \cdot y + d_1^2 - X_1^2 - Y_1^2 = 2 \cdot X_3 \cdot x + 2 \cdot Y_3 \cdot y + d_3^2 - X_3^2 - Y_3^2$$

$$(1) \text{ y } (2) \quad 2 \cdot (X_2 - X_1) \cdot x + 2 \cdot (Y_2 - Y_1) \cdot y = X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_2^2$$

$$(1) \text{ y } (3) \quad 2 \cdot (X_3 - X_1) \cdot x + 2 \cdot (Y_3 - Y_1) \cdot y = X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_3^2$$

$$(1) \text{ y } (2) \quad (X_2 - X_1) \cdot x + (Y_2 - Y_1) \cdot y = \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_2^2)$$

$$(1) \text{ y } (3) \quad (X_3 - X_1) \cdot x + (Y_3 - Y_1) \cdot y = \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_3^2)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_2^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 + d_1^2 - d_3^2) \end{bmatrix}$$

**Ecuación 2.6.**

## 7.2.- Desarrollo de las expresiones para la Diferencia del Tiempo de Llegada, *TDOA*.

$$\begin{array}{l} \Delta t_{12} = t_{a2} - t_{a1} \\ \Delta t_{13} = t_{a3} - t_{a1} \\ \Delta t_{23} = t_{a3} - t_{a2} \\ \Delta d_{12} = \Delta t_{12} \cdot c \end{array} \left| \begin{array}{l} \Delta d_{13} = \Delta t_{13} \cdot c \\ \Delta d_{23} = \Delta t_{23} \cdot c \end{array} \right. \begin{array}{l} \Delta d_{12} = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ \Delta d_{13} = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} \\ \Delta d_{23} = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} \end{array}$$

$$\Delta d_{12} = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2} = d_2 - d_1$$

$$d_2^2 = (d_1 + \Delta d_{12})^2$$

$$d_2^2 = X_2^2 + Y_2^2 - 2 \cdot X_2 \cdot x - 2 \cdot Y_2 \cdot y + x^2 + y^2$$

$$d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot \Delta d_{12} + \Delta d_{12}^2 = X_2^2 + Y_2^2 - 2 \cdot X_2 \cdot x - 2 \cdot Y_2 \cdot y + x^2 + y^2$$

$$2 \cdot d_1 \cdot \Delta d_{12} + \Delta d_{12}^2 = X_2^2 + Y_2^2 - 2 \cdot X_2 \cdot x - 2 \cdot Y_2 \cdot y + x^2 + y^2 - d_1^2$$

$$d_1^2 = X_1^2 + Y_1^2 - 2 \cdot X_1 \cdot x - 2 \cdot Y_1 \cdot y + x^2 + y^2$$

$$2 \cdot d_1 \cdot \Delta d_{12} + \Delta d_{12}^2 = X_2^2 + Y_2^2 - 2 \cdot X_2 \cdot x - 2 \cdot Y_2 \cdot y + x^2 + y^2 - (X_1^2 + Y_1^2 - 2 \cdot X_1 \cdot x - 2 \cdot Y_1 \cdot y + x^2 + y^2)$$

$$2 \cdot d_1 \cdot \Delta d_{12} + \Delta d_{12}^2 = X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - 2 \cdot (X_2 - X_1) \cdot x - 2 \cdot (Y_2 - Y_1) \cdot y$$

$$2 \cdot (X_2 - X_1) \cdot x + 2 \cdot (Y_2 - Y_1) \cdot y + 2 \cdot \Delta d_{12} \cdot d_1 = X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{12}^2$$

$$(X_2 - X_1) \cdot x + (Y_2 - Y_1) \cdot y + \Delta d_{12} \cdot d_1 = \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{12}^2)$$

$$(X_3 - X_1) \cdot x + (Y_3 - Y_1) \cdot y + \Delta d_{13} \cdot d_1 = \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{13}^2)$$

$$(X_3 - X_2) \cdot x + (Y_3 - Y_2) \cdot y + \Delta d_{23} \cdot d_2 = \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 - \Delta d_{23}^2)$$

$$\Delta d_{12} = d_2 - d_1$$

$$d_2 = \Delta d_{12} + d_1$$

$$\Delta d_{23} \cdot d_2 = \Delta d_{23} \cdot (\Delta d_{12} + d_1)$$

$$\Delta d_{23} \cdot d_2 = \Delta d_{23} \cdot \Delta d_{12} + \Delta d_{23} \cdot d_1$$

$$(X_3 - X_2) \cdot x + (Y_3 - Y_2) \cdot y + \Delta d_{23} \cdot d_1 = \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 - \Delta d_{23}^2) - \Delta d_{23} \cdot \Delta d_{12}$$

$$\begin{bmatrix} X_2 - X_1 & Y_2 - Y_1 & \Delta d_{12} \\ X_3 - X_1 & Y_3 - Y_1 & \Delta d_{13} \\ X_3 - X_2 & Y_3 - Y_2 & \Delta d_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ d_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(X_2^2 + Y_2^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{12}^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_1^2 - Y_1^2 - \Delta d_{13}^2) \\ \frac{1}{2}(X_3^2 + Y_3^2 - X_2^2 - Y_2^2 - \Delta d_{23}^2) - \Delta d_{23} \cdot \Delta d_{12} \end{bmatrix}$$

### Ecuación 2.10

## 7.3.- Desarrollo de las expresiones para el Ángulo de Llegada, AOA.

$$\theta_3 = 180^\circ - \theta_1 - \theta_2$$

$$\frac{d_{12}}{\sin \theta_3} = \frac{d_1}{\sin \theta_2} = \frac{d_2}{\sin \theta_1}$$

$$d_1 = \frac{d_{12} \cdot \sin \theta_2}{\sin \theta_3} = d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3}$$

$$d_2 = \frac{d_{12} \cdot \sin \theta_1}{\sin \theta_3} = d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3}$$

$$x = X_1 + d_1 \cdot \cos \theta_1$$

$$y = Y_1 + d_1 \cdot \sin \theta_1$$

$$x = X_2 - d_2 \cdot \cos \theta_2$$

$$y = Y_2 + d_2 \cdot \sin \theta_2$$

$$x = X_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_1$$

$$y = Y_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_1$$

$$x = X_2 - d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_2$$

$$y = Y_2 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_2$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_1 \\ Y_1 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_1 \end{bmatrix} \quad \text{o} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_2 - d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \cos \theta_2 \\ Y_2 + d_{12} \cdot \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_3} \cdot \sin \theta_2 \end{bmatrix}$$

### Ecuación 2.11