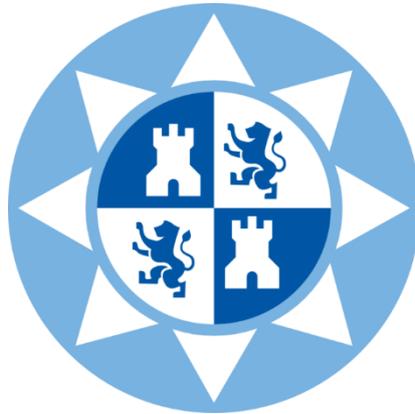


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



Trabajo Fin de Grado

Análisis de las pérdidas por propagación en la banda de 3.5 GHz en una plantación de cítricos a partir de medidas experimentales.



AUTORA: Clara Román Maseres

DIRECTOR: Leandro Juan Llácer

SEPTIEMBRE 2021

Autora:	Clara Román Maseres
E-mail de la autora:	clararomanmaseres@gmail.com
Director:	Leandro Juan Llácer
E-mail del director:	leandro.juan@gmail.com
Título del TFG:	Análisis de las pérdidas por propagación en la banda de 3.5GHz en una plantación de cítricos a partir de medidas experimentales.
Resumen:	<p>En la actualidad se están implementando entre otras medidas: la utilización a gran escala de sensores en los cultivos, el desarrollo de la maquinaria y vehículos sin conductor y el análisis remoto de imágenes con el objetivo de desarrollar la Agricultura 4.0 y, con ello, resulta necesario implementar sistemas de radiocomunicaciones que sean capaces de trabajar en diversas bandas de frecuencia en entornos agrícolas, lo que va a suponer la necesidad de planificar eficientemente los sistemas de radiocomunicación en estos entornos.</p> <p>La planificación de estos sistemas se realiza mediante herramientas informáticas que incorporan modelos de propagación basados en teorías electromagnéticas que permiten estimar las pérdidas por propagación y la cobertura radioeléctrica. En este sentido, resulta la necesidad de proponer nuevos modelos de propagación para entornos agrícolas específicos que puedan ser incorporados a estas herramientas de planificación.</p> <p>El objetivo principal del proyecto es comparar las pérdidas por propagación obtenidas a partir de unas campañas de medidas en la banda de 3.5 GHz que se han llevado a cabo en una plantación de cítricos, con las estimadas mediante modelos teóricos utilizados habitualmente en entornos urbanos.</p>
Titulación:	Grado en Ingeniería en Sistemas de Telecomunicación.
Departamento:	Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
Fecha de Presentación:	Septiembre 2021

Índice

Capítulo 1. Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos.....	1
1.3. Fases del proyecto.....	2
1.4. Estructura	2
Capítulo 2. Modelos de propagación en entorno urbano	3
2.1. Walfisch-Bertoni.....	3
2.2. COST 231	6
Capítulo 3. Campaña de medidas	11
3.1. Entorno de propagación.....	11
3.2.- Sistema de medidas	12
3.3. Procedimiento en las medidas.....	15
Capítulo 4. Resultados	17
4.1. Parámetros para el análisis	17
4.2. Pérdidas con la distancia (ángulo con la calle igual a 90 grados).....	18
4.3. Estudio de la difracción final con el ángulo con la calle	20
4.4. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle	35
Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas	37
5.1. Conclusiones	37
5.2. Futuras líneas.....	37
Bibliografía	38
Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90o)	39
Anexo II. Difracción final con el ángulo con la calle	44
Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle.....	48

Índice de figuras

Figura 1. Varias trayectorias de rayos para la propagación de UHF en presencia de edificios [5].	3
Figura 2. Corte vertical de perfil idealizado con aristas equiespaciadas y con corte horizontal visto desde arriba [6].	4
Figura 3. Situación de propagación típica en zonas urbanas y la definición de los parámetros usados en el modelo COST-WI[7].	6
Figura 4. Definición del ángulo de orientación de la calle ϕ [7].	9
Figura 5. Comparación Lori y la función seno.	10
Figura 6. Corte vertical con edificios equiespaciados [6].	11
Figura 7. Corte vertical con árboles equiespaciados[6].	11
Figura 8. Entorno de las medidas [6].	12
Figura 9. Sistema de medidas utilizado [9].	13
Figura 10. Disposición estación transmisora [9].	14
Figura 11. Disposición estación transmisora [9].	14
Figura 12. Disposición estación receptora: vehículo con antena receptora [9].	15
Figura 13. Disposición estación receptora: interior del vehículo [9].	15
Figura 14. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90^0)	18
Figura 15. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 1.	20
Figura 16. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 2.	21
Figura 17. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 3.	21
Figura 18. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 4.	22
Figura 19. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 5.	22
Figura 20. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 6.	23
Figura 21. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 7.	23
Figura 22. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 8.	24
Figura 23. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 9.	24

Figura 24. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 10.	25
Figura 25. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 11.	25
Figura 26. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 12.	26
Figura 27. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 13.	26
Figura 28. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 14.	27
Figura 29. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 15.	27
Figura 30. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 16.	28
Figura 31. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 17.	28
Figura 32. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 18.	29
Figura 33. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 19.	29
Figura 34. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 20.	30
Figura 35. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 21.	30
Figura 36. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 22.	31
Figura 37. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 23.	31
Figura 38. Pérdidas con la distancia con el ángulo de la calle.	35

Índice de tablas

Tabla 1. Pendientes y desviación estándar.....	19
Tabla 2. Errores respecto a las medidas.....	19
Tabla 3. Error medio por fila.....	32
Tabla 4. Error cuadrático medio por fila.	33
Tabla 5. Desviación estándar por fila.	34
Tabla 6. Pendientes y desviación estándar.....	36
Tabla 7. Errores respecto a las medidas.....	36

Capítulo 1. Introducción y objetivos

1.1. Introducción

La llegada de la Agricultura 4.0 pretende incrementar la eficiencia y rendimiento del sector agrícola y, a su vez, reducir sus costes y consumo [1]. Para su desarrollo se están implementando la utilización a gran escala de sensores en los cultivos, el desarrollo de la maquinaria y vehículos sin conductor y el análisis remoto de imágenes, entre otras actuaciones [2]. Esta situación crea la necesidad de implementar sistemas de radiocomunicaciones que trabajen, de una forma eficiente, en diversas bandas de frecuencia en los entornos de este sector.

Las herramientas informáticas utilizadas para el despliegue de estos sistemas incorporan modelos de propagación basados en teorías electromagnéticas [3]. Los modelos, junto con los parámetros radioeléctricos de los equipos de radiocomunicaciones (potencia transmitida, pérdidas y ganancias en transmisión y recepción, sensibilidad de los receptores, etc.) y el perfil del terreno estiman las pérdidas por propagación y la cobertura radioeléctrica, caracterizando así el radiocanal [4]. La gran mayoría de los modelos de propagación incorporados a estas herramientas se pueden aplicar en entornos rurales, urbanos, suburbanos e interiores, debido al gran despliegue de sistemas como GSM, UMTS o LTE.

Debido a la necesidad del uso de una gran cantidad de sensores y actuadores en la Agricultura 4.0 es imprescindible un gran despliegue de sistemas inalámbricos en otros entornos. Para este propósito, es necesario incluir nuevos modelos de propagación para terrenos agrícolas específicos en las herramientas de planificación.

1.2. Objetivos

El objetivo primero del proyecto es analizar unas campañas de medidas en la banda de 3.5GHz que se han llevado a cabo en una plantación de cítricos para analizar las pérdidas de propagación en este tipo de entornos.

Para el análisis se van a comparar dos modelos de propagación utilizados en entornos urbanos con las medidas tomadas en la plantación. Se van a analizar

las pérdidas de propagación con la distancia y la orientación con la calle de la difracción final.

1.3. Fases del proyecto

Las fases a seguir en la presente memoria son las siguientes:

1. Estudiar las medidas realizadas en diferentes recorridos de una plantación de cítricos, analizando también el tipo de entorno.
2. Programar en MATLAB la representación de las pérdidas de propagación con relación a la distancia existente entre la antena transmisora y la receptora y las rectas de regresión correspondientes.
3. Analizar la aplicabilidad de modelo de propagación utilizados en entorno urbano para estimar las pérdidas por propagación en este tipo de entornos
4. Redacción de la presente memoria.

1.4. Estructura

En el capítulo 2 se explicará los modelos de propagación que se usan en entornos urbanos Walfisch-Bertoni y el COST 231 y las fórmulas planteadas para las pérdidas en espacio libre, pérdidas por difracción múltiple y pérdidas por difracción final.

En el capítulo 3 se planteará la campaña de medidas realizada concretando el entorno en el que se realizó, el sistema de medidas y su procesado.

En el capítulo 4 se mostrará los resultados obtenidos de la aplicación de los modelos a las medidas mediante el programa MATLAB.

En el capítulo 5 se presentará las conclusiones obtenidas de los resultados y las futuras líneas de este estudio.

Capítulo 2. Modelos de propagación en entorno urbano

2.1. Walfisch-Bertoni

Con la llegada de los teléfonos móviles celulares y otros sistemas de radio comunicaciones en la banda UHF (“Ultra High Frequency”), que comprende entre los 300 MHz a los 3GHz, se produce la necesidad de poder predecir las pérdidas del trayecto de radio en un entorno urbano entre una antena elevada y los móviles a pie de calle [5].

El modelo de Walfisch-Bertoni es un modelo físico del proceso de propagación que tiene lugar en entornos urbanos. La gran mayoría de las ciudades de hoy en día constan de un núcleo con edificios de gran altura rodeados de otros edificios de menor altura, repartidos en regiones que comprenden muchas manzanas cuadradas.

Por ello al nivel de la calle los campos producidos por una antena fija elevada se encuentran a la sombra de los edificios, exceptos los casos donde se encuentran alineados con la antena transmisora, o a muy corta distancia, la antena no es visible desde el nivel de la calle. Por lo tanto, la propagación se tiene que llevar a cabo a través de los edificios, entre ellos o por encima de los edificios con el campo difractado en los techos hasta el nivel de la calle. (ver figura 1)

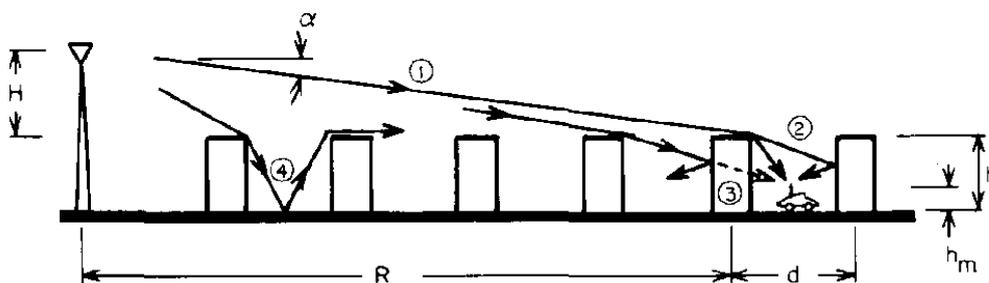


Figura 1. Varias trayectorias de rayos para la propagación de UHF en presencia de edificios [5].

Es por ello que el campo que llega al nivel de la calle es el resultado de la difracción de los campos que inciden sobre los techos en las proximidades del móvil.

El cálculo para conocer las pérdidas totales siguiendo el presente modelo, debemos sumar las tres contribuciones siguientes [6]: pérdidas de espacio libre, pérdidas por difracción múltiple sobre edificios y pérdidas por difracción final.

- **Espacio libre**

Las pérdidas en espacio libre miden la atenuación del radioenlace en un espacio sin obstáculos entre una antena transmisora y otra receptora.

Es decir, la relación entre potencia radiada por la antena transmisora y la potencia recibida por la antena receptora.

Se calculan con la expresión:

$$L_o(dB) = 32.44 + 20\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) \quad (1)$$

donde:

- d se expresa en km.

- f es la frecuencia expresada en MHz.

- **Difracción múltiple**

Como ha sido explicado en el modelo de Walfisch-Bertoni, previo al último obstáculo, existen obstáculos anteriores que causan el fenómeno conocido como difracción múltiple.

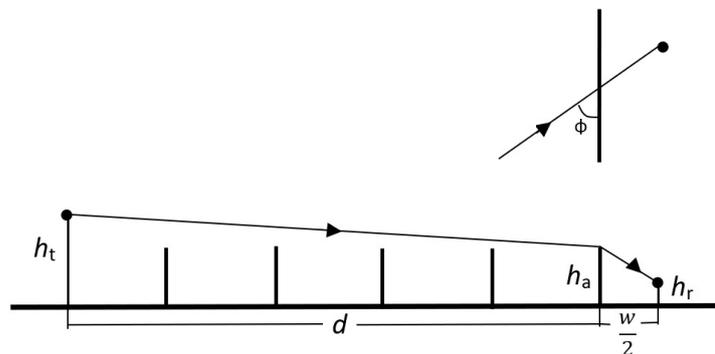


Figura 2. Corte vertical de perfil idealizado con aristas equiespaciadas y con corte horizontal visto desde arriba [6].

Para estimar las pérdidas por difracción el modelo sustituye los edificios por aristas (Figura 2) y plantea las ecuaciones para el cálculo de la difracción de las múltiples aristas y la difracción final.

Las pérdidas por difracción múltiple se calculan como:

$$L_{msd} = 68.87 - 9\log_{10}(f_{[MHz]}) - 18\log_{10}(h_t - h_a) + 18\log_{10}(d_{[km]}) \quad (2)$$

siendo:

- d distancia en km.

- f frecuencia expresada en MHz.

- h_t altura del transmisor.

- h_a altura de los edificios.

- Difracción final

Pérdidas definidas por una única difracción única final, es decir, con la cubierta superior del edificio y el nivel de la calle, L_{rts} (*roof-top-to-street*) “techo a la calle”.

$$L_{rts}(dB) = -11.8 + 10\log_{10}(f) + 5\log_{10}\left[\left(\frac{w}{2}\right)^2 + (h_a - h_r)^2\right] + 20\log_{10}\left[\frac{2(h_a - h_r)}{w}\right] \quad (3)$$

donde:

- f se expresa en MHz

- w es el ancho de la calle

- h_a es la altura media de los edificios

- h_r es la altura del receptor

2.2. COST 231

Un resultado importante del COST 231 es el desarrollo de modelos de propagación para aplicaciones en áreas urbanas con bandas de 900 y 1800 MHz [7]. Con la ayuda de una extensiva campaña de medidas en ciudades europeas se ha podido investigar diferentes modelos existentes y se ha creado nuevos modelos de propagación. Los nuevos modelos están basados en las aproximaciones de los modelos Walfisch-Bertoni, Ikegami y Hata.

Partiendo de ello se desarrolló en modelo COST 231-Walfisch-Ikegami (COST-WI). COST 231 propone la combinación de los modelos Walfisch e Ikegami con el objetivo de mejorar la estimación de las pérdidas de trayectoria (“Path-loss”) al tener en cuenta más datos que describen las características del entorno urbano, como son:

- Altura del edificio h_{Roof} ,
- Anchura de las calles w ,
- Separación de los edificios b y
- Orientación de la calle con respecto a la trayectoria de radio directa ϕ .

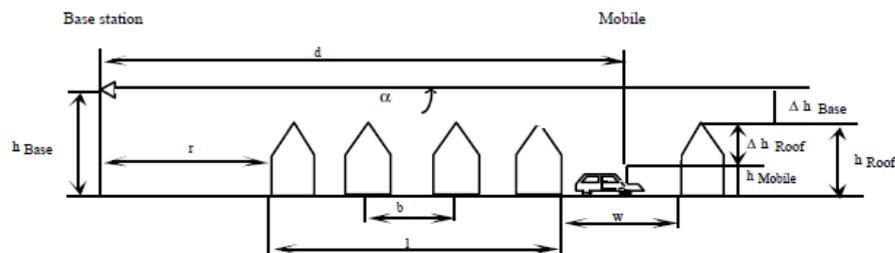


Figura 3. Situación de propagación típica en zonas urbanas y la definición de los parámetros usados en el modelo COST-WI[7].

- Espacio libre

Las pérdidas de espacio libre vienen dadas por[8]:

$$L_0 = 32.4 + 20 \log(d_{[km]}) + 20 \log(f_{[MHz]}) \quad (4)$$

- Difracción múltiple

El modelo de Walfisch-Bertoni es ampliado por COST 231 para las antenas de estaciones base situadas por debajo de los tejados mediante una función empírica basada en mediciones [7]. La altura de los edificios y sus separaciones espaciales a lo largo del trayecto radioeléctrico directo se modelan mediante pantallas absorbentes para la determinación de la difracción múltiple L_{msd} . La difracción múltiple del modelo COST 231 es [8]:

$$L_{msd}^{CWI} = L_{bsh} + k_a + k_d \log(d_{[km]}) + k_f \log(f_{[MHz]}) - 9 \log(w_{B[m]}) \quad (5)$$

donde:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log(1 + h_{b[m]} - H_{B[m]}) , & \text{para } h_b > H_B \\ 0, & \text{para } h_b \leq H_B \end{cases} \quad (6)$$

$$k_a = \begin{cases} 54, & \text{para } h_b > H_B \\ 54 - 0.8(h_{b[m]} - H_{B[m]}), & \text{para } d \geq 0.5 \text{ km y } h_b \leq H_B \\ 54 - 1.6(h_{b[m]} - H_{B[m]}) d_{[km]}, & \text{para } d < 0.5 \text{ km y } h_b \leq H_B \end{cases} \quad (7)$$

$$k_d = \begin{cases} 18, & \text{para } h_b > H_B \\ 18 - 15 \frac{h_b - H_B}{H_B}, & \text{para } h_b \leq H_B \end{cases} \quad (8)$$

$$k_f = \begin{cases} -4 + 0.7 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right), & \text{para ciudades medianas y centros} \\ & \text{suburbanos con densidad mínima de árboles} \\ -4 + 1.5 \left(\frac{f_{[MHz]}}{925} - 1 \right), & \text{para centros metropolitanos} \end{cases} \quad (9)$$

donde:

- k_a representa el aumento de las pérdidas por trayectoria para antenas base por debajo de las cubiertas de los edificios adyacentes.

- k_d y k_f controlan la dependencia de las pérdidas por difracción multi pantalla frente a la distancia y radio frecuencia.

- d es la distancia.

- w_B es la distancia entre los centros de los edificios.

- H_B la altura de los edificios

- h_m la altura de la antena receptora móvil

- h_B la altura de la antena transmisora fija

- Difracción final

El término L_{rts} describe el acoplamiento de la onda que se propaga a lo largo del trayecto multipantalla en la calle donde se encuentra la estación móvil[7].

$$L_{rts}^{CWI} = -16.9 - 10 \log(w_{S[m]}) + 10 \log(f_{[MHz]}) + 20 \log(\Delta h_{MT}) + L_{Ori [dB]} \quad (10)$$

Para las funciones:

$$\Delta h_{MT} = H_{B[m]} - h_{m[m]} \quad (11)$$

$$\Delta h_{BS[m]} = h_{b[m]} - H_{B[m]} \quad (12)$$

siendo:

- H_B altura de los edificios

- h_m altura de la antena receptora móvil

- h_b altura de la antena transmisora fija

- w_s anchura de la calle

- Difracción final con ángulo con la calle

El modelo de Ikegami asume que la propagación entre la estación base y la estación móvil ocurre como espacio libre al que añade un nuevo término , con el objetivo de explicar el comportamiento de la señal entre las calles que se encuentran delimitadas por muros en ambos lados[8].

La difracción final del modelo Ikegami queda expresada como:

$$L_{rts}^I = -8.19 + 10 \log(f_{[MHz]}) - 10 \log(w_s[m]) + 20 \log(\Delta h_{MT[m]}) + 10 \log[\sin(\phi)] \quad (13)$$

donde:

$$\Delta h_{MT[m]} = H_B [m] - h_m [m] \quad (14)$$

siendo:

- w_s anchura de la calle,
- H_B altura del edificio,
- h_m altura de la estación móvil,
- ϕ ángulo de recepción de la señal con respecto al eje de la calle.

El modelo COST 231-Walfisch-Ikegami sigue el enfoque del modelo Walfisch-Bertoni, pero sustituye el término que caracteriza la propagación entre la cubierta del edificio y la estación móvil por el utilizado en el modelo de Ikegami. Así se reemplaza el término $\log[\sin(\phi)]$ por la función L_{Ori} .

$$L_{Ori} = \begin{cases} -10 + 0.354 \left(\frac{\phi}{\text{deg}} \right) & \text{for } 0^\circ \leq \phi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075 \left(\frac{\phi}{\text{deg}} - 35 \right) & \text{for } 35^\circ \leq \phi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114 \left(\frac{\phi}{\text{deg}} - 55 \right) & \text{for } 55^\circ \leq \phi < 90^\circ \end{cases} \quad (15)$$

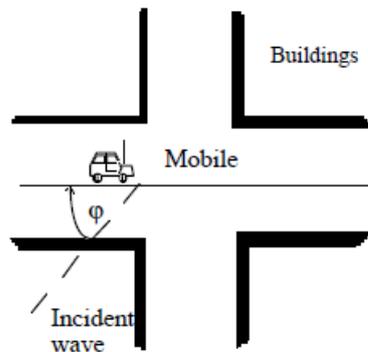


Figura 4. Definición del ángulo de orientación de la calle ϕ [7].

En la figura 5 se observa la comparación del modelo COST 231 propone la función L_{ori} para sustituir el término $\log [\sin(\phi)]$.

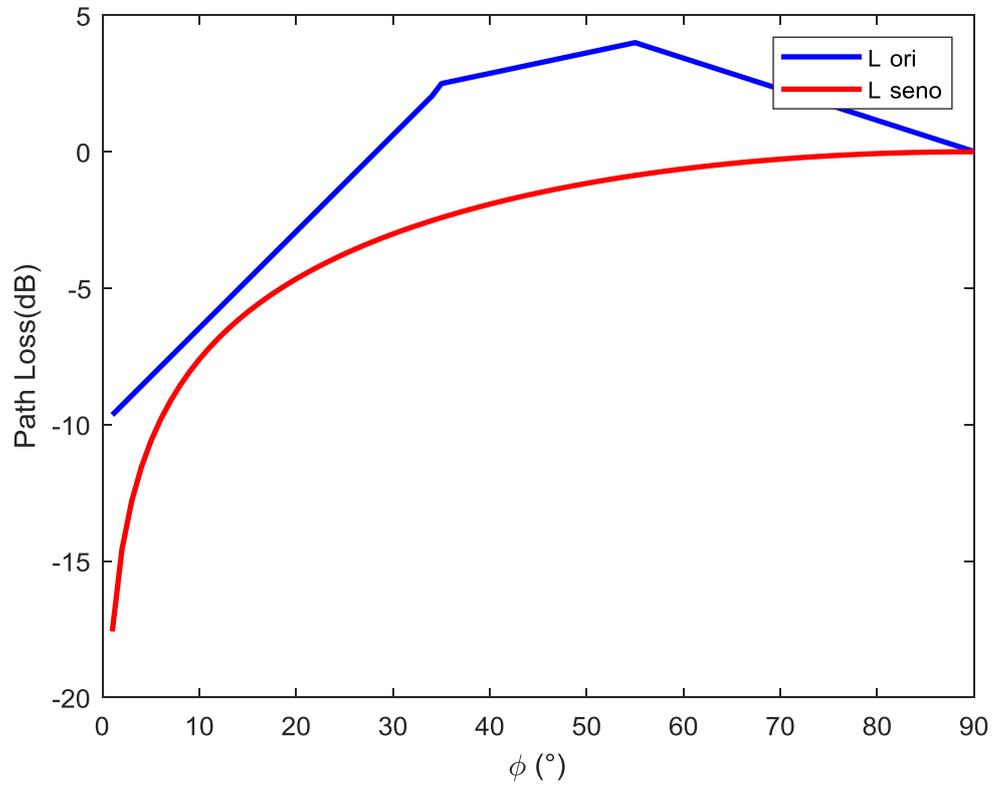


Figura 5. Comparación L_{ori} y la función seno.

Capítulo 3. Campaña de medidas

3.1. Entorno de propagación

El entorno en el que se ha realizado la campaña de medidas es un cultivo de cítricos, en una plantación de limoneros de la empresa FRUCA que se encuentra en el Valle de Carrascoy entre las localidades Alhama de Murcia y Fuente Álamo, en la Región de Murcia [9].

Las plantaciones de cítricos, por norma general, siguen un patrón donde la distancia entre las filas de árboles es mayor que la distancia entre árboles, de manera que forman calles utilizada para fumigar, podar y recolectar la plantación, y en el caso del proyecto, por donde pasará la estación receptora para recopilar los datos. La plantación sobre la que hemos realizado nuestro estudio está estructurada con 7 metros entre filas y 5 metros entre árboles.

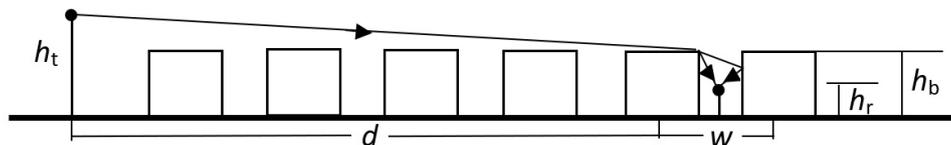


Figura 6. Corte vertical con edificios equiespaciados [6].

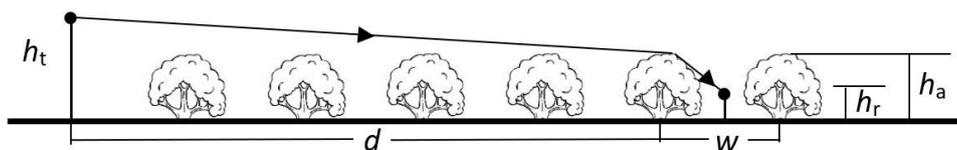


Figura 7. Corte vertical con árboles equiespaciados[6].

La campaña de medidas utilizada en este estudio consta de 23 recorridos, donde cada uno pasa por una fila de la plantación con una longitud de 200 metros[9]. El número de muestras totales es de 2.638 y el número de muestras de media por recorrido es de 114.



Figura 8. Entorno de las medidas [6].

3.2.- Sistema de medidas

El sistema de medidas utilizado para poder caracterizar el canal móvil está compuesto por [9]:

- El analizador de redes modelo VNA ZVK con un rango de 10MHz a 40GHz de la marca Rhode&Schwarz.
Genera una señal que caracteriza el radiocanal.
- El analizador de espectros móvil tipo MS2090A con un rango de 9kHz a 32GHz de la marca Anritsu.
A través del analizador recibe la señal transmitida y facilita la potencia del radiocanal.
- El amplificador ZVE-8G+ con un rango de 2 a 8GHz.
Amplifica la señal generada para poder recepcionar la señal a grandes distancias.
- Fuente de alimentación de banco RS pro.
Alimenta al amplificador.
- 2 antenas ultra-wideband con un rango de 0.8 a 40GHz STEATITE Q-PAR

Implementadas con una frecuencia de 3.5GHz.

- Antena GPS que posee conector SMA, con el objetivo de usar el sistema GPS que integra el analizador de espectros.

Utiliza el GPS para referenciar las medidas tomadas y obtener la latitud y longitud con el formato DEG.

- Ordenador portátil de la marca Asus, modelo TUF Gaming FX505GT-BQ025

Ejecuta un programa implementado en MATLAB que automáticamente ejecuta el procedimiento de la toma de medidas mediante un enlace TCP/IP.

- Teléfono móvil de la marca Samsung, modelo Galaxy S8.

Medirá el intercambio entre el ordenador portátil que ejecuta el programa (MATLAB) y el analizador de espectros portátil.

- Cables, conectores y transiciones.

Unidos siguiendo el esquema de la figura 9.

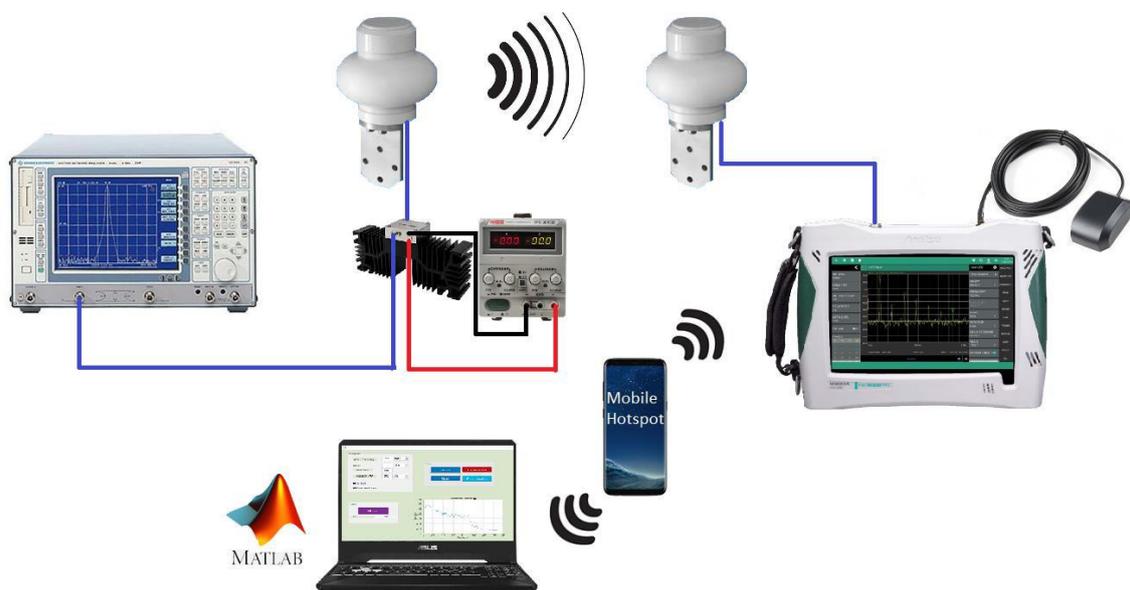


Figura 9. Sistema de medidas utilizado [9].

Para la transmisión [9], el analizador de redes emite un tono con una potencia de 3dBm y con frecuencia de 3.5GHz que es amplificado y emitido mediante polarización vertical con una antena ubicada en un mástil con una altura $h_t = 4.2m$, se observa en la figura 10 y 11.

Para la recepción, el sistema receptor se ubica en el interior de un automóvil con la estación receptora a $h_r = 1.7\text{m}$, como se puede ver en las figuras 12 y 14. A través del programa desarrollado, obtenemos para cada muestra la disposición geográfica, la potencia recibida, el tiempo y altura sobre el nivel del mar.



Figura 10. Disposición estación transmisora [9].

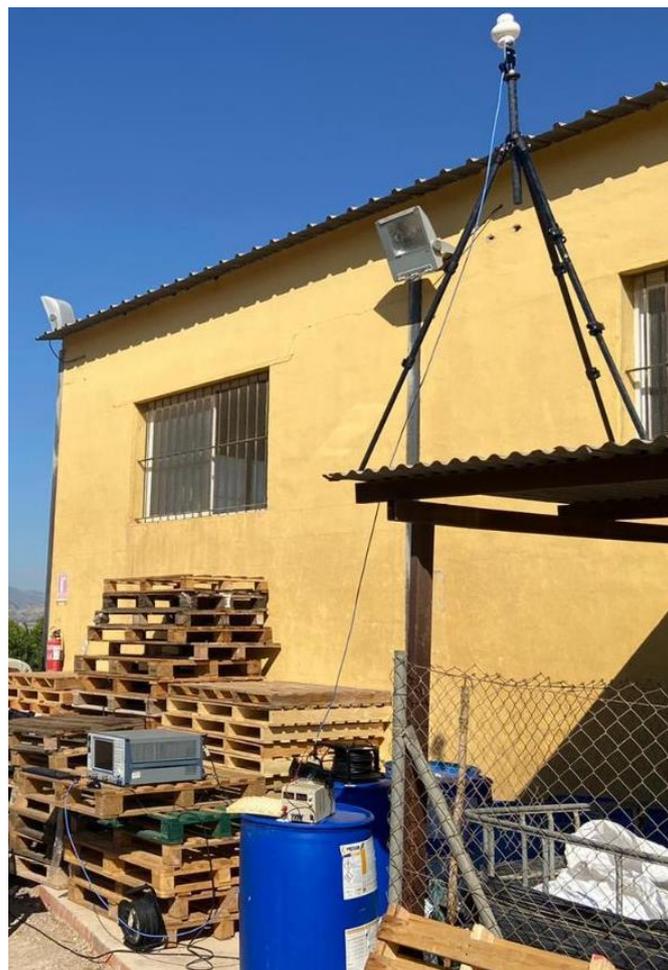


Figura 11. Disposición estación transmisora [9].



Figura 12. Disposición estación receptora: vehículo con antena receptora [9].



Figura 13. Disposición estación receptora: interior del vehículo [9].

3.3. Procedimiento en las medidas

Para llevar a cabo el procesado de las medidas se llevó a cabo en varios pasos[9]:

- **Convertir las coordenadas geográficas decimales a UMT.**

Los datos recogidos por el analizador de espectros se encuentran en formato de coordenadas decimales, que no son los idóneos para el cálculo de las distancias. A través de la función de MATLAB “deg2utm” cambiamos al formato de coordenadas geográficas UMT (Universal Transverse Mercator) donde los datos se expresan en metros sobre el nivel del mar.

El código de MATLAB tiene como entrada un array de latitudes y otro array de longitudes, cada par de latitud-longitud corresponde a una posición geográfica. La salida del programa es dos arrays “X” e “Y” que indican la posición geográfica, pero en el formato UTM.

- **Representar gráficas y calcular parámetros.**

Mediante un script de MATLAB se carga el fichero de las medidas, se implementa la función “deg2utm” para convertir las coordenadas geográficas decimales a UTM, realiza un cálculo de las distancias entre transmisor y receptor dando lugar a una matriz de distancias. Para representar la potencia recibida con respecto a la distancia se genera una matriz de las potencias recibidas. Y, por último, representa la recta de regresión lineal de las medidas.

Se emplea un script similar para el desarrollo de las gráficas encontradas en el Capítulo 4. Resultados.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Parámetros para el análisis

La utilización de los modelos empíricos acompañados de campañas de medidas en el entorno de propagación es importante para la caracterización del canal radio [10]. Por lo que la utilización del ajuste del modelo de propagación de distancia logarítmica es recomendada para que el modelo teórico se ajuste a los resultados experimentales.

Los parámetros utilizados para el análisis de los resultados son:

- Error medio (ME)

Con el promedio de los errores cometidos por el modelo aplicado respecto a las medidas podemos comprobar el ajuste entre ellos.

$$ME(dB) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{Pi} - L_{mi}) \quad (16)$$

Siendo:

- n es el número de muestras.
- L_{Pi} son las pérdidas de trayectoria del modelo de la muestra i.
- L_{mi} son las pérdidas de trayectoria de las medidas de la muestra i.
-

- Error cuadrático medio (RMSE)

Es la raíz cuadrada de las sumas de errores medios al cuadrado.

$$RMSE(dB) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_{Pi} - L_{mi})^2} \quad (17)$$

- Desviación estándar

Indica la variación de los datos con respecto a la media.

$$Std(dB) = \sqrt{RMSE - (ME)^2} \quad (18)$$

Otro recurso utilizado para el análisis de los resultados es la recta de regresión [6]. Gráficamente se representa las rectas de regresión de las pérdidas medidas y las pérdidas de los modelos aplicados. Se aplica el método de ajuste FI (“Floating Intercept”) [6].

$$L_{FI}(dB) = \alpha + \beta 10 \log_{10}(d) + \chi_{\sigma} \quad (19)$$

Siendo:

- Los parámetros de ajuste α (dB) y β (pendiente)
- d distancia en metros entre el transmisor y receptor.
- χ_σ variable aleatoria gaussiana de media cero y desviación estándar σ en dB.

4.2. Pérdidas con la distancia (ángulo con la calle igual a 90 grados)

En la figura 14 se muestran las pérdidas de propagación de las medidas, junto con sus rectas de regresión obtenidas con la ecuación (19) de las pérdidas medidas y estimadas con los modelos de Walfisch-Bertoni y el modelo COST 231, asumiendo el ángulo ϕ es igual a 90° . El código implementado para obtener la gráfica se encuentra en el Anexo I.

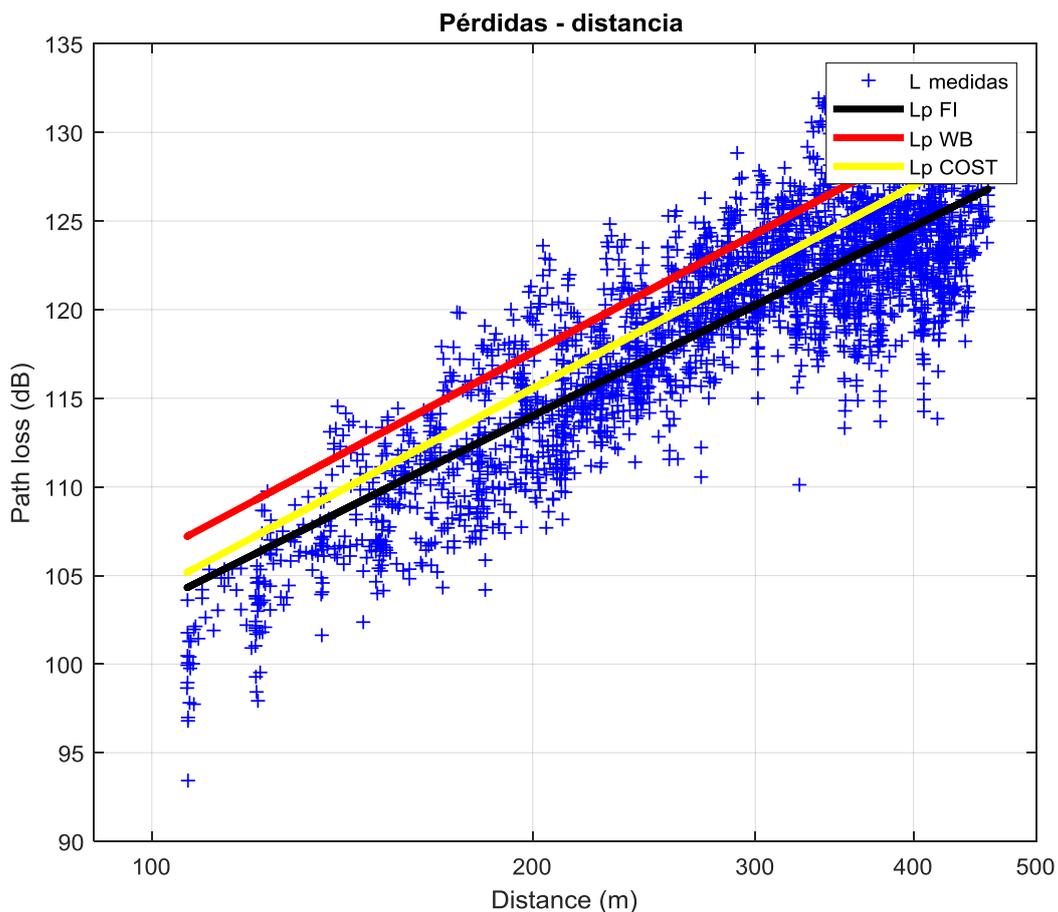


Figura 14. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

Los parámetros de las rectas de regresión mostradas en la figura son:

	α	β	$\sigma(dB)$
Regresión medidas	32.33	3.55	3.16
Walfisch-Bertoni	30.15	3.80	$7.30 * 10^{-14}$
COST 231	28.11	3.80	$2.36 * 10^{-14}$

Tabla 1. Pendientes y desviación estándar.

Como se observa en la Tabla 1, la pendiente β de la recta de regresión de las medidas está en torno a 3.5, y los modelos de propagación Walfisch-Bertoni y COST231 predicen una pendiente de 3.8, por lo que tienen aplicación también en entornos de plantaciones de cítricos.

Los errores respecto a las medidas son:

	Error medio (dB)	Desviación estándar (dB)
Walfisch-Bertoni	3.93	11.04
COST 231	1.89	11.04

Tabla 2. Errores respecto a las medidas.

El error medio es calculado con la ecuación (16) y la desviación estándar con la ecuación (18).

En la Tabla 2 se puede observar que la desviación estándar del error de los valores medidos respecto a los valores estimados por los modelos está en torno a 11.04 dB para ambos modelos de propagación.

4.3. Estudio de la difracción final con el ángulo con la calle

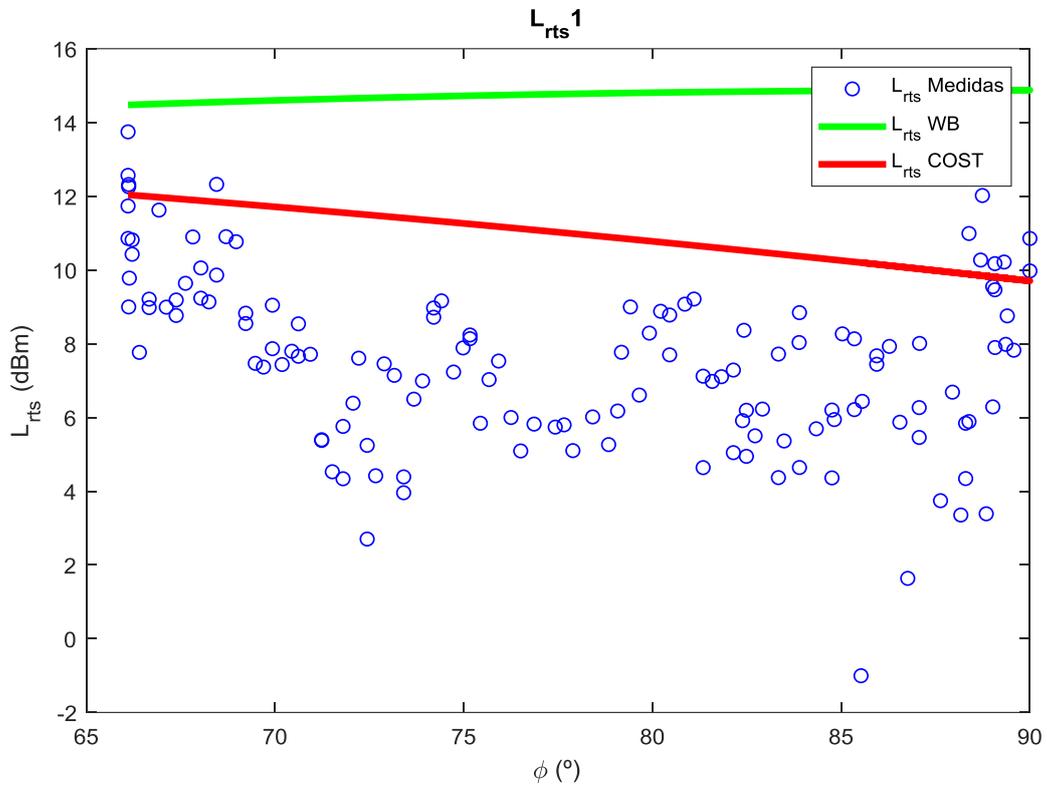


Figura 15. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 1.

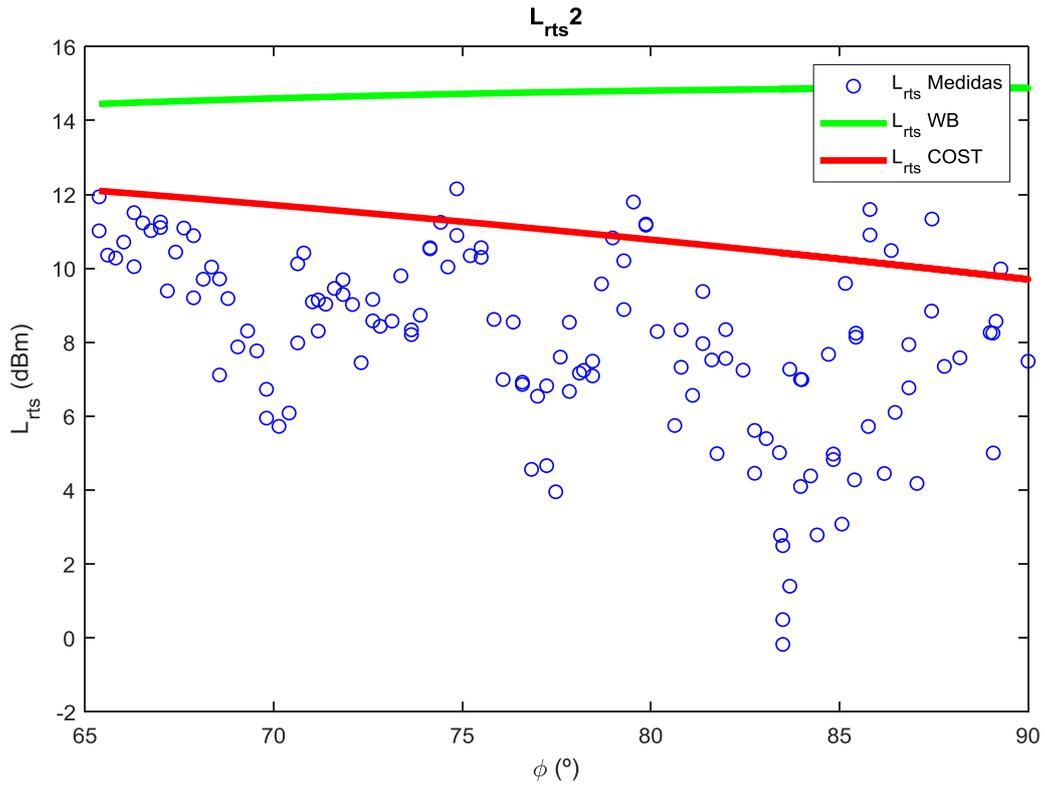


Figura 16. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 2.

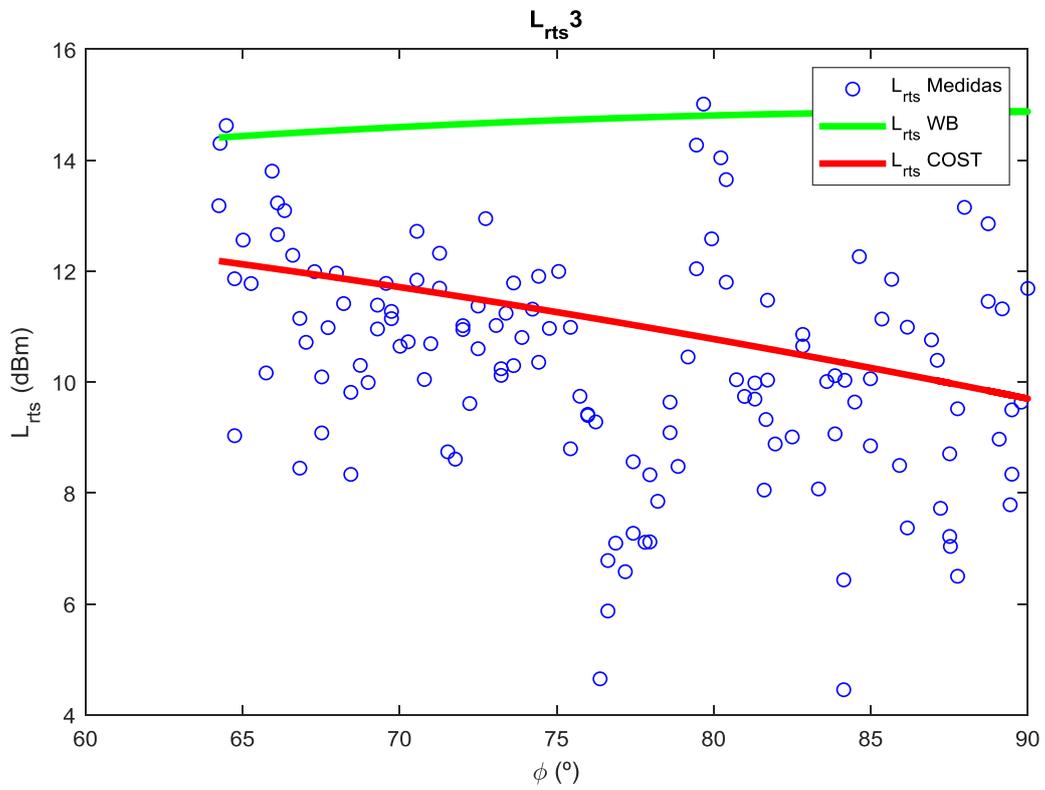


Figura 17. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 3.

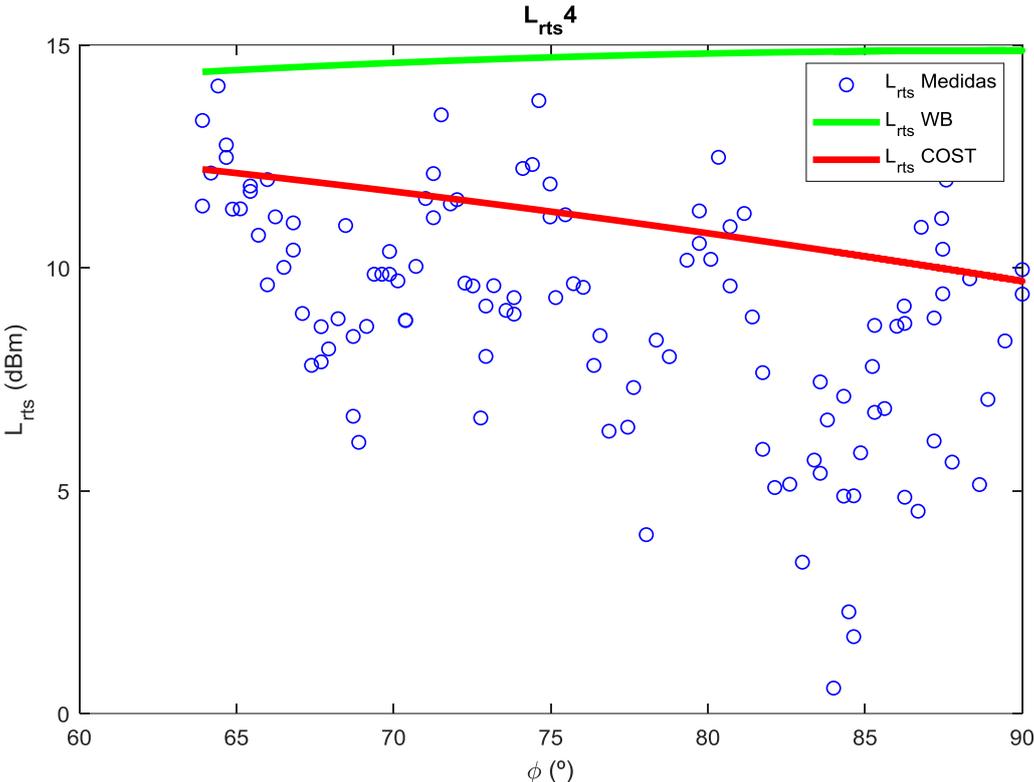


Figura 18. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 4.

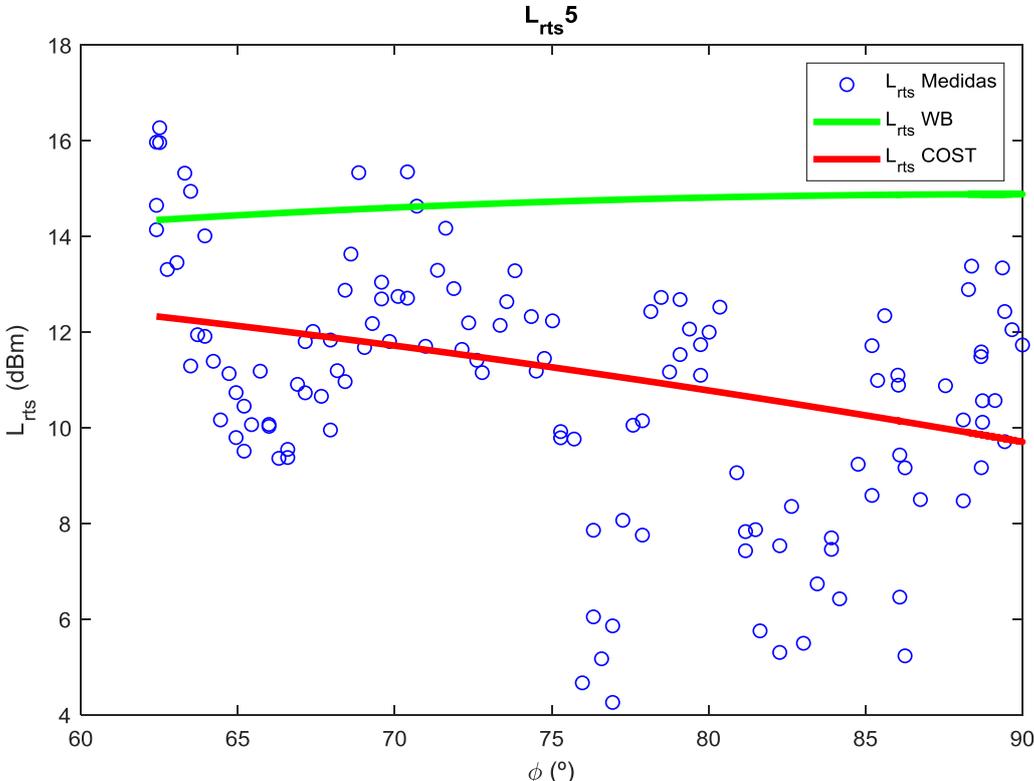


Figura 19. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 5.

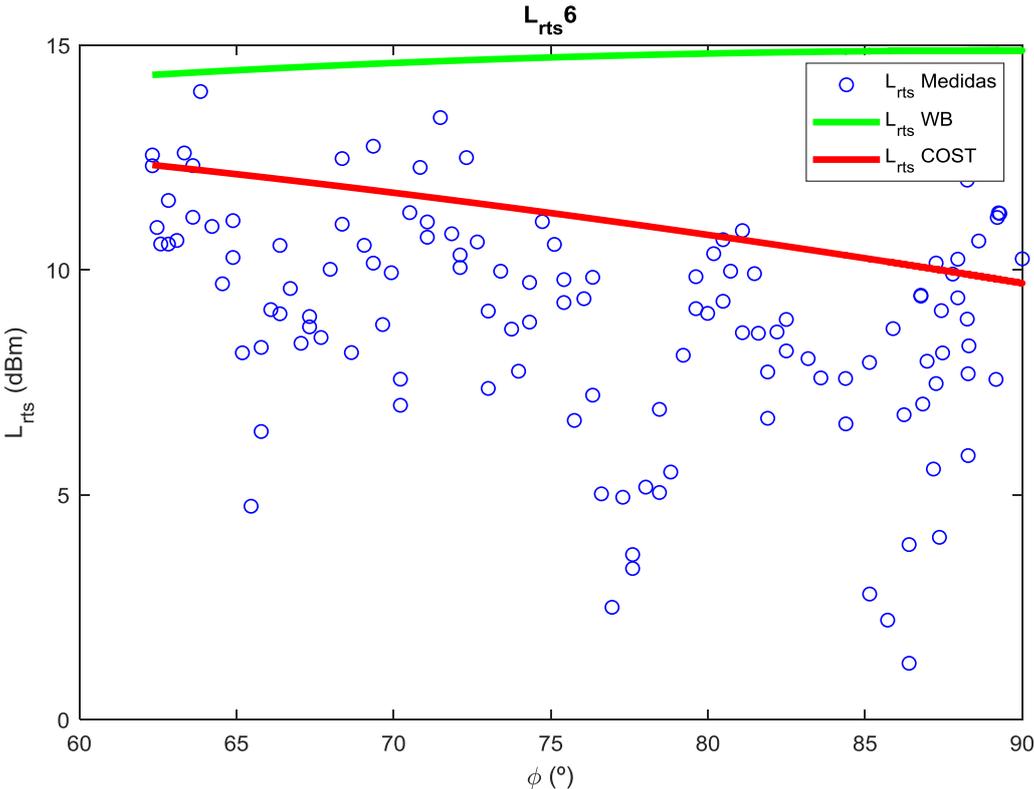


Figura 20. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 6.

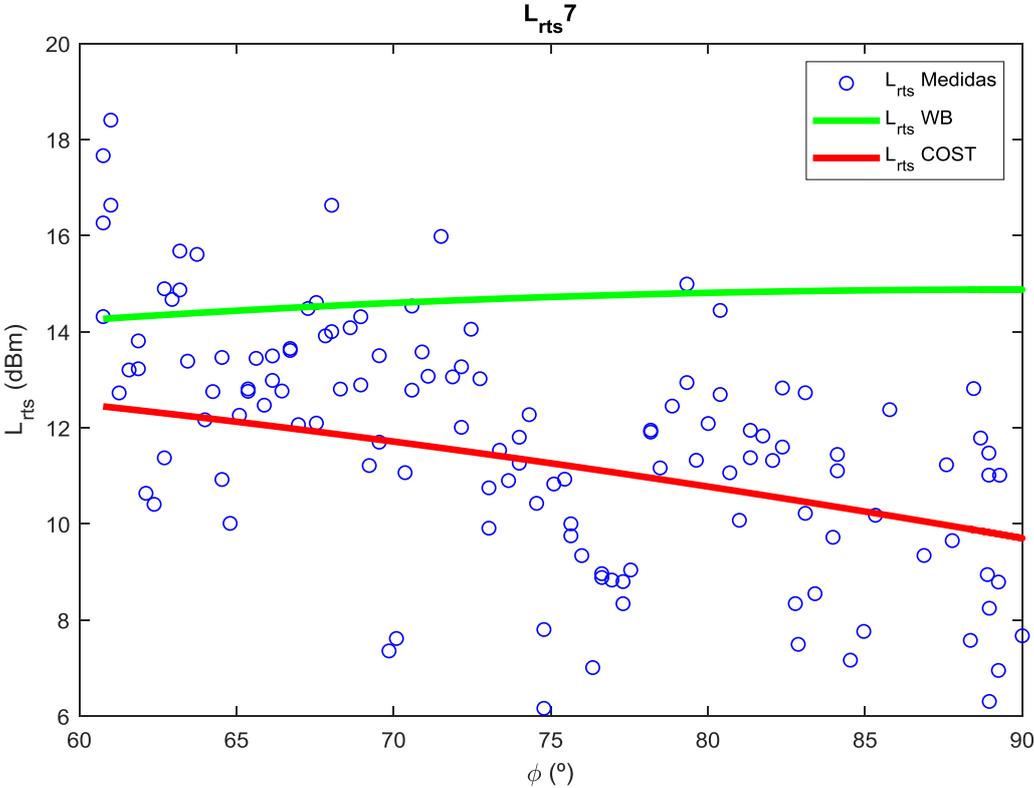


Figura 21. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 7.

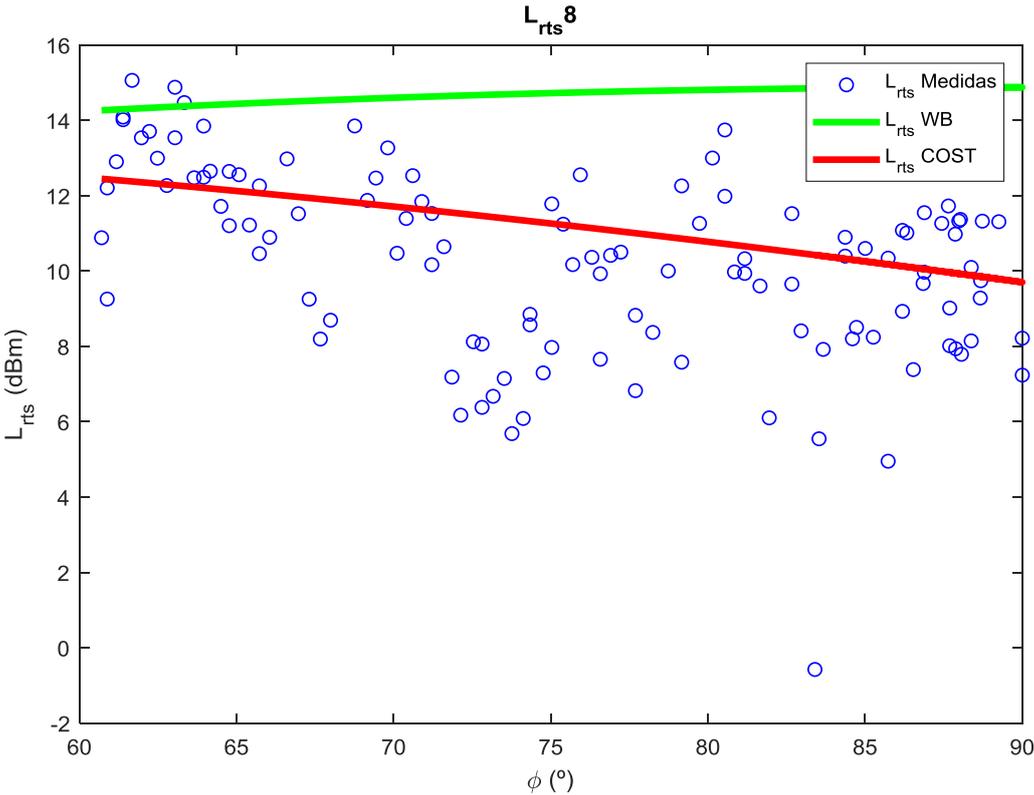


Figura 22. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 8.

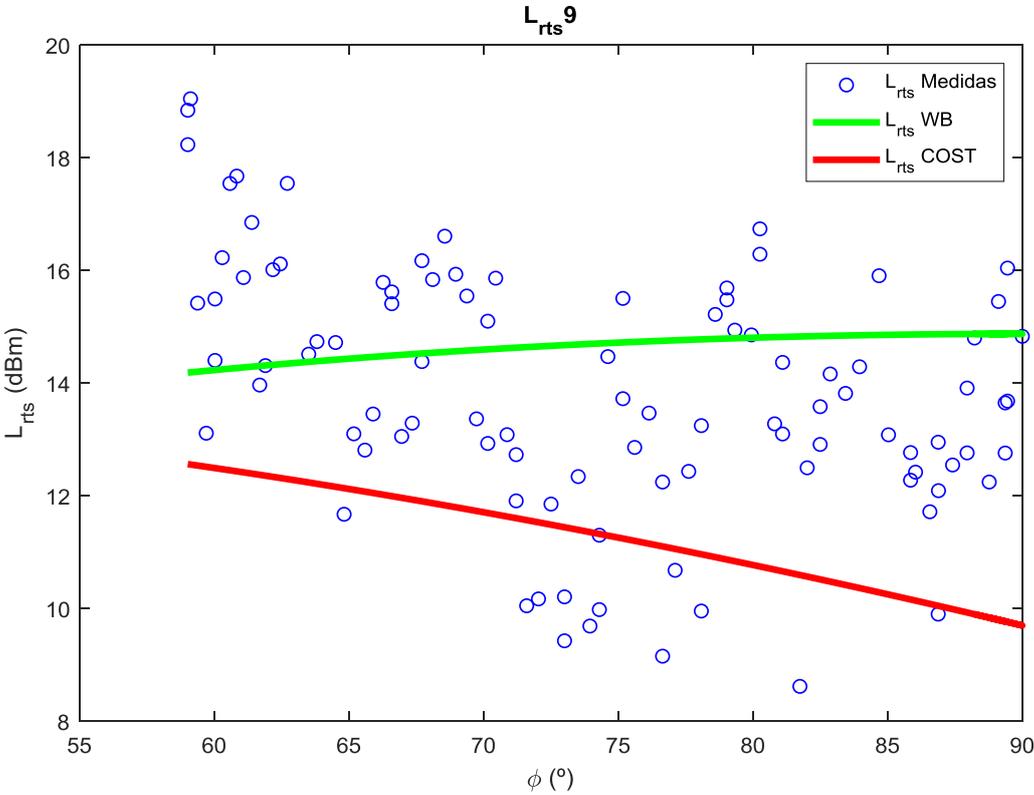


Figura 23. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 9.

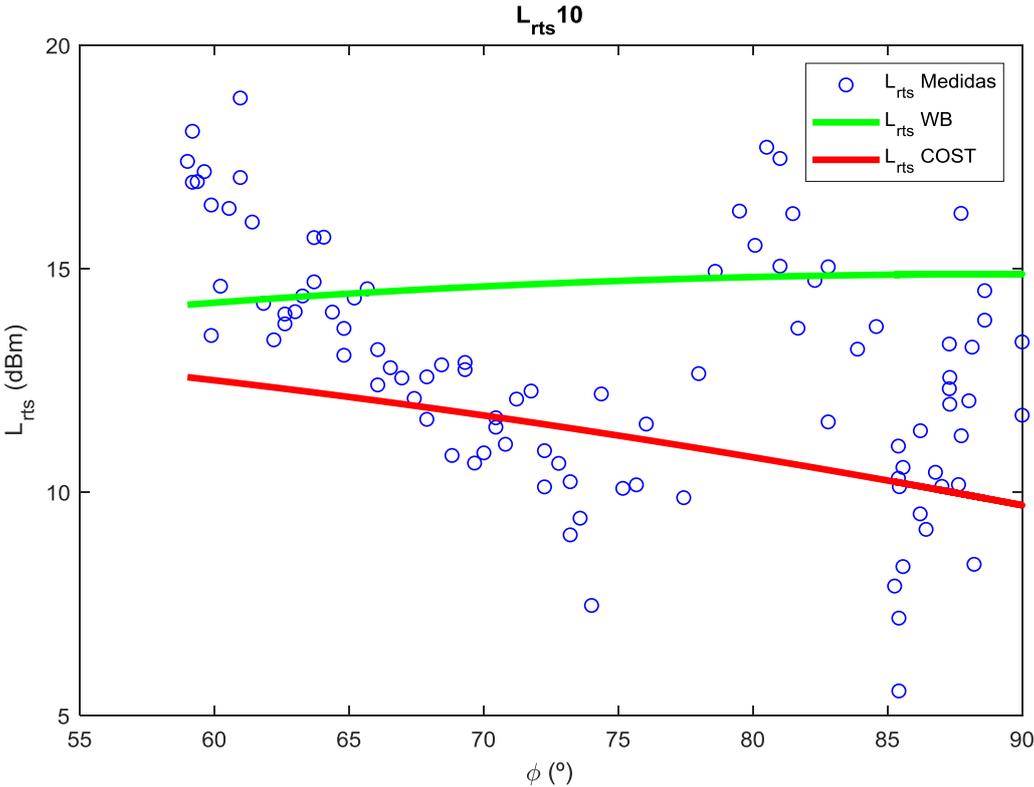


Figura 24. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 10.

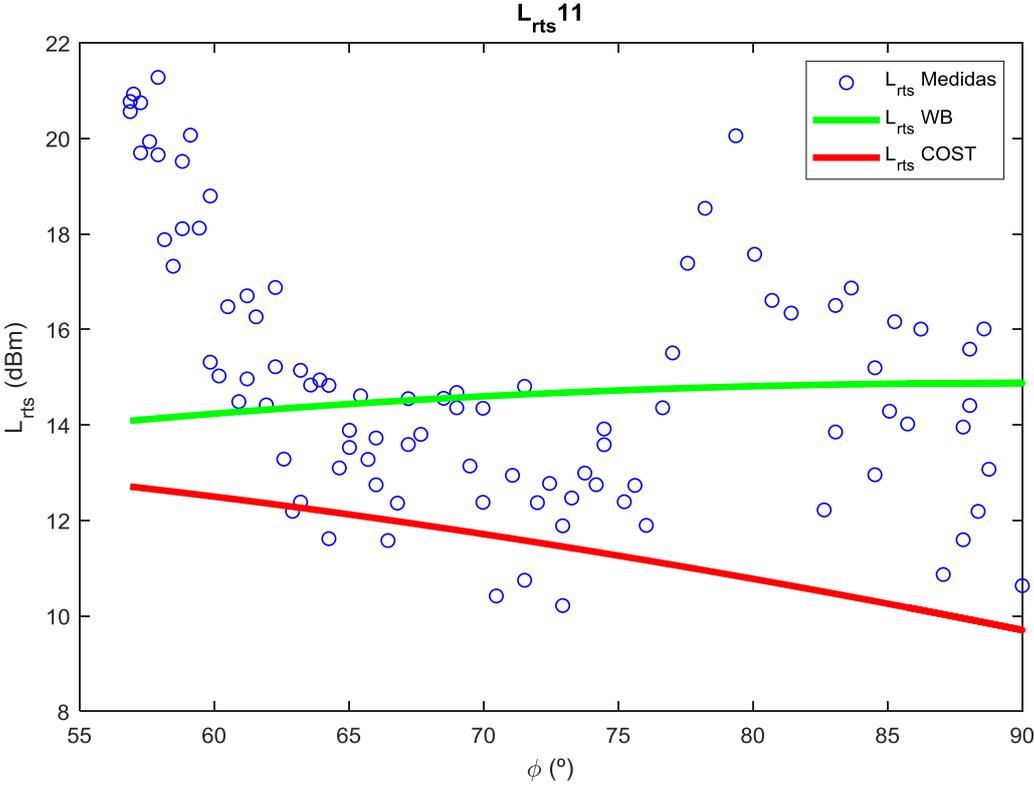


Figura 25. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 11.

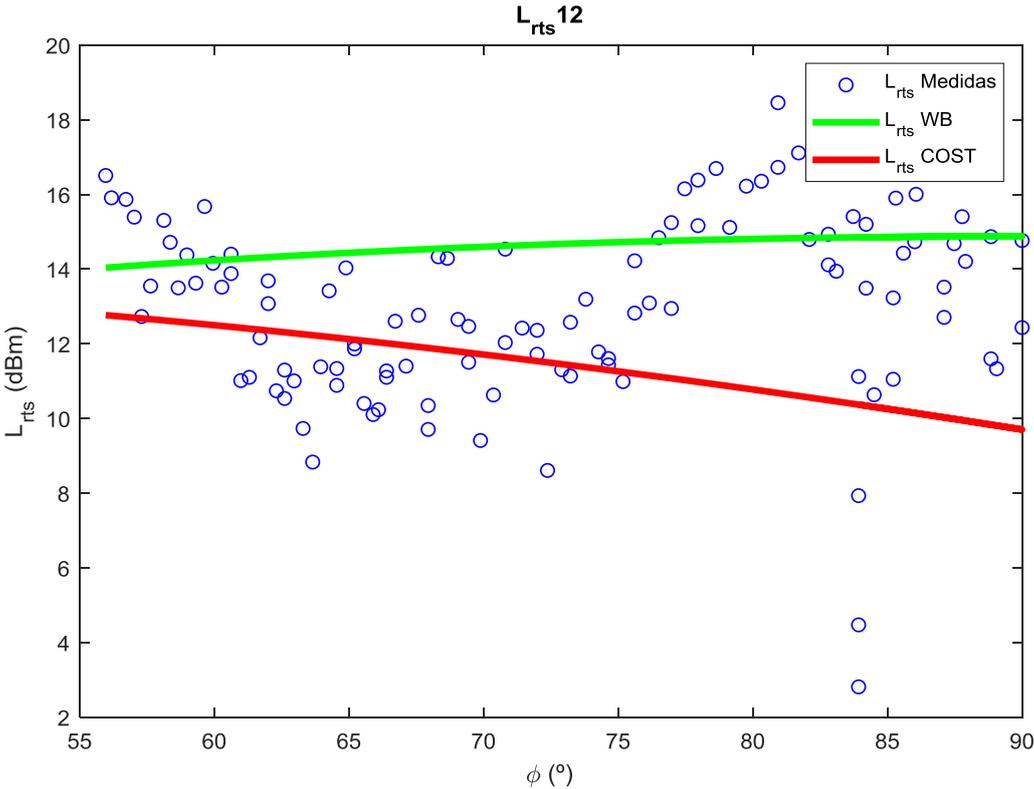


Figura 26. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 12.

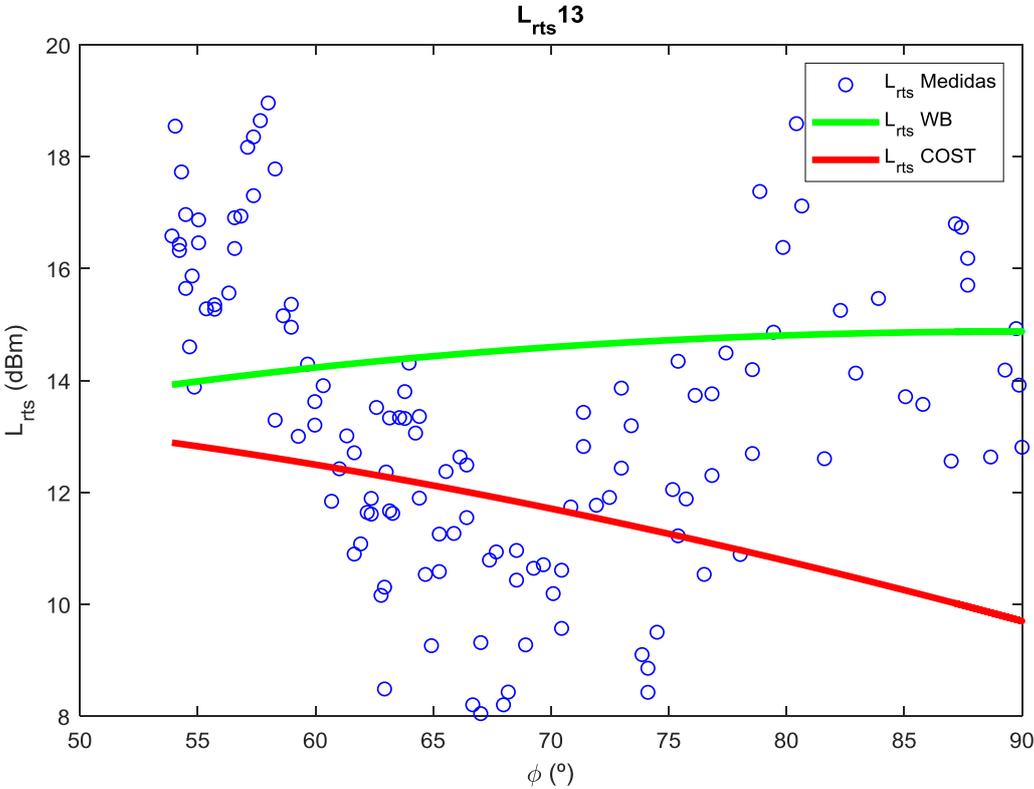


Figura 27. Pérdidas según el ángulo φ en la fila 13.

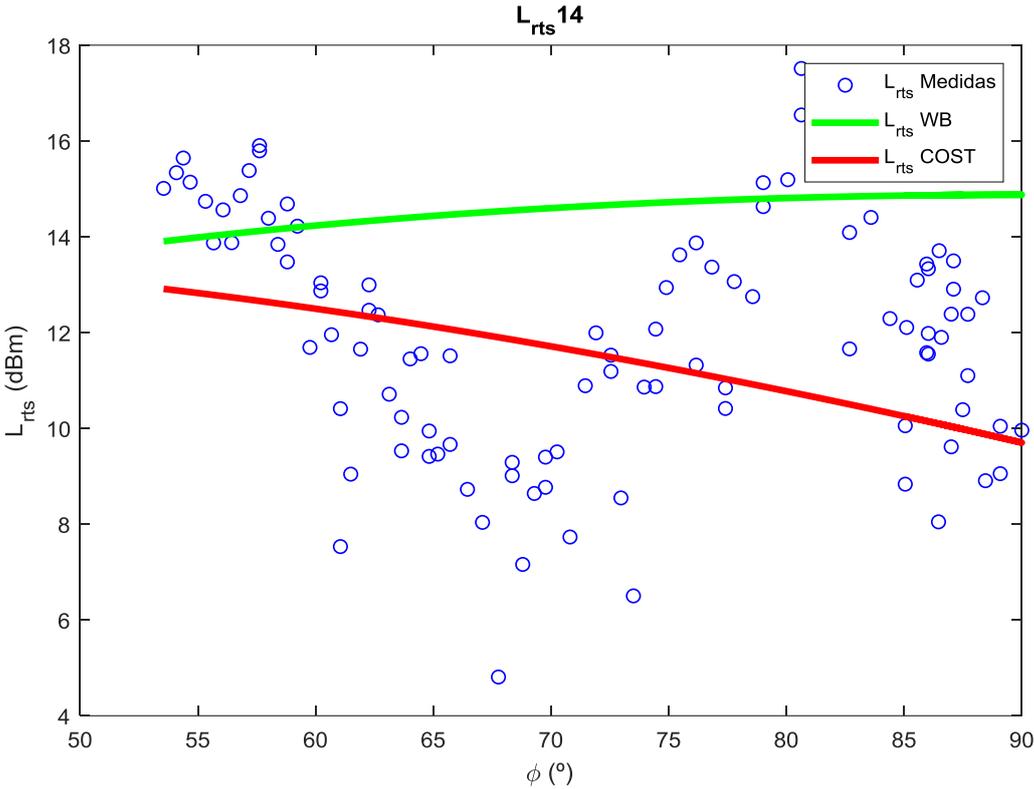


Figura 28. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 14.

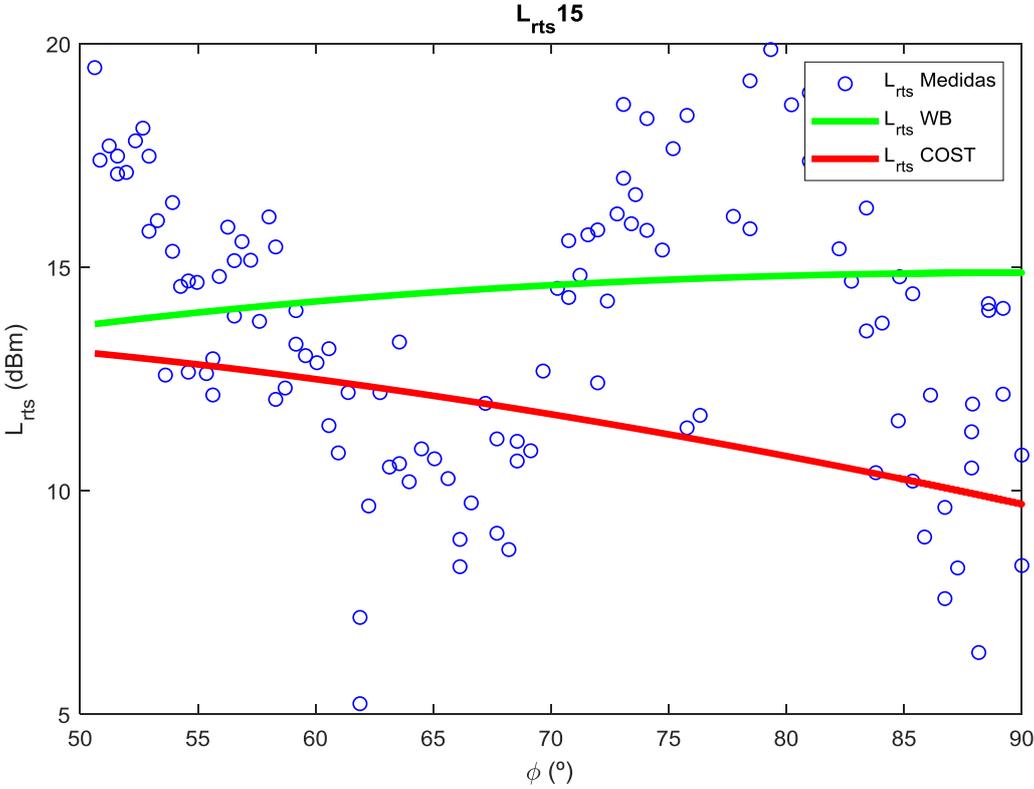


Figura 29. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 15.

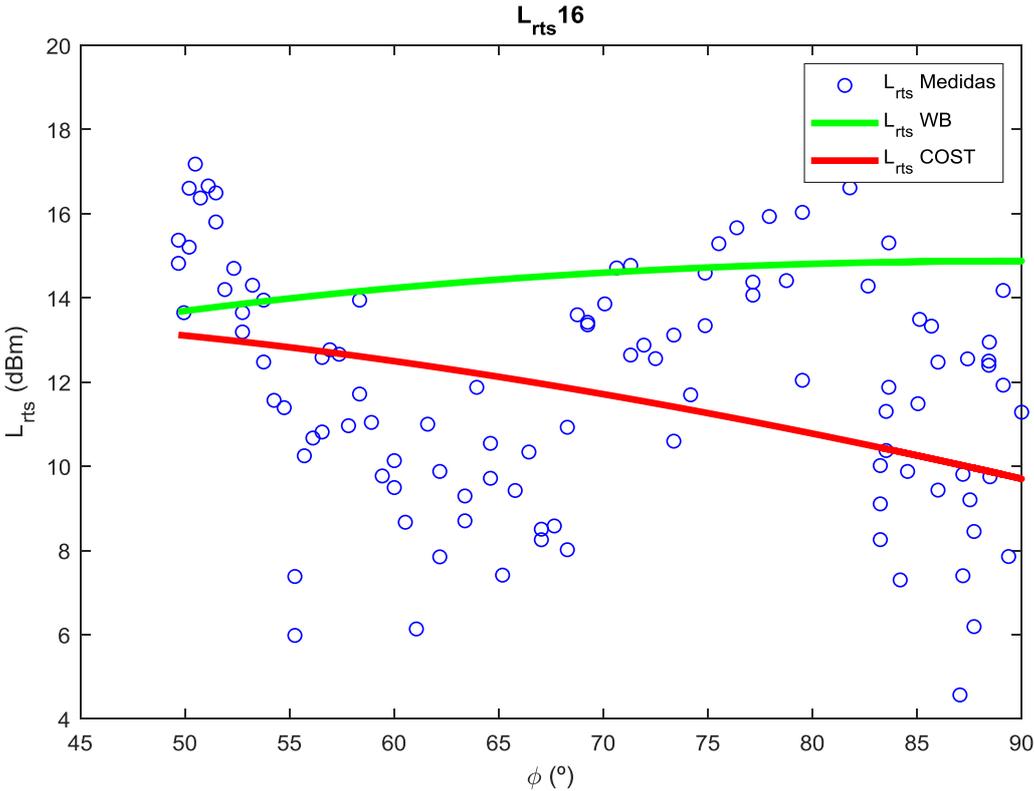


Figura 30. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 16.

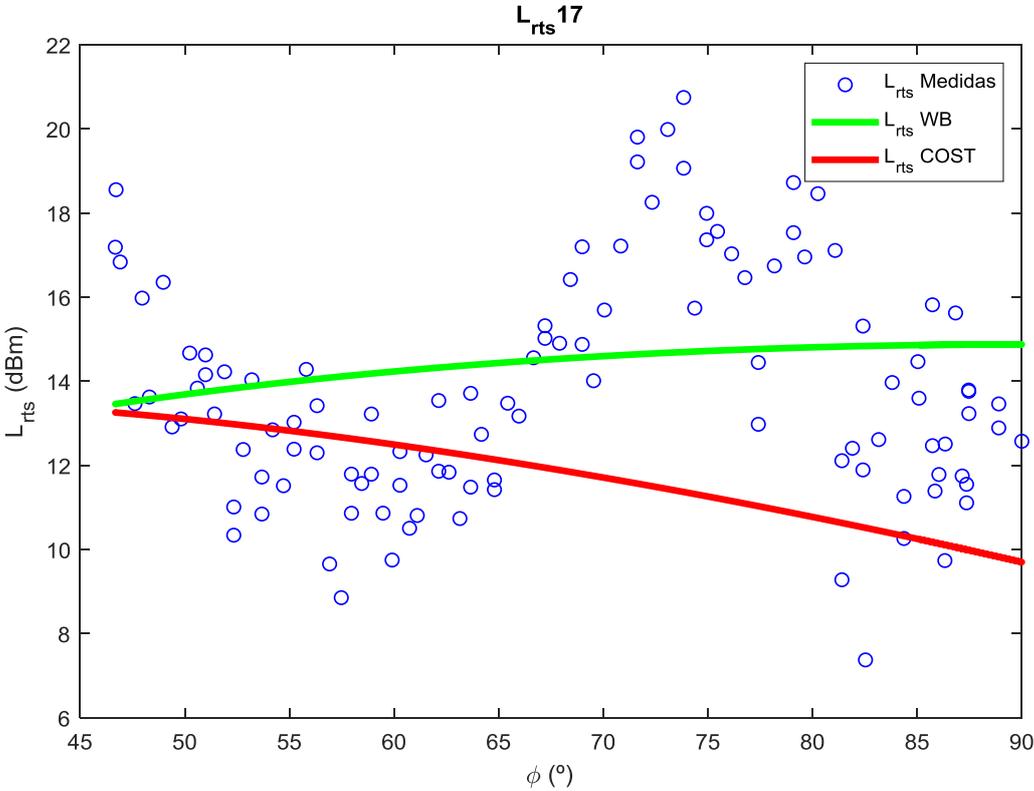


Figura 31. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 17.

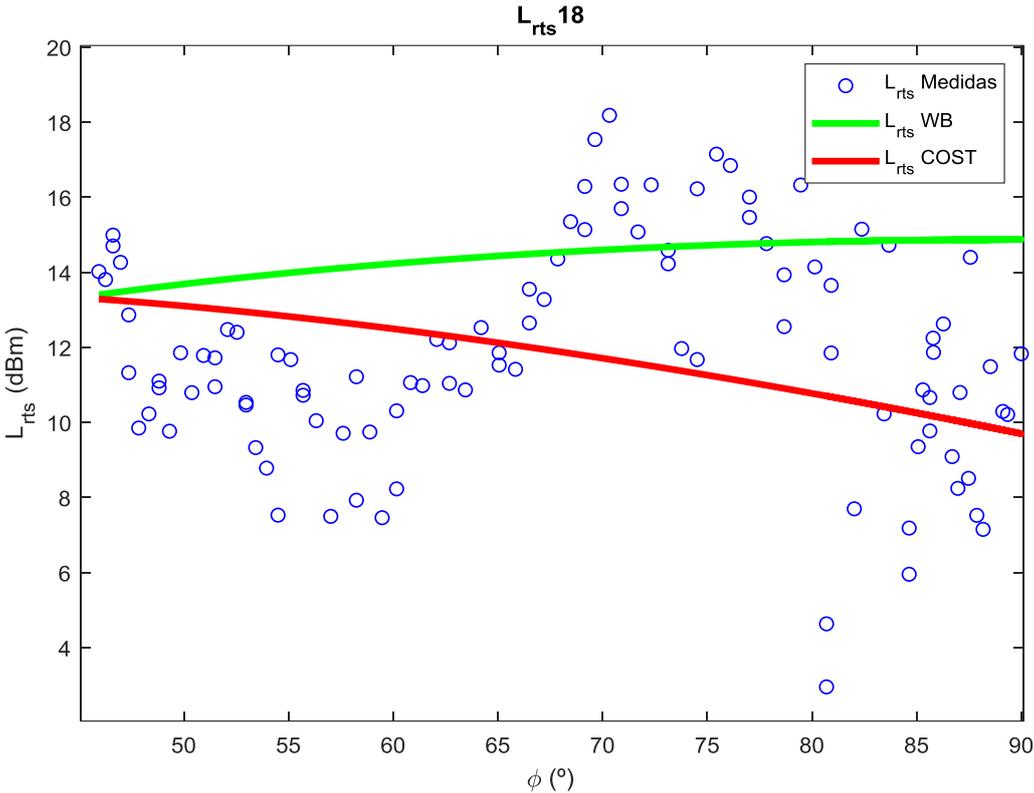


Figura 32. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 18.

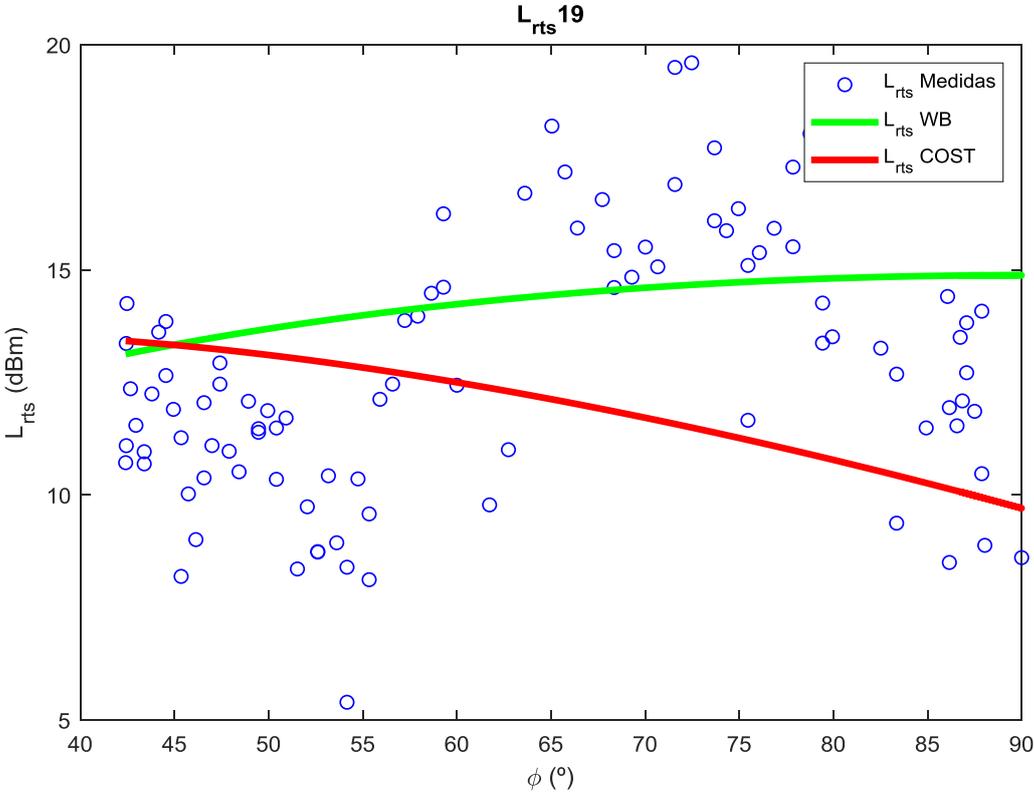


Figura 33. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 19.

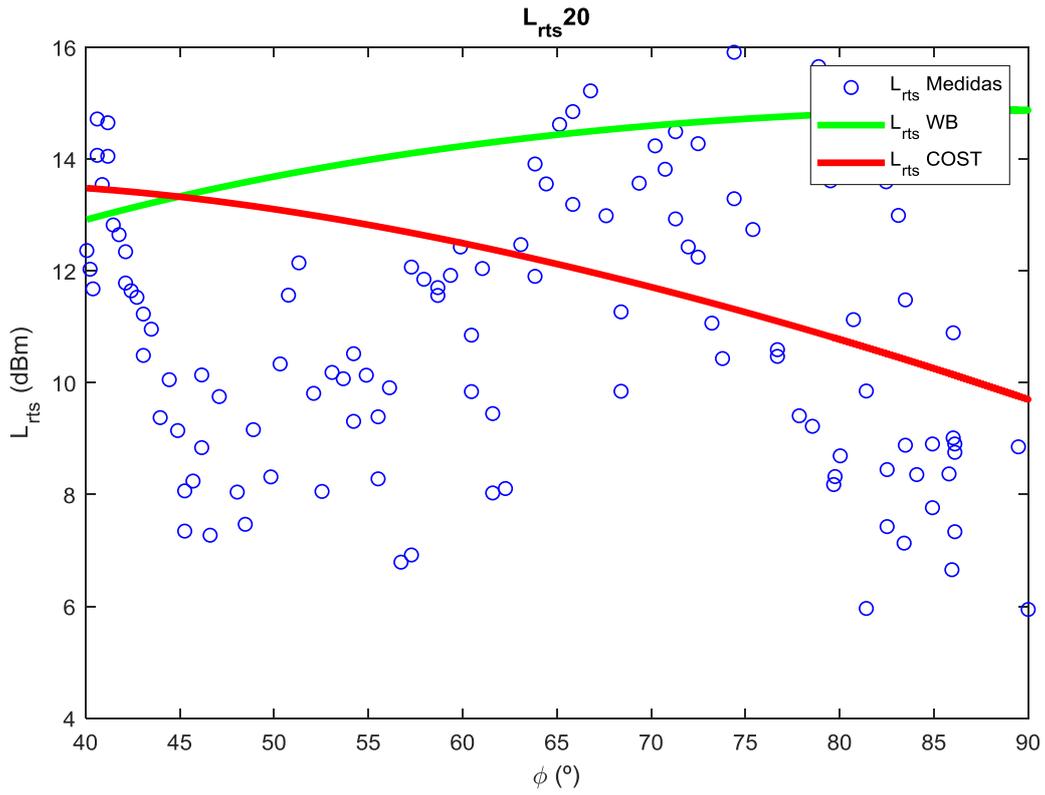


Figura 34. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 20.

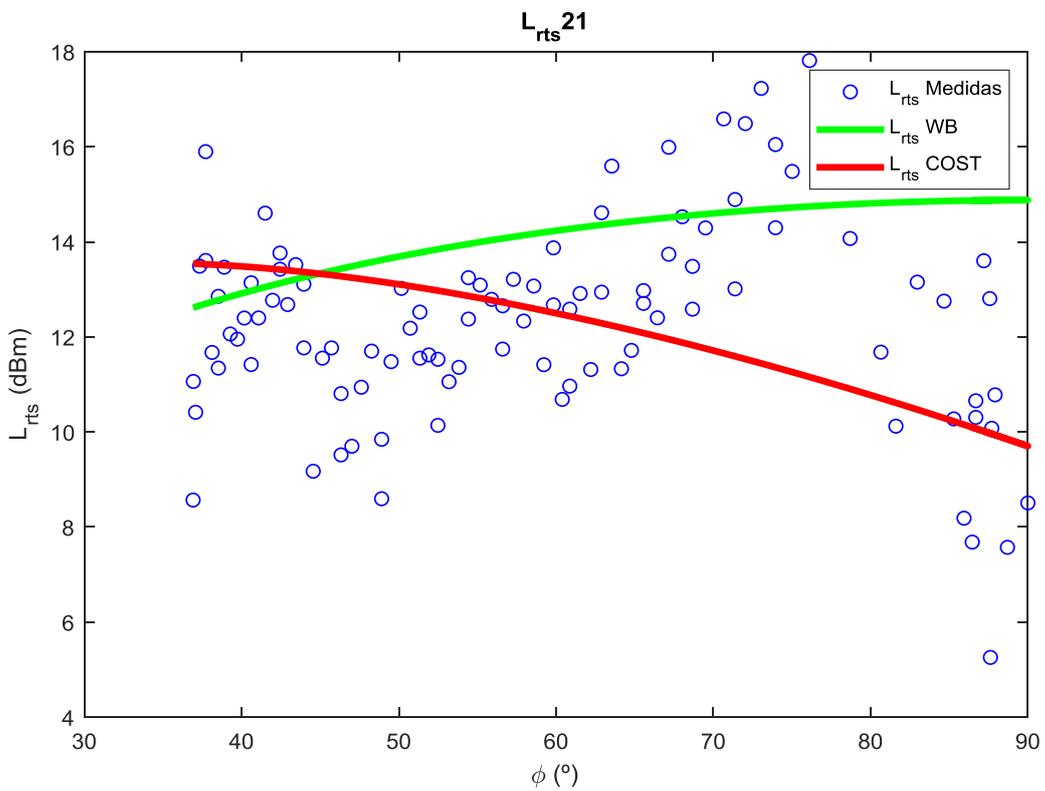


Figura 35. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 21.

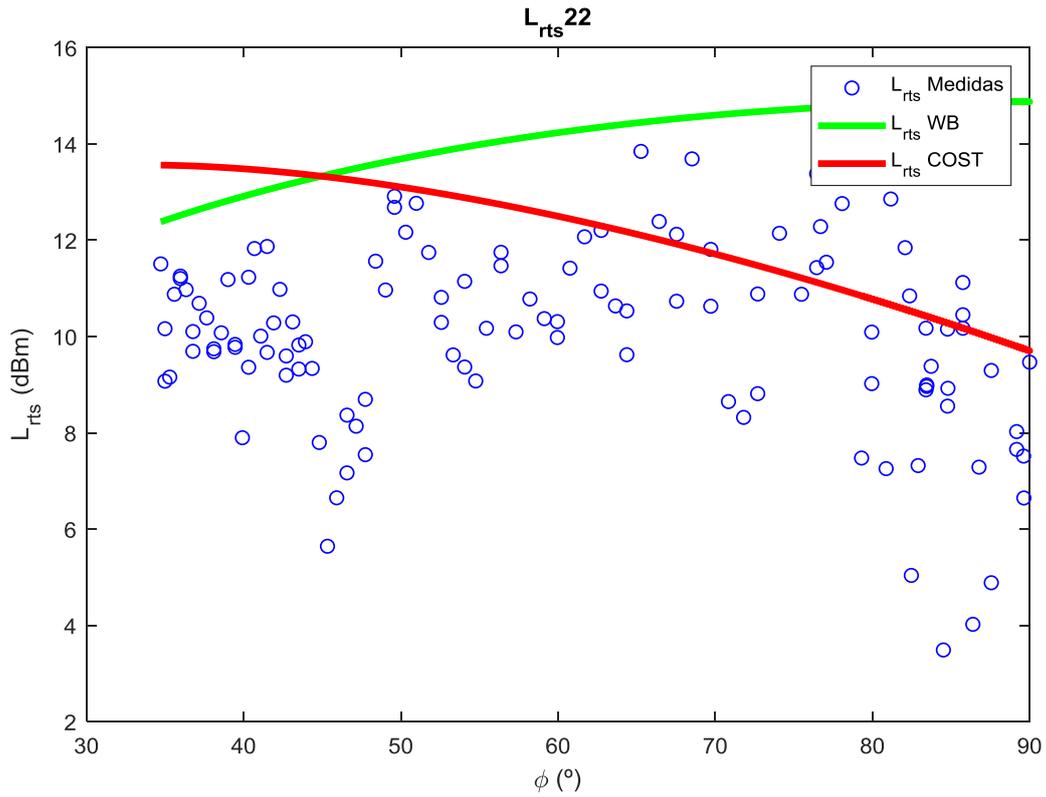


Figura 36. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 22.

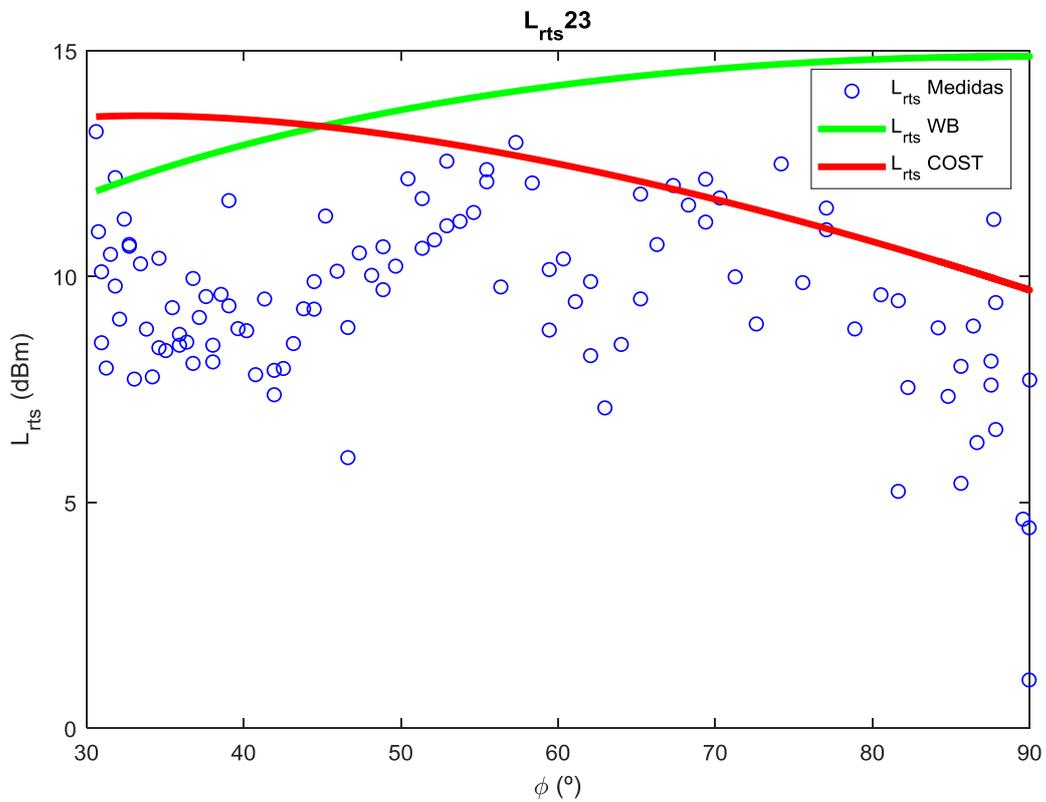


Figura 37. Pérdidas según el ángulo ϕ en la fila 23.

Error medio	Walfisch-Bertoni	COST 231
Fila 1	-10.1552	-3.3684
Fila 2	-6.7205	-2.9811
Fila 3	-7.4020	-0.7140
Fila 4	-8.6138	-1.9449
Fila 5	-6.8709	-0.3572
Fila 6	-8.8194	-2.2029
Fila 7	-5.9289	0.4357
Fila 8	-7.3875	-0.7918
Fila 9	-3.7708	2.6029
Fila 10	-1.8421	1.5622
Fila 11	0.3967	3.3564
Fila 12	-1.6595	1.5098
Fila 13	-1.0905	1.5909
Fila 14	-2.6663	0.4755
Fila 15	-0.8435	1.9252
Fila 16	-2.4689	0.4032
Fila 17	-0.6259	2.0572
Fila 18	-2.4753	0.2132
Fila 19	-1.4738	0.5938
Fila 20	-3.3569	-2.7538
Fila 21	-1.5672	0.1555
Fila 22	-3.8974	-2.0695
Fila 23	-4.1542	-2.9876

Tabla 3. Error medio por fila.

RMS	Walfisch-Bertoni	COST 231
Fila 1	7.5692	4.0778
Fila 2	7.1926	3.7428
Fila 3	4.8749	2.0974
Fila 4	6.2460	3.1466
Fila 5	4.6766	2.3665
Fila 6	6.3426	3.1702
Fila 7	3.8961	2.1290
Fila 8	5.0915	2.4322
Fila 9	2.4212	3.3084
Fila 10	3.3480	2.8778
Fila 11	2.8824	4.2015
Fila 12	2.9683	3.0969
Fila 13	3.0106	3.2358
Fila 14	3.7037	2.6293
Fila 15	3.3485	3.6726
Fila 16	3.9153	3.0218
Fila 17	2.7505	3.6127
Fila 18	3.8420	3.1419
Fila 19	3.0267	3.4108
Fila 20	4.2113	2.8121
Fila 21	2.7234	2.4621
Fila 22	4.4825	3.0110
Fila 23	4.7614	3.5568

Tabla 4. Error cuadrático medio por fila.

STD	Walfisch-Bertoni	COST 231
Fila 1	2.4689	2.2983
Fila 2	2.5628	2.2631
Fila 3	2.0944	1.9721
Fila 4	2.7382	2.4735
Fila 5	2.6241	2.3394
Fila 6	2.5226	2.2798
Fila 7	2.5692	2.0839
Fila 8	2.5831	2.2997
Fila 9	2.2952	2.0423
Fila 10	2.7957	2.4168
Fila 11	2.8549	2.5272
Fila 12	2.4611	2.7039
Fila 13	2.8061	2.8176
Fila 14	2.5706	2.5860
Fila 15	3.2405	3.1276
Fila 16	3.0387	2.9948
Fila 17	2.6783	2.9697
Fila 18	2.9384	3.1346
Fila 19	2.6437	3.3587
Fila 20	2.5428	2.5209
Fila 21	2.2273	2.4572
Fila 22	2.2143	2.1871
Fila 23	2.3265	1.9300

Tabla 5. Desviación estándar por fila.

Como puede observarse en las Tablas 4 y 5, el error cuadrático medio y la desviación estándar del error es menor, en la gran mayoría de los casos, para el modelo COST231 respecto al modelo Walfisch-Bertoni.

El código implementado para obtener las gráficas se encuentra en el Anexo II.

4.4. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

En la figura 38 se muestran las pérdidas de propagación de las medidas, junto con sus rectas de regresión obtenidas con la ecuación (19) de las pérdidas medidas y estimadas con los modelos de Walfisch-Bertoni y el modelo COST 231, considerando el ángulo con la calle.

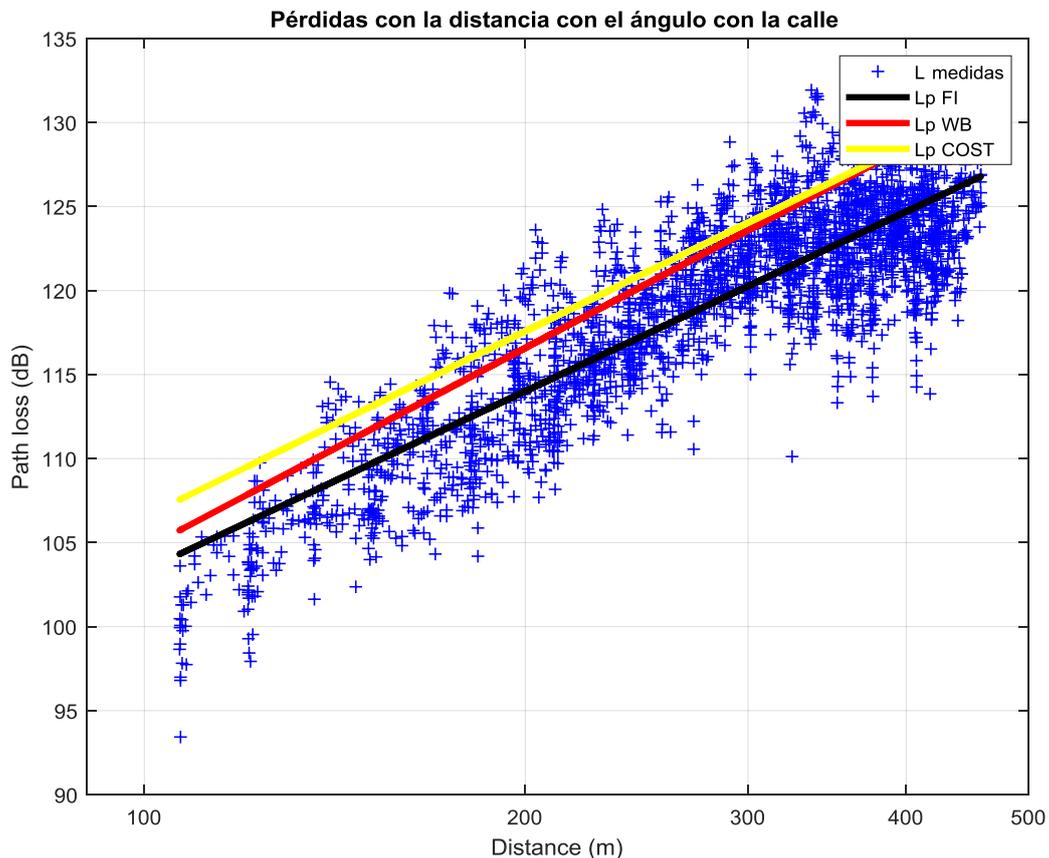


Figura 38. Pérdidas con la distancia con el ángulo de la calle.

Los parámetros de las rectas de regresión mostradas en la figura son:

	α	β	$\sigma(dB)$
Regresión medidas	32.33	3.55	3.16
Walfisch-Bertoni	25.10	3.98	0.93
COST 231	33.15	3.67	1.09

Tabla 6. Pendientes y desviación estándar.

En la Tabla 6, se puede observar cómo, al considerar el ángulo con la calle, las pendientes de los modelos teóricos han variado respecto a los valores obtenidos si se considera el ángulo con la calle de 90 grados (apartado 4.2). Estos valores han pasado de 3.8 (ángulo de 90 grados) a 3.98 (Walfisch-Bertoni) y 3.67 (COST231) si se considera el ángulo de la calle en los cálculos.

Los errores respecto a las medidas son:

	Error medio (dB)	Desviación estándar (dB)
Walfisch-Bertoni	3.17	11.35
COST 231	3.73	10.85

Tabla 7. Errores respecto a las medidas.

El error medio es calculado con la ecuación (16) y la desviación estándar con la ecuación (18).

En la Tabla 7 se puede observar que la desviación estándar del error de los valores medidos respecto a los valores estimados es menor para el modelo del COST231.

Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas

5.1. Conclusiones

Del presente estudio realizado y teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriormente expuestas obtenemos las siguientes conclusiones:

- Cuando el ángulo de la calle es de 90° la pendiente β de la recta de regresión de las medidas está en torno a 3.5, y los modelos de propagación Walfisch-Bertoni y COST231 predicen una pendiente de 3.8, por lo que tienen aplicación también en entornos de plantaciones de cítricos. El error medio es menor en el modelo COST 231.
- En el análisis de la difracción con el ángulo con la calle se estudia el error medio, el error cuadrático medio y la desviación estándar de cada una de las filas. Se ha observado que el modelo COST 231 obtiene un menor error medio en la mayoría de sus filas, al igual que un error medio cuadrático y una desviación estándar menor.
- En las pérdidas con respecto a la distancia considerando el ángulo de la calle se puede observar que las pendientes de los modelos teóricos han pasado de 3.8 (ángulo de 90 grados) a 3.98 (Walfisch-Bertoni) y 3.67 (COST231)
- Con todos los datos obtenidos, el modelo que tiene un mejor ajuste al entorno donde se realizó la campaña de medidas es el del COST 231.

5.2. Futuras líneas

Como futuras líneas se plantean las siguientes:

- Analizar la influencia del tipo de marco de plantación en las pérdidas de propagación mediante el análisis de campañas de medidas en plantaciones de cítricos diferentes.
- Realizar campañas de medidas con el transmisor situado por debajo de la altura media de los árboles y estudiar la aplicación de otros modelos de propagación de entorno urbano que asumen esta situación.

Bibliografía

- [1] H. M. Jawad, R. Nordin, S. K. Gharghan, A. M. Jawad, M. Ismail, and M. J. Abu-Alshaeer, "Power reduction with sleep/wake on redundant data (SWORD) in a wireless sensor network for energy-efficient precision agriculture," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 10, 2018, doi: 10.3390/s18103450.
- [2] B. D. Harper, "Digital Farming: what does it really mean?," *Eur. Agric. Mach.*, vol. 32, no. February, pp. 1–5, 2017, [Online]. Available: http://cema-agri.org/sites/default/files/CEMA_Digital Farming - Agriculture 4.0_ 13 02 2017.pdf.
- [3] UBC Radio Science Lab, "Directory of wireless system planning tools." <https://rsl.ece.ubc.ca/planning.html#MentumPlanet>.
- [4] C. Phillips, D. Sicker, and D. Grunwald, "A survey of wireless path loss prediction and coverage mapping methods," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 15, no. 1, pp. 255–270, 2013, doi: 10.1109/SURV.2012.022412.00172.
- [5] J. Walfisch and H. L. Bertoni, "A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 36, no. 12, pp. 1788–1796, 1988, doi: 10.1109/8.14401.
- [6] L. Juan-Llácer, D. P. Riquelme, M. T. Martínez-inglés, and J. M. M. García-, "propagación para entorno urbano en la estimación de las pérdidas a 3 . 5 GHz en plantaciones de cítricos," no. 1.
- [7] D. J. Cichon, I. B. P. P. Gmbh, T. Kürner, and E. M. Gmbh, "Propagation Prediction Models."
- [8] L. M. Correia, "A view of the COST 231-Bertoni-Ikegami model," *Eur. Conf. Antennas Propagation, EuCAP 2009, Proc.*, pp. 1681–1685, 2009.
- [9] D. Párraga Riquelme, "Desarrollo e Implementación en MATLAB de una herramienta para la realización de medidas del canal de radiocomunicaciones mediante el analizador de espectro portátil MS2090A," 2021.
- [10] S. A.Mawjoud, "Comparison of Propagation Model Accuracy for Long Term Evolution (LTE) Cellular Network," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 79, no. 11, pp. 41–45, 2013, doi: 10.5120/13789-1931.

Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

```

clear all
load('filas19-10.mat');
load('campania19-10.mat');
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
miscalles = {f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13,
f14, f15, f16, f17, f18, f19, f20, f21, f22, f23};
tangente = {f1{122,:}; f2{17,:}; f3{128,:}; f4{16,:}; f5{119,:};
f6{16,:}; f7{120,:}; f8{19,:}; f9{92,:}; f10{14,:}; f11{88,:};
f12{14,:}; f13{123,:}; f14{14,:}; f15{105,:}; f16{15,:}; f17{102,:};
f18{15,:}; f19{89,:}; f20{15,:}; f21{98,:}; f22{15,:}; f23{97,:};};

%Parámetros modelos
h_tx=4.2; % Altura Transmisor
h_rx=1.8; % Altura receptor
h_arbol=2.5; % Altura árbol
w=7.5; % Espacio entre árboles
frecuencia=3.5e9; %frecuencia
lambda=3e8/frecuencia;

%Distancia transmisor-receptor
lat = str2double(campania(:,5));
long = str2double(campania(:,6));
[x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
[z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
z(1:length(x),:) = z;
t(1:length(x),:) = t;
dist = (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
distancia=dist;

for i = 1:length(tangente)
lat_angle = str2double(tangente(:,5));
long_angle = str2double(tangente(:,6));
[j,k,utmzoneang] = deg2utm(lat_angle,long_angle);
[l,m,zoneang] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
l(1:length(j),:) = l;
m(1:length(j),:) = m;
%Distancia del tx con medida de referencia
distantangente = (sqrt((j-l).^2+(k-m).^2)).';
end

for i = 1:length(miscalles)
lat = str2double(miscalles{i}(:,5));
long = str2double(miscalles{i}(:,6));
[x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
[z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
z(1:length(x),:) = z;
t(1:length(x),:) = t;

```

Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

```

dist= (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
pot = str2double(miscalles{i}(:,1));

angle=0*pi/180;
p_angle = angle*180/pi;%en grados angulo incidencia
phi_angle=90-p_angle;
w_angle=w./sin(pi/2-angle);

% Espacio libre
Lo=33.44+20*log10(dist/1000)+20*log10(frecuencia/1e6);

%Difraccion multiple WB
L_WB_msd=68.87-9*log10(frecuencia/1e6)-9*log10(w_angle)-
18*log10(h_tx-h_arbol)+18*log10(dist/1000);

%Difraccion final
L_WB_rts=-
11.8+10*log10(frecuencia/1e6)+5*log10((w_angle/2).^2+(h_arbol-
h_rx)^2)+20*log10(2*(h_arbol-h_rx)./w_angle);

%Pérdidas totales WB
L_WB=Lo+L_WB_msd+L_WB_rts;

% %L_ori
if phi_angle <35
    L_ori=-10+(0.354*phi_angle);
end
if phi_angle >=35 && phi_angle<55
    L_ori=2.5+(0.075*(phi_angle-35));
end
if phi_angle >=55 && phi_angle<=90
    L_ori=4.0-(0.114*(phi_angle-55));
end

%L_CWI_RTS
L_CWI_rts=-16.9-
(10*log10(w))+(10*log10(frecuencia/1e6))+(20*log10(h_arbol-
h_rx))+L_ori;
L_bsh=-18*log10(h_tx-h_arbol+1);
ka = 54;
kd = 18;
kf = -4+(0.7*(((frecuencia/1e6)/925)-1));

%%Difraccion multiple COST
L_CWI_msd=L_bsh+ka+kd*log10(dist/1000)+kf*log10(frecuencia/1e6)-
9*log10(w_angle);

%Perdida total COST
L_CWI_p=Lo+L_CWI_msd+ L_CWI_rts;

DATOS=[dist; L_WB];
DATOS_WB{1,i}=DATOS;

DATOS2=[dist; L_CWI_p];
DATOS_COST{1,i}=DATOS2;

end

```

Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

```
save('WB.mat','DATOS_WB');
save('COST.mat','DATOS_COST');

%PARA MEDIDAS
Gt=-2+29.5; % amplificador y antena
Gr=-2;
Lt=1.5;
Lr=0.5;
Pt=3;
Factor_correc=4;
Pr=str2double((campania(:,1))).';
L_medidas=Pt+Gt-Lt+Gr-Lr-Pr+Factor_correc;
Ldc=L_medidas;

Pr_medida_5m=Pt+Gt-Lt+20*log10(3e8/(3.5e9*5*4*pi))+Gr-
Lt+Factor_correc; %Comprobación Potencia recibida medida distancia
referencia 4 m
PIRE=Pt+Gt-Lt+Gr-Lt;

%Regresión medidas
N1_Medidas=length(distancia);

%Método FI
Dlog=10*log10(distancia);
Pend_FI=polyfit(Dlog,L_medidas,1);
LO_FI=Pend_FI(2);
np_FI=Pend_FI(1);
Lp_FI=LO_FI+np_FI*Dlog;

% Varianza FI
NMSE=(sum((L_medidas-Lp_FI).^2))/N1_Medidas;
std_FI=sqrt(NMSE);

%REGRESIONES
% Walfisch_Bertoni

for i=1:23
    distancia_perdidas=DATOS_WB{i};
    if i == 1 distancia_WB = distancia_perdidas;
    else distancia_WB=horzcat(distancia_WB, distancia_perdidas);
    end
end

%Regresión WB
%Método FI
Dlog=10*log10(distancia_WB(1,:));
Pend_WB=polyfit(Dlog,distancia_WB(2,:),1);
LO_WB=Pend_WB(2);
np_WB=Pend_WB(1);
Lp_WB=LO_WB+np_WB*Dlog;
Lp_WB_error=fliplr(Lp_WB);

%Varianza WB
N1=length(distancia_WB(1,:));
NMSE_WB=(sum((distancia_WB(2,:)-Lp_WB).^2))/N1;
```

Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

```
std_WB=sqrt(NMSE_WB);

%Error WB medidas
error_WB=(distancia_WB(2,:)-Ldc);
error_medio_WB=sum((distancia_WB(2,:)-Ldc))/N1;
std_error_WB=sqrt((sum((error_WB-error_medio_WB).^2))/N1);

% COST
for i=1:23
    distancia_perdidas=DATOS_COST{i};
    if i == 1 distancia_COST = distancia_perdidas;
    else distancia_COST=horzcat(distancia_COST, distancia_perdidas);
    end
end

%Regresión COST

%Método FI
Dlog=10*log10(distancia_COST(1,:));
Pend_COST=polyfit(Dlog,distancia_COST(2,:),1);
LO_COST=Pend_COST(2);
np_COST=Pend_COST(1);
Lp_COST=LO_COST+np_COST*Dlog;

% %Varianza COST
N1=length(distancia_COST(1,:));
NMSE_COST=(sum((distancia_COST(2,:)-Lp_COST).^2))/N1;
std_COST=sqrt(NMSE_COST);

%Error COST medidas
error_COST=(distancia_COST(2,:)-Ldc);
error_medio_COST=sum((distancia_COST(2,:)-Ldc))/N1;
std_error_COST=sqrt((sum((error_COST-error_medio_COST).^2))/N1);

%Gráfica

%Medidas
semilogx(distancia,L_medidas,'b+');
hold on
xlim([90 500])
x=[100 200 300 400 500];
set(gca,'XTick',x)
grid on
hold on
title('Pérdidas - distancia ')
xlabel('Distance (m)')
ylabel('Path loss (dB)')

%Recta de regresión de las medidas
semilogx(distancia,Lp_FI,'k','linewidth',3);

% Recta regresión WB
semilogx(distancia_WB(1,:),Lp_WB,'r','linewidth',3);

% Recta regresión COST
semilogx(distancia_COST(1,:),Lp_COST,'y','linewidth',3);
```

Anexo I. Pérdidas con la distancia (ángulo igual a 90°)

```
%Leyenda  
legend('L {medidas}', 'Lp {FI}', 'Lp {WB}', 'Lp {COST}');  
hold off
```

Anexo II. Difracción final con el ángulo con la calle

```

clear all
load('filas19-10.mat');
load('campania19-10.mat');
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
miscalles = {f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13,
f14, f15, f16, f17, f18, f19, f20, f21, f22, f23};
tangente = {f1{122,:}; f2{17,:}; f3{128,:}; f4{16,:}; f5{119,:};
f6{16,:}; f7{120,:}; f8{19,:}; f9{92,:}; f10{14,:}; f11{88,:};
f12{14,:}; f13{123,:}; f14{14,:}; f15{105,:}; f16{15,:}; f17{102,:};
f18{15,:}; f19{89,:}; f20{15,:}; f21{98,:}; f22{15,:}; f23{97,:};

%Parámetros modelos
h_tx=4.2; % Altura Transmisor
h_rx=1.8; % Altura receptor
h_arbol=2.5; % Altura árbol
w=7.5; % Espacio entre árboles
frecuencia=3.5e9; %frecuencia
lambda=3e8/frecuencia;

%Distancia transmisor-receetor
lat = str2double(campania(:,5));
long = str2double(campania(:,6));
[x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
[z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
z(1:length(x),:) = z;
t(1:length(x),:) = t;
dist = (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
distancia=dist;

for i = 1:length(tangente)
    lat_angle = str2double(tangente(:,5));
    long_angle = str2double(tangente(:,6));
    [j,k,utmzoneang] = deg2utm(lat_angle,long_angle);
    [l,m,zoneang] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
    l(1:length(j),:) = l;
    m(1:length(j),:) = m;
    %Distancia del tx con medida de referencia
    disttangente = (sqrt((j-l).^2+(k-m).^2)).';
end

for i = 1:length(miscalles)
    lat = str2double(miscalles{i}(:,5));
    long = str2double(miscalles{i}(:,6));
    [x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
    [z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
    z(1:length(x),:) = z;
    t(1:length(x),:) = t;
    dist= (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
    pot = str2double(miscalles{i}(:,1));
    angle = acos (disttangente(i) ./ dist);%en radianes
    angle_test = angle;

```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
angle=abs(angle);

for r = 1:length(angle)
    if imag(angle(r)) ~= 0
        angle(r) = NaN;
        pot (r) = NaN;
    end
end

p_angle = angle*180/pi;%en grados angulo incidencia
phi_angle=90-p_angle;
w_angle=w./sin(pi/2-angle);

%PARA MEDIDAS

Gt=-2+29.5; % amplificador y antena
Gr=-2;
Lt=1.5;
Lr=0.5;
Pt=3;
Factor_correc=4;
Pr=str2double((miscalles{i}(:,1))).';

L_medidas=Pt+Gt-Lt+Gr-Lr-Pr+Factor_correc;

Ldc=L_medidas;

% Espacio libre
Lo=33.44+20*log10(dist/1000)+20*log10(frecuencia/1e6);

%Difraccion multiple
L_WB_msd=68.87-9*log10(frecuencia/1e6)-9*log10(w_angle)-
18*log10(h_tx-h_arbol)+18*log10(dist/1000);

%difraccion final
L_WB_rts=-
8.8+10*log10(frecuencia/1e6)+5*log10((w_angle/2).^2+(h_arbol-
h_rx)^2)+20*log10(2*(h_arbol-h_rx)./w_angle);

%Medidas: perdidas difraccion final WB
L_medidas_rts = L_medidas- L_WB_msd - Lo;

%L_WB= Lo+L_WB_msd+L_WB_rts-10;
L_WB=Lo+L_WB_msd+L_WB_rts;

%L_ori
if (phi_angle >0) | (phi_angle<35)
    L_ori=-10+(0.354*phi_angle);
end
if (phi_angle >=35) | (phi_angle<55)
    L_ori=2.5+(0.075*(phi_angle-35));
end
if (phi_angle >=55) | (phi_angle<=90)
    L_ori=4.0-(0.114*(phi_angle-55));
end
```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
%L_CWI_RTS

    L_CWI_rts=-16.9-
(10*log10(w_angle))+ (10*log10(frecuencia/1e6))+ (20*log10(h_arbol-
h_rx))+L_ori;

%Error RMS WB

Error_HP_WB=L_medidas_rts- L_WB_rts;
eval(['Error_HP_WB' num2str(i) ' =Error_HP_WB;']);

Mean_error_HP_WB=mean(Error_HP_WB);
eval(['Mean_error_HP_WB' num2str(i) ' =Mean_error_HP_WB;']);

RMS_HP_WB=rms(L_medidas_rts- L_WB_rts);
eval(['RMS_HP_WB' num2str(i) ' =RMS_HP_WB;']);

std_WB=sqrt((RMS_HP_WB)^2-(Mean_error_HP_WB)^2);
eval(['std_WB' num2str(i) ' =std_WB;']);

x_WB=RMS_HP_WB-(Mean_error_HP_WB)^2;

%Error RMS CWI

Error_HP_COST=L_medidas_rts- L_CWI_rts;
eval(['Error_HP_COST' num2str(i) ' =Error_HP_COST;']);

Mean_error_HP_COST=mean(Error_HP_COST);
eval(['Mean_error_HP_COST' num2str(i) ' =Mean_error_HP_COST;']);

RMS_HP_COST=rms(L_medidas_rts- L_CWI_rts);
eval(['RMS_HP_COST' num2str(i) ' =RMS_HP_COST;']);

std_COST=sqrt((RMS_HP_COST)^2-(Mean_error_HP_COST)^2);
eval(['std_COST' num2str(i) ' =std_COST;']);

x_COST=RMS_HP_COST-(Mean_error_HP_COST)^2;

%GRÁFICAS
figure(i)

%Difracción final de las medidas
plot(phi_angle,L_medidas_rts,'bo');
hold on

%Difracción final de Walfisch-Bertoni
plot(phi_angle,L_WB_rts,'g','linewidth',3);

%Difracción final de COST 231
plot(phi_angle, L_CWI_rts,'r','linewidth',3);
```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
titulo1 = 'L_{rts}';
titulo2 = num2str(i);
titulo = strcat(titulo1,titulo2);
title(titulo)
xlabel('\phi (°)')
ylabel('L_{rts} (dBm)')

%Leyenda
legend('L_{rts} Medidas ', 'L_{rts} WB ', 'L_{rts} COST ');

hold off

end
```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```

clear all
load('filas19-10.mat');
load('campania19-10.mat');
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
miscalles = {f1, f2, f3, f4, f5, f6, f7, f8, f9, f10, f11, f12, f13,
f14, f15, f16, f17, f18, f19, f20, f21, f22, f23};
tangente = {f1{122,:}; f2{17,:}; f3{128,:}; f4{16,:}; f5{119,:};
f6{16,:}; f7{120,:}; f8{19,:}; f9{92,:}; f10{14,:}; f11{88,:};
f12{14,:}; f13{123,:}; f14{14,:}; f15{105,:}; f16{15,:}; f17{102,:};
f18{15,:}; f19{89,:}; f20{15,:}; f21{98,:}; f22{15,:}; f23{97,:}};

%Parámetros modelos
h_tx=4.2; % Altura Transmisor
h_rx=1.8; % Altura receptor
h_arbol=2.5; % Altura árbol
w=7.5; % Espacio entre árboles
frecuencia=3.5e9; %frecuencia
lambda=3e8/frecuencia;

%Distancia transmisor-receptor
lat = str2double(campania(:,5));
long = str2double(campania(:,6));
[x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
posicion_tx = [37.880904,-1.289244];
[z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
z(1:length(x),:) = z;
t(1:length(x),:) = t;
dist = (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
distancia=dist;

for i = 1:length(tangente)
    lat_angle = str2double(tangente(:,5));
    long_angle = str2double(tangente(:,6));
    [j,k,utmzoneang] = deg2utm(lat_angle,long_angle);
    [l,m,zoneang] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
    l(1:length(j),:) = l;
    m(1:length(j),:) = m;
    disttangente = (sqrt((j-l).^2+(k-m).^2)).'; %Distancia del tx
con medida de referencia
end

for i = 1:length(miscalles)
    lat = str2double(miscalles{i}(:,5));
    long = str2double(miscalles{i}(:,6));
    [x,y,utmzone1] = deg2utm(lat,long);
    [z,t,zone2] = deg2utm (posicion_tx(1),posicion_tx(2));
    z(1:length(x),:) = z;
    t(1:length(x),:) = t;

```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```

dist= (sqrt((x-z).^2+(y-t).^2)).';
pot = str2double(miscalles{i}(:,1));
angle = acos (disttangente(i) ./ dist);%en radianes
angle_test = angle;

angle=abs(angle);

for r = 1:length(angle)
    if imag(angle(r)) ~= 0
        angle(r) = NaN;
        pot (r) = NaN;
    end
end

p_angle = angle*180/pi;%en grados angulo incidencia
phi_angle=90-p_angle;
w_angle=w./sin(pi/2-angle);

% Espacio libre
Lo=33.44+20*log10(dist/1000)+20*log10(frecuencia/1e6);
%Difraccion multiple
L_WB_msd=68.87-9*log10(frecuencia/1e6)-9*log10(w_angle)-
18*log10(h_tx-h_arbol)+18*log10(dist/1000);

%difraccion final
L_WB_rts=-
11.8+10*log10(frecuencia/1e6)+5*log10((w_angle/2).^2+(h_arbol-
h_rx)^2)+20*log10(2*(h_arbol-h_rx)./w_angle);

%Pérdidasa totales WB
L_WB=Lo+L_WB_msd+L_WB_rts;

%L_ori

if (phi_angle >0) | (phi_angle<35)
    L_ori=-10+(0.354*phi_angle);
end
if (phi_angle >=35) | (phi_angle<55)
    L_ori=2.5+(0.075*(phi_angle-35));
end
if (phi_angle >=55) | (phi_angle<=90)
    L_ori=4.0-(0.114*(phi_angle-55));
end

%L_CWI_RTS
L_CWI_rts=-16.9-
(10*log10(w))+(10*log10(frecuencia/1e6))+(20*log10(h_arbol-
h_rx))+L_ori;

L_bsh=-18*log10(h_tx-h_arbol+1);
ka = 54;
kd = 18;
kf = -4+(0.7*(((frecuencia/1e6)/925)-1));

```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
%L_CWI_msd
L_CWI_msd=L_bsh+ka+kd*log10(dist/1000)+kf*log10(frecuencia/1e6)-
9*log10(w_angle);

%Pérdida total de trayectoria
L_CWI_p=Lo+L_CWI_msd+ L_CWI_rts;

DATOS=[dist; L_WB];
DATOS_WB{1,i}=DATOS;

DATOS2=[dist; L_CWI_p];
DATOS_COST{1,i}=DATOS2;

end

save('WB.mat','DATOS_WB');
save('COST.mat','DATOS_COST');

%PARA MEDIDAS

Gt=-2+29.5; % amplificador y antena
Gr=-2;
Lt=1.5;
Lr=0.5;
Pt=3;
Factor_correc=4;
Pr=str2double((campania(:,1))).';

L_medidas=Pt+Gt-Lt+Gr-Lr-Pr+Factor_correc;

Ldc=L_medidas;

Pr_medida_5m=Pt+Gt-Lt+20*log10(3e8/(3.5e9*5*4*pi))+Gr-
Lt+Factor_correc; %Comprobación Potencia recibida medida distancia
referencia 4 m
PIRE=Pt+Gt-Lt+Gr-Lt;
%Regresión medidas
N1_Medidas=length(distancia);

%Método FI
Dlog=10*log10(distancia);
Pend_FI=polyfit(Dlog,L_medidas,1);
LO_FI=Pend_FI(2);
np_FI=Pend_FI(1);
Lp_FI=LO_FI+np_FI*Dlog;

% Varianza FI
NMSE=(sum((L_medidas-Lp_FI).^2))/N1_Medidas;
std_FI=sqrt(NMSE);
```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
for i=1:23
    distancia_perdidas=DATOS_WB{i};
    if i == 1 distancia_WB = distancia_perdidas;
    else distancia_WB=horzcat(distancia_WB, distancia_perdidas);
    end
end

for i=1:23
    distancia_perdidas=DATOS_COST{i};
    if i == 1 distancia_COST = distancia_perdidas;
    else distancia_COST=horzcat(distancia_COST, distancia_perdidas);
    end
end

%Regresión WB

%Método FI
Dlog=10*log10(distancia_WB(1,:));
Pend_WB=polyfit(Dlog,distancia_WB(2,:),1);
LO_WB=Pend_WB(2);
np_WB=Pend_WB(1);
Lp_WB=LO_WB+np_WB*Dlog;
Lp_WB_error=fliplr(Lp_WB);

%Varianza WB
N1=length(distancia_WB(1,:));
NMSE_WB=(sum((distancia_WB(2,:)-Lp_WB).^2))/N1;
std_WB=sqrt(NMSE_WB);

>Error WB medidas
error_WB=(distancia_WB(2,:)-Ldc);
error_medio_WB=sum((distancia_WB(2,:)-Ldc))/N1;
std_error_WB=sqrt((sum((error_WB-error_medio_WB).^2))/N1);

%Regresión COST

%Método FI
Dlog=10*log10(distancia_COST(1,:));
Pend_COST=polyfit(Dlog,distancia_COST(2,:),1);
LO_COST=Pend_COST(2);
np_COST=Pend_COST(1);
Lp_COST=LO_COST+np_COST*Dlog;

% %Varianza COST
N1=length(distancia_COST(1,:));
NMSE_COST=(sum((distancia_COST(2,:)-Lp_COST).^2))/N1;
std_COST=sqrt(NMSE_COST);

>Error COST medidas
error_COST=(distancia_COST(2,:)-Ldc);
error_medio_COST=sum((distancia_COST(2,:)-Ldc))/N1;
std_error_COST=sqrt((sum((error_COST-error_medio_COST).^2))/N1);
```

Anexo III. Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle

```
%GRÁFICA
%Medidas
semilogx(distancia,L_medidas,'b+');

hold on
xlim([90 500])
x=[100 200 300 400 500];
set(gca,'XTick',x)
grid on
hold on
title('Pérdidas con la distancia con el ángulo con la calle ')
xlabel('Distance (m)')
ylabel('Path loss (dB)')

% Recta regresión de las medidas
semilogx(distancia,Lp_FI,'k','linewidth',3);

% Recta regresión WB
semilogx(distancia_WB(1,:),Lp_WB,'r','linewidth',3);

% Recta regresión COST
semilogx(distancia_COST(1,:),Lp_COST,'y','linewidth',3);

%Leyenda
legend('L {medidas}','Lp {FI}','Lp {WB}','Lp {COST}');

hold off
```