

### 3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RAYOS EN INTERIOR

#### 3.1 INTRODUCCIÓN A LOS DIFERENTES MODELOS

La propagación de ondas en el interior de edificios está caracterizada por la propagación multitrayecto. Modelos empíricos tales como Multi Wall Model no tienen en cuenta fenómenos de propagación como reflexión, efecto de guiado de ondas en pasillos y difracción en cuñas verticales y horizontales. Los modelos de rayos ópticos tienen en cuenta estos efectos. Hay dos propuestas de rayos ópticos: Ray Tracing y Ray Launching.

- **Ray Tracing**

Con este método, la potencia recibida en cada píxel de recepción  $R$  es computada independientemente de los otros píxeles. Para la determinación de los rayos reflejados se determinan imágenes del transmisor, es decir, la imagen del transmisor relativa al plano reflectante ( $T'$  o  $T''$ ). El tiempo de computación es muy elevado debido a que cada píxel es calculado de forma independiente, pero por el contrario la exactitud es muy elevada porque todos los objetos relevantes son tenidos en cuenta.

El canal radio móvil en los escenarios de interior está caracterizado por la propagación multitrayecto. Los fenómenos de propagación dominantes en el interior del edificio son el sombreado sobre paredes, efectos de guiado de ondas en pasillos debido a las múltiples reflexiones y la difracción sobre cuñas verticales.

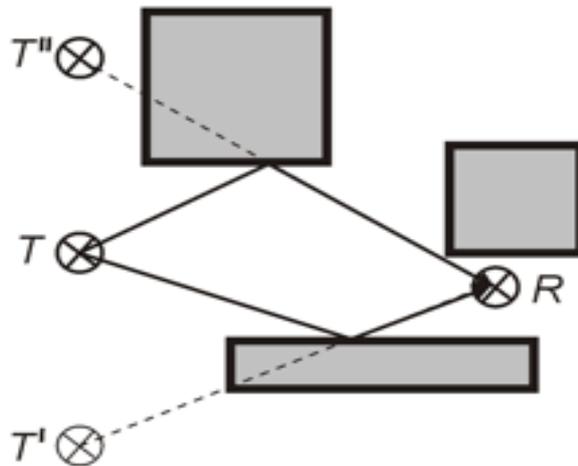


Figura 3.1 Figura esquemática de Ray Tracing

Los modelos de rayos ópticos deterministas consideran estos efectos, lo que conducen a una predicción de resultados mucho más exacta. Un modo para acelerar el tiempo consumido es el Intelligent Ray Tracing (IRT), basado en un pre-procesado de los datos del edificio, esto combina una gran exactitud con un corto tiempo de computación.

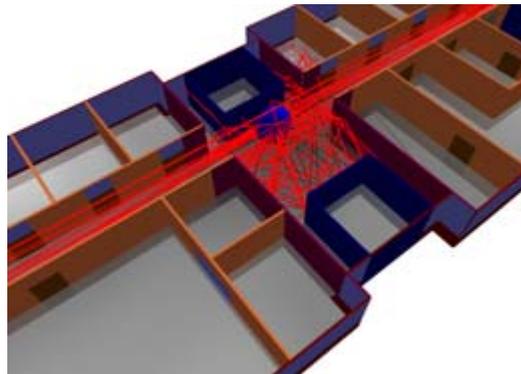
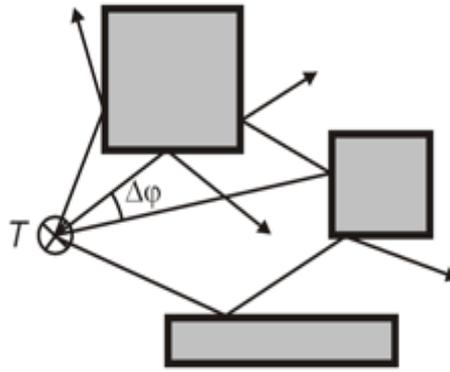


Figura 3.2 Trayectoria de propagación en escenarios de interior

- **Ray Launching**

En este método, el ángulo de transmisión de los rayos se incrementa por pasos. Después del lanzamiento del transmisor, se calcula la propagación de cada rayo individualmente. Después de una intersección con una pared reflectante, el rayo reflejado será calculado y trazado de nuevo. Después de la intersección con una cuña, los rayos de la difracción serán calculados con un incremento de ángulo dado. Cada vez que un rayo intercepta con un plano determinado, la magnitud del campo se acumula en ese píxel. El sumatorio de la potencia total recibida viene dado por la raíz cuadrada del cuadrado de cada una de las contribuciones. El trazado de un rayo en concreto se detiene si se alcanza un número definido de interacciones o bien si las pérdidas del rayo están por encima de un cierto umbral.



**Figura 3.3** Figura esquemática de Ray Launching

La desventaja de dicho método es el incremento de ángulo constante entre dos rayos adyacentes (por tanto no es siempre seguro que los obstáculos sean alcanzados por los rayos) y el enorme número de nuevos rayos después de cada difracción.

## 3.2 RAY TRACING

El modelo Ray Tracing calcula todas las posibles trayectorias desde el transmisor hasta el receptor. En los modelos básicos de Ray Tracing, la predicción está basada en el cálculo de la transmisión en espacio libre (free space) y en las reflexiones de las distintas paredes. Otros algoritmos más complejos de Ray Tracing incluyen mecanismos de difracción, esparcido difuso en la pared y transmisión a través de varios materiales. Al final, el nivel de la señal en una situación específica se obtiene como la suma de componentes de todas las trayectorias entre el transmisor y el receptor. La implementación de dichos modelos requiere de unos recursos de computación muy elevados. El tiempo de cálculo depende exponencialmente de los detalles incluidos en el trazado del área en concreto. Por ello, el tiempo de cálculo empleado en un área pequeña con un montón de detalles puede ser más elevado que el empleado en una zona relativamente grande pero con un nivel de detalles menor.

En el estudio realizado nos vamos a centrar en el método Ray Tracing. Para las simulaciones que vamos a realizar se utilizará un Simulador Ray Tracing en Microsoft Visual C++. Este programa utilizará el trazado del edificio bajo estudio y nos proporcionará parámetros tales como la potencia recibida, el tiempo de llegada (TOA) de las diferentes trayectorias, las amplitudes para dichas trayectorias, las pérdidas, las reflexiones en las diferentes paredes del edificio e información adicional que será necesaria para el estudio llevado a cabo. Con dicho programa podremos seleccionar la posición de la antena tanto transmisora (Tx) como receptora (Rx), los parámetros de cada pared,  $\epsilon_r$  y  $\tan \delta$ , los ángulos para ambas antenas, los patrones de radiación...

Con la utilización del programa AC3D podremos observar la posición concreta de cada antena dentro del edificio en cuestión y los diferentes rayos reflejados por cada una de las paredes del edificio. Fig 3.4 tiene sólo en cuenta la primera reflexión.

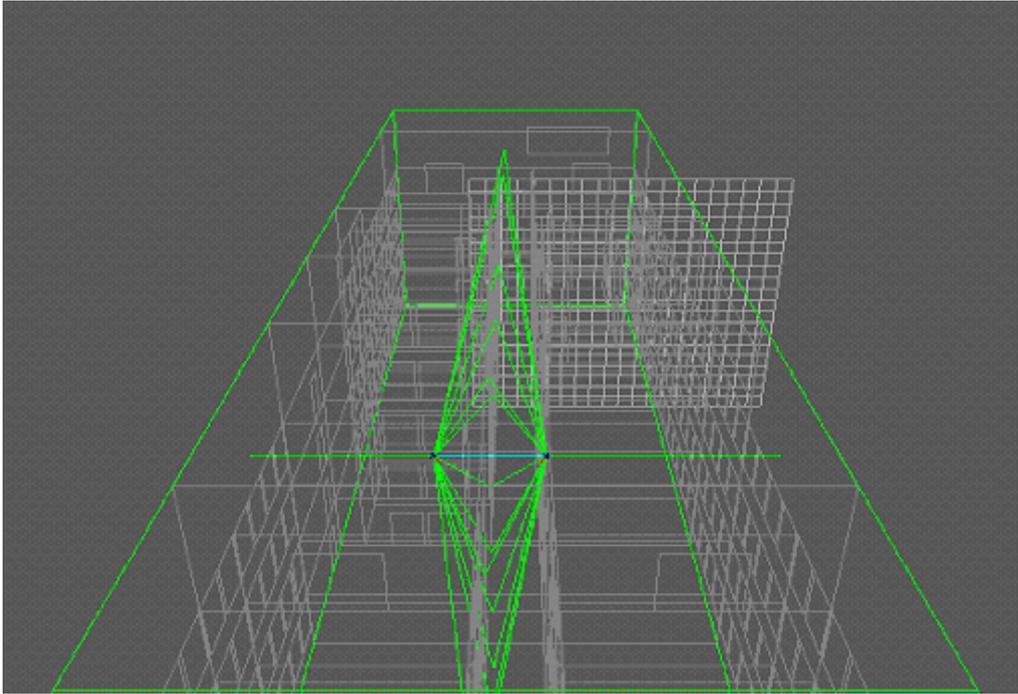


Figura 3.4 Figura esquemática de las reflexiones

En este ejemplo la antena transmisora y receptora están situadas en la siguiente posición,

$$Tx = (631, 4160, 1245)$$

$$Rx = (931, 4160, 1245)$$

donde las distancias están dadas en centímetros. Los ángulos para Tx y Rx son,

$$Tx = 70^\circ$$

$$Rx = 110^\circ$$

Solamente es tenido en cuenta la trayectoria directa (color azul) y las trayectorias con una única reflexión en la pared (color verde), pero dicho programa puede tener en cuenta la segunda y tercera reflexión también. El programa devuelve parámetros del tipo TOA, reflexión, pérdidas...

Index	T(ns)	R(dB)	N_Trans	T(dB)	PL(dB)	L_Antenna (dB)	Theta_I	EpsilonR	Plane
D1	83.60	0.45	9.00	139.79	422.91	6.87	56.46	6.95	BODEN
D2	65.11	0.45	7.00	108.80	355.89	8.84	56.46	6.95	DACH1
D3	46.75	0.44	5.00	77.80	290.71	12.35	57.32	6.95	DACH2
D4	28.79	0.43	3.00	46.71	235.25	20.32	60.82	6.95	DACH3
D5	13.02	0.28	0.00	0.00	118.69	50.19	61.23	6.95	DACH4

Tabla 3.1 Tabla esquemática con resultados de Ray Tracing

### 3.3 PERDIDAS EN INTERIOR

Las pérdidas son difíciles de calcular en un entorno interior. De nuevo, debido a la variedad de barreras físicas y materiales dentro de la estructura de interior, las señales no pierden energía de forma predecible. La trayectoria entre el receptor y el transmisor suele estar bloqueada por paredes, suelos u otros obstáculos. Dependiendo de la construcción del edificio y su diseño, la señal normalmente se propaga a lo largo de pasillos y en zonas abiertas. En algunos casos la señal transmitida puede tener una trayectoria directa hasta el receptor (Lineo of Sight LOS). Ejemplos de LOS en entornos de interior serían; almacenes, suelos de fábrica, salas de conferencias y estadios. En la mayoría de los casos este rayo directo suele estar obstruido.

En este apartado vamos a calcular las pérdidas en una línea. Para ello se va a llevar a cabo la realización de una serie de medidas en la habitación mediante el Analizador de Red. El aula escogida será el SN.22.2. Se encuentra situada en la 4ª planta del edificio. Fig. 3.5 representa un plano de dicha habitación.

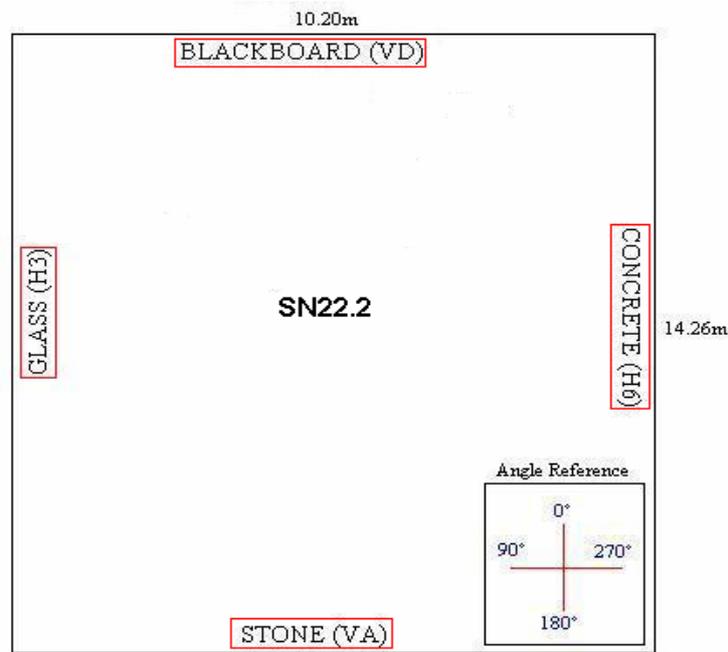


Figura 3.5 Plano de la clase SN.22.2

La habitación en donde se van a realizar las medidas se encuentra rodeada por diferentes paredes que son; VD (blackboard), VA (stone), H3 (glass) y H6 (concrete). Cada una de dichas paredes tiene unas características concretas que viene determinadas en la Tabla 3.2, en ella se observa el valor del parámetro  $E_r$  para cada una de ellas.

PARED	$E_r$
BLACKBOARD	6
STONE	4.950
GLASS	6.380
CONCRETE	4:950

Tabla 3.2 Valores de  $E_r$  en distintas paredes

Se van a realizar dos experimentos distintos. En el primero de ellos tanto la antena transmisora (Tx) como la receptora (Rx) se encuentran en la misma habitación, en dicho caso se dice que tenemos **Line of sight (LOS)**. En un segundo experimento colocaremos la antena Tx en el exterior de dicha habitación, mientras que la antena Rx permanecerá dentro. En dicha situación se dice que tenemos **Non Line of Sight (NLOS)**.

El receptor se desplazará a lo largo de una línea, permaneciendo fija la antena Tx en cada uno de los experimentos. En total para cada uno de ellos se van a realizar 25 medidas. En cada una de ellas el Rx es desplazado 50 cm. en línea recta respecto de su posición original.

#### 3.3.1 Pérdidas en espacio libre (FSPL)

Las pérdidas en espacio libre son fundamentales para un análisis de pérdidas en interior. Si la antena transmisora fuera idealmente una fuente puntual de radiación en el espacio, la superficie de frente de ondas abandonaría dicho punto con un patrón esférico como se muestra en la siguiente figura. La energía de la señal disminuye con el cuadrado de la distancia.

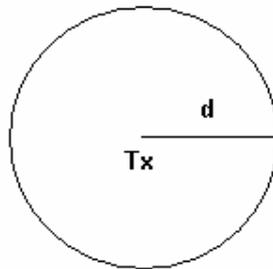


Figura 3.6 Frente de ondas de propagación

**Free Space Path Loss (FSPL)** se define como:

$$\text{FSPL} = (4 \pi d / \lambda)^2$$

Donde d es la distancia en metros entre el transmisor y el receptor y  $\lambda$  (lambda) es la longitud de onda en metros. Esta ecuación implica por lo tanto que a medida que la frecuencia aumenta, las pérdidas serán proporcionalmente más elevadas. La relación de la frecuencia con la longitud de ondas es:

$$\lambda = c / f$$

Donde c es la velocidad de la luz,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s y la frecuencia, f = ciclos por segundo. Usaremos una frecuencia de 2.4 GHz, o sea  $\lambda = 0.125$  metros [1].

#### 3.3.2 Line of sight (LOS)

El primer experimento es realizado en el interior de la habitación. La antena transmisora permanece fija en una posición Tx1. La antena receptora es desplazada a lo largo de una línea en incrementos de 50 cm. Fig 3.7 muestra dicha situación. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3

### 3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RAYOS EN INTERIOR

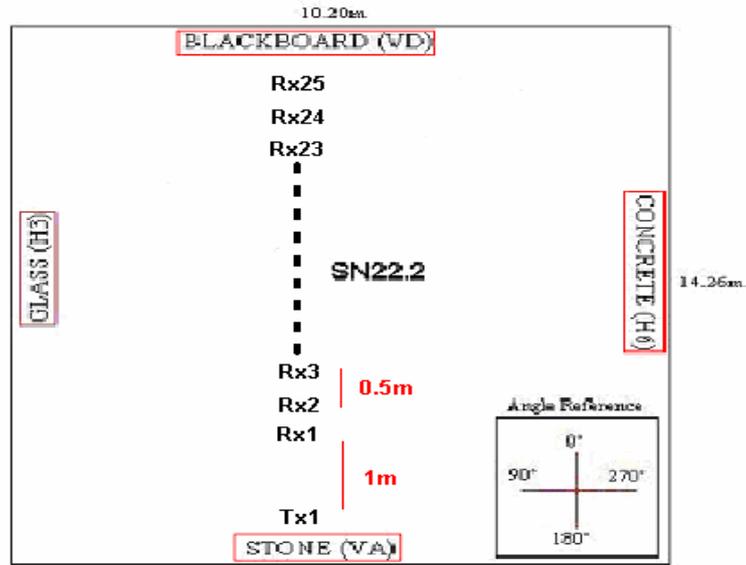


Figura 3.7 Posición de Tx y Rx

La Tabla 3.3 muestra los resultados.

TRANSMISOR (Tx)	RECEPTOR (Rx)	FREE SPACE LOSS (dB)
Tx1	Rx1	-42.87 dB
Tx1	Rx2	-46.40 dB
Tx1	Rx3	-48.89 dB
Tx1	Rx4	-50.83 dB
Tx1	Rx5	-52.42 dB
Tx1	Rx6	-53.76 dB
Tx1	Rx7	-54.92 dB
Tx1	Rx8	-55.94 dB
Tx1	Rx9	-56.85 dB
Tx1	Rx10	-57.68 dB
Tx1	Rx11	-58.44 dB
Tx1	Rx12	-59.13 dB
Tx1	Rx13	-59.78 dB
Tx1	Rx14	-60.38 dB
Tx1	Rx15	-60.94 dB
Tx1	Rx16	-61.46 dB
Tx1	Rx17	-61.96 dB
Tx1	Rx18	-62.43 dB
Tx1	Rx19	-62.87 dB
Tx1	Rx20	-63.30 dB
Tx1	Rx21	-63.70 dB
Tx1	Rx22	-64.09 dB
Tx1	Rx23	-64.46 dB
Tx1	Rx24	-64.81 dB
Tx1	Rx25	-65.15 dB

Tabla 3.3 Free Space Loss con Line of Sight

La primera distancia entre el transmisor y el receptor es de 1 metro. El valor teórico de pérdidas debería de ser -40 dB, pero en vez de esto se obtiene -42.87 dB. Este incremento en las pérdidas es debido a la atenuación introducida por ambas antenas, Tx y Rx, que es de 2.87 dB. Este valor será constante para todos los valores obtenidos, por ello para obtener los valores previos es necesario sumar esta atenuación a la teórica.

Como se dice en la teoría, mientras mayor es la distancia entre la antena Tx y Rx, mayor es la atenuación. El incremento de esta atenuación es constante, es decir no hay distancia alguna entre Tx y Rx para la cual se produzca una reducción de dicha atenuación. Esto es debido a que se tiene Line of Sight (LOS) entre ambas antenas. Fig 3.8 representa dichos resultados.

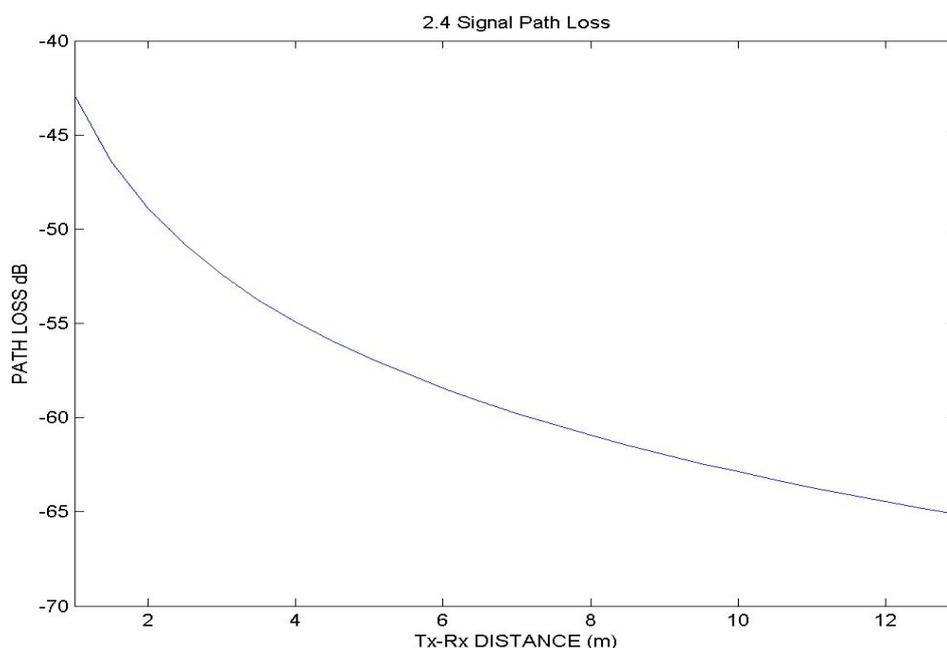


Figura 3.8 Representación de pérdidas en una línea

#### 3.3.3 Non line of sight (NLOS)

Las pérdidas cuando la trayectoria entre Tx y Rx se encuentran obstruidas son mucho más difíciles de predecir, especialmente por el gran número de escenarios de interior y materiales. Por ello existen diferentes modelos de pérdidas para describir las características únicas dominantes en interior. Basados en las pérdidas en espacio libre y en los tres fenómenos de propagación, los modelos de pérdidas informan por lo tanto de los diferentes tipos de edificios. Algunos ejemplos son edificios multi-nivel con ventanas o edificios de nivel simple sin ventanas.

En este caso la antena transmisora se encuentra situada fuera de la habitación, mientras que el receptor se encuentra en el interior de la misma. Entre ambos se encuentra situada una pared de cristal con dos puertas metálicas que influirán en los resultados obtenidos.

### 3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RAYOS EN INTERIOR

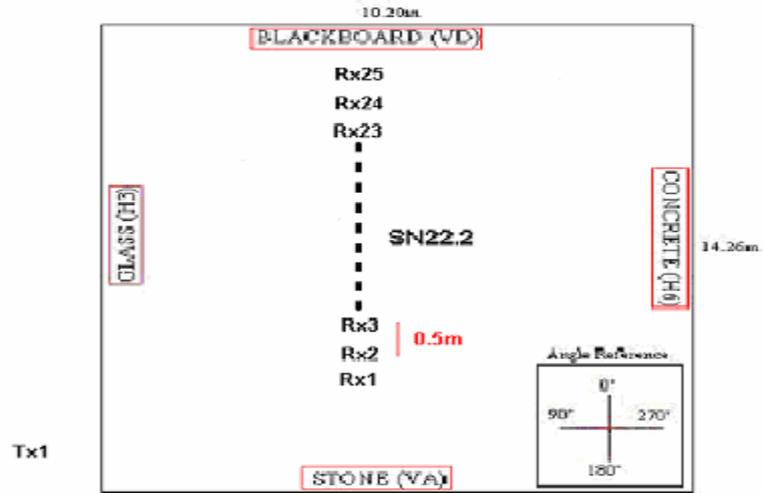


Figura 3.9 Posición de Tx y Rx

Resultados obtenidos;

TRANSMISOR (Tx)	RECEPTOR (Rx)	FREE SPACE LOSS (dB)
Tx1	Rx1	-125.74 dB
Tx1	Rx2	-115.89 dB
Tx1	Rx3	-116.09 dB
Tx1	Rx4	-110.34 dB
Tx1	Rx5	-106.64 dB
Tx1	Rx6	-106.99 dB
Tx1	Rx7	-105.37 dB
Tx1	Rx8	-97.72 dB
Tx1	Rx9	-95.95 dB
Tx1	Rx10	-96.20 dB
Tx1	Rx11	-94.46 dB
Tx1	Rx12	-94.72 dB
Tx1	Rx13	-140.95 dB
Tx1	Rx14	-141.22 dB
Tx1	Rx15	-141.49 dB
Tx1	Rx16	-131.77 dB
Tx1	Rx17	-132.04 dB
Tx1	Rx18	-132.31 dB
Tx1	Rx19	-122.59 dB
Tx1	Rx20	-122.85 dB
Tx1	Rx21	-123.12 dB
Tx1	Rx22	-123.37 dB
Tx1	Rx23	-91.67 dB
Tx1	Rx24	-106.05 dB
Tx1	Rx25	-106.89 dB

Tabla 3.4 Pérdidas en espacio libre con Non Line of Sight

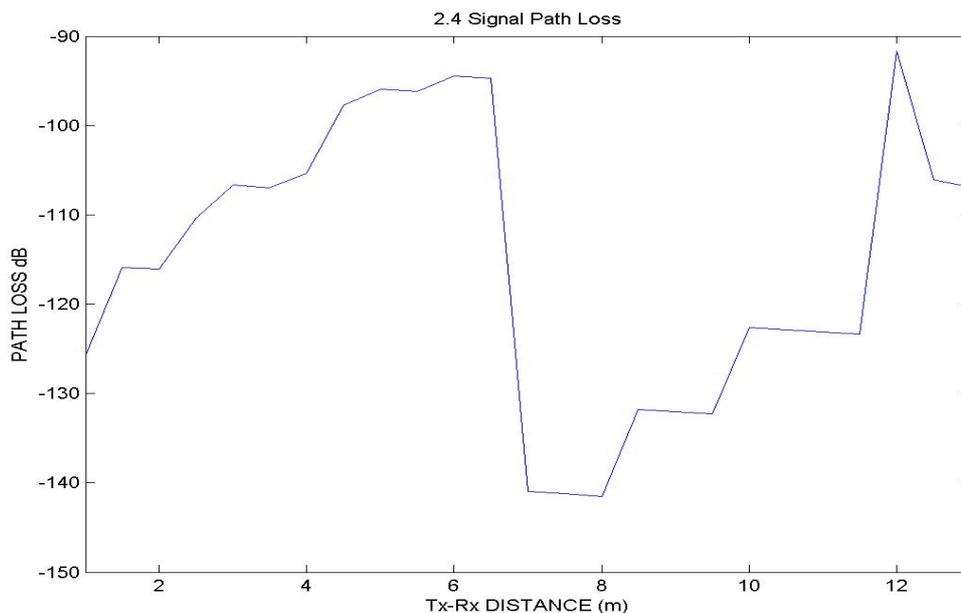
### 3. MODELOS DE PROPAGACIÓN DE RAYOS EN INTERIOR

Como se puede observar en la figura 3.10 es muy difícil de predecir las pérdidas cuando tenemos Non Line of Sight. Tenemos que tener en cuenta que el rayo directo atravesará diferentes materiales a medida que desplazemos la antena Rx a lo largo de la clase. No será lo mismo cuando el rayo directo atraviesa un material de cristal, a cuando lo haga con un material de metal. Cada uno de estos materiales tendrá características distintas que hará que obtengamos diferentes resultados para cada posición, de manera que la atenuación ya no solo depende de la distancia entre Tx y Rx.

Un claro ejemplo lo podemos observar en la siguiente posición,

$$\begin{aligned} \text{Tx} &= \text{Tx1} \\ \text{Rx} &= \text{Rx13} \end{aligned}$$

existen 7 metros entre Tx y Rx. En este punto la gráfica decrece muy rápidamente debido a que el rayo directo atraviesa la puerta metálica. Dicha puerta tiene características distintas del cristal y por tanto en ella la reflexión será mayor, con la consiguiente disminución de la potencia recibida en dicho punto. Puede observarse como cuando el rayo atraviesa el cristal (posiciones de Rx anteriores) la atenuación es bastante menor. Los fenómenos de propagación dependen de las características del material.



**Figura 3.10 Representación de pérdidas en una línea con NLOS**

Para obtener los resultados exactos debemos de tener en cuenta los fenómenos de propagación

#### 3.3.4 Fenómenos de propagación

- **Reflexión**

Cuando la señal propagada alcanza una superficie puede ser absorbida, reflejada o bien una combinación de ambas. Esta reacción depende de las propiedades físicas y de la señal. Las propiedades físicas son la geometría de la superficie, la textura y la composición del material. Las propiedades de la señal son el ángulo de incidencia, la orientación y la longitud de onda.

Los conductores perfectos reflejarán la señal completa. Otros materiales reflejarán parte de la energía incidente y transmitirán el resto. La cantidad exacta de transmisión y reflexión depende por tanto del ángulo de incidencia, el grosor del material y las propiedades dieléctricas. Los mayores contribuidores de reflexión son paredes, suelos, techos y mobiliario.

- **Penetración**

Cuando una señal se propaga a través de un entorno de oficina encontrará muchos obstáculos y alguno de ellos será penetrado. Cuando la señal penetra un obstáculo experimenta una pérdida dependiendo del grosor del objeto y de la composición del material. La frecuencia de las ondas electromagnéticas decide que parte de la onda incidente en el material saldrá a través del objeto.

- **Difracción**

Un frente de ondas difractado tiene lugar cuando la onda transmitida esta obstruida por cantos bruscos dentro de la trayectoria. La difracción ocurre cuando los obstáculos son impenetrables por parte de las ondas de radio. Basadas en el principio de Huygen's, las ondas secundarias están formadas detrás del cuerpo obstructor aunque no haya línea de visión. Los entornos de interior suelen tener numerosos de estos cantos, orientados bien en dirección vertical u horizontal. La señal difractada resultante es dependiente de la geometría del canto, de la orientación espacial así como también es dependiente de las propiedades de la señal, tales como amplitud, fase y polarización. El resultado de la difracción de una onda en un obstáculo es que el frente de ondas rodea alrededor y por detrás al canto. La difracción se demuestra mejor en las señales de radio cuando son detectadas cerca de las paredes interiores alrededor de esquinas y vestíbulos.

- **Dispersión**

Si hay numerosos objetos en la trayectoria de la señal y dichos objetos son relativamente pequeños con relación a la longitud de onda, entonces el frente de ondas propagado se dividirá en numerosas direcciones. La señal resultante se dispersará en todas las direcciones sumándose a las interferencias constructiva y destructiva de la señal. [1]