



# **Mitigación de Aspectos que Afectan la Propagación en Ondas de Frecuencia Milimétrica en Sistemas Inalámbricos Punto-a-Multipunto de Banda Ancha**

## **Un Libro Blanco para Proveedores de Servicios de Telecomunicaciones utilizando el Sistema AIReach® 9000**

Este Libro Blanco AIReach de banda ancha discute aspectos relacionados con la propagación de ondas radiales de frecuencia milimétrica. Examina el impacto de la lluvia, y discute las medidas que podrían tomarse con un sistema de radio para mitigar este impacto. La audiencia objetivo de este documento es el staff técnico del proveedor de servicio de telecomunicaciones que se beneficia del sistema AIReach 9000 para redes de acceso inalámbrico de banda ancha (BWA).

### **1.0 Antecedentes**

A medida que el costo de los componentes de alta frecuencia disminuye, las bandas de ondas milimétricas han adquirido atractivo para la transmisión de datos y voz en banda ancha. Esas transmisiones incluyen las bandas de 24, 26, 28, 31, y 38 GHz. Las bandas milimétricas ofrecen una mayor capacidad que las bandas tradicionales de menor frecuencia, al igual que antenas de alta ganancia/direccionalidad. Debido a que son sistemas de línea visual, ofrecen una mejor eficiencia de utilización de frecuencia gracias a los superiores esquemas de reutilización de frecuencia asociados con las antenas de alta ganancia.

Muchos factores contribuyen a la utilización de sistemas punto-a-multipunto (PMP) en bandas de ondas milimétricas. Estos factores incluyen la eficiente utilización del espectro, la capacidad de suministrar verdaderos servicios de banda ancha a velocidades simétricas de hasta 45 Mbps, y la capacidad de manejar adecuadamente el aspecto de los elevados costos recurrentes asociados con el montaje de antenas en los techos de los edificios. Con el sistema AIReach, un solo radio en el hub PMP puede entregar y manejar 45 Mbps de tráfico full dúplex de usuario, distribuido en un gran número de sitios remotos, utilizando solamente 25 MHz de espectro. Contrastando esto, y dependiendo del perfil de tráfico en cada sitio, podría ser necesario contar con un gran número de radios transceptores punto-a-punto y de antenas en el hub para responder a este mismo requerimiento.

En la utilización de sistemas PMP, la absorción de energía de radio frecuencia (RF) por la lluvia en las bandas de ondas milimétricas es una consideración importante. Esta absorción, conocida como *atenuación de lluvia*, limita el rango efectivo durante eventos de precipitación y debe recibir consideración durante la fase del diseño del sistema. En el cálculo del rendimiento del enlace PMP, el margen de atenuación de lluvia constituye un importante contribuyente. Por tanto, para alcanzar la disponibilidad de sistema deseada, el rendimiento del sistema se establece con base en las condiciones de lluvia. El margen de atenuación de lluvia puede ir desde 5 dB hasta 30 dB, dependiendo de los objetivos de disponibilidad del sistema, del rango del

**“Los sistemas PMP... entregan verdaderos servicios de banda ancha a velocidades simétricas de hasta 45 Mbps...”**

**“para alcanzar una disponibilidad de sistema deseada, el rendimiento del sistema es establecido por las condiciones de lluvia”**

enlace, de la banda de frecuencias, y de la zona de lluvia. De acuerdo con la recomendación ITU 837-1 y 838, la Tierra ha sido dividida en diferentes zonas de lluvia en las cuales, con base en información climática de largo plazo, cada zona presenta una probabilidad de índices diferentes de precipitación anual. El margen de atenuación de lluvia es una función del índice de precipitación (mm/hora). Por tanto, para un objetivo de disponibilidad de sistema y para una zona de lluvia específica, se calcula el margen de atenuación de lluvia y se establece el rango del sistema.

La **Figura 1-1** ilustra el modelo del rango de enlace, mostrando el downlink, el cual es el enlace en la dirección desde el hub PMP hacia el sitio remoto. El hub está transmitiendo con EIRP de P dBm. (EIRP es el producto del poder de transmisión y de la ganancia de la antena de transmisión, expresado en dBW o dBm). La señal experimenta pérdida de propagación, L, y pérdidas debido a atenuación de lluvia, F. La sensibilidad del receptor es R dBm. En dB, la pérdida total de trayectoria es igual a P-R, que es también igual a L+F. Aumentando la sensibilidad del receptor se obtiene un incremento en la pérdida de trayectoria permitida, con el consecuente aumento en el rango.

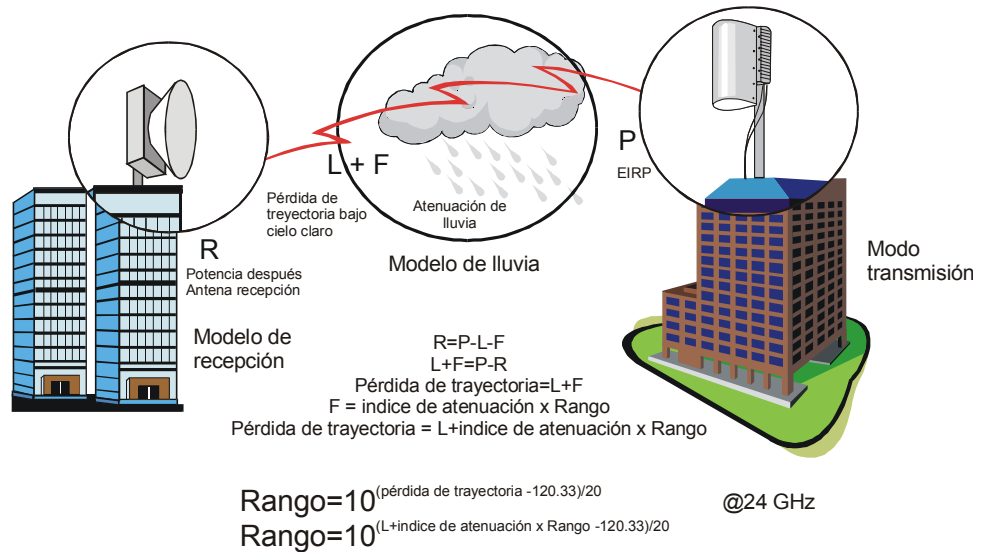
El componente de atenuación es una función de la atenuación por kilómetro para un índice dado de precipitación y distancia. La pérdida total de trayectoria está dada por la Ecuación 1:

$$\text{Ecuación 1. Pérdida de trayectoria} = L + \text{Índice de Atenuación} \times \text{Rango (en kilómetros)}$$

Para el sistema de línea visual, la pérdida de trayectoria aumenta con la distancia (Ecuación 2). El primer orden de aproximación de la ecuación de rango para un sistema de 24 GHz es:

$$\text{Ecuación 2. Rango} = 10^{(\text{pérdida de trayectoria} - 120.33)/20} = \frac{10^{(\text{L} + \text{Índice de Atenuación} \times \text{Rango} - 120.33)/20}}$$

Se requiere hacer una iteración para resolver la anterior ecuación trascendental para el rango.



G-22228 C  
03/15/01

Iterar para obtener rango y pérdida de trayectoria

**Figura 1-1. Ilustración del análisis de enlace**

## 2.0 Efectos de la modulación

Las modulaciones utilizadas en sistemas PMP son QPSK, 16-QAM, y 64-QAM. La modulación 64-QAM tiene tres veces más de bits por símbolo que QPSK. Las modulaciones de constelación de orden superior puede utilizarse ya que estos sistemas son predominantemente de línea visual y se presenta un mínimo de atenuación multipath.

La desventaja de las modulaciones de orden superior es la mayor relación C/I y la sensibilidad del receptor requerida para demodulación. La diferencia típica en la sensibilidad requerida del receptor entre QPSK y 64-QAM es de aproximadamente 14 dB; entre QPSK y 16-QAM esta diferencia es de unos 7 dB. A partir de la Ecuación 2, esto se traduce en rangos reducidos. Para las tres modulaciones, la **Tabla 2-1** muestra  $E_b/N_0$  y sensibilidades de receptor típicos para alcanzar los BERs especificados.

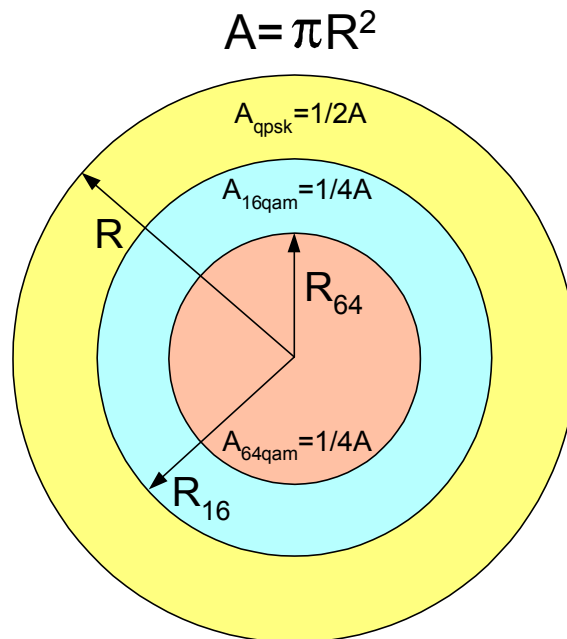
**Tabla 2-1. Requerimientos de demodulación para diversas modulaciones**

Modulación	Tasa de errores de bits					
	1E-13	1E-12	1E-10	1E-09	1E-08	1E-06
<b>QPSK</b>	8.3	8.1	7.7	7.5	7.3	6.9
<b>16-QAM</b>	12.0	11.8	11.5	11.2	11.0	10.6
<b>64-QAM</b>	16.3	16.1	15.8	15.5	15.3	14.9
	$E_b/N_0$ (dB) teórico					
	1E-13	1E-12	1E-10	1E-09	1E-08	1E-06
<b>QPSK</b>	13.3	12.6	12.2	11.5	10.8	10.4
<b>16-QAM</b>	20.5	19.8	19.5	18.7	18.0	17.6
<b>64-QAM</b>	27.1	26.4	26.1	25.3	24.6	24.2

**Tabla 2-1. Requerimientos de demodulación para diversas modulaciones**

	C/I (dB)					
	1E-13	1E-12	1E-10	1E-09	1E-08	1E-06
<b>QPSK</b>	-86.2	-86.9	-87.3	-88.0	-88.7	-89.1
<b>16-QAM</b>	-79.0	-79.7	-80.0	-80.8	-81.5	-81.9
<b>64-QAM</b>	-72.4	-73.1	-73.4	-74.2	-74.9	-75.3
<b>Nivel de señal de recepción (dBm)</b>						

La **Tabla 2-1** muestra como, a medida que el orden de modulación aumenta, se requiere de mayores valores de  $E_b/N_0$  y de potencia de receptor para sostener un BER dado. Por tanto, QPSK siempre tendrá un mayor rango y una mayor área de cobertura que otras modulaciones. De igual forma, el área de cobertura de 16-QAM siempre será mayor que la de 64-QAM. Este sacrificio entre cobertura y capacidad se muestra en la **Figura 2-1**, la cual sobrepone los rangos y las áreas de cobertura de las tres modulaciones utilizadas en sistemas PMP en una escala aproximada.



**Figura 2-1. Sacrificio entre cobertura y capacidad**

En la figura, A representa el área total de cobertura, establecida por el rango de cobertura QPSK. El círculo interior, el área cubierta por velocidades altas de datos, 64-QAM, representa aproximadamente el 25% del área total de cobertura del sistema. El anillo interior representa el área siendo servida por 16-QAM (o QPSK), pero no por 64-QAM. Esta área también representa un 25% del área de cobertura del sistema. El anillo exterior representa el área servida solamente por QPSK. Representa el 50% restante del área de cobertura del sistema. Claramente, cuando se implementan sistemas PMP, el área de cobertura de 360° mostrada en la figura se deriva de tal vez cuatro o más sectores operacionales utilizando dos o más frecuencias de carrier.

Bajo el supuesto de una población de suscriptores uniformemente distribuida, la Ecuación 3 nos da la capacidad alcanzada del área de cobertura del hub PMP.

$$\text{Capacidad Alcanzada} = \frac{\text{Máxima Capacidad de Radio}}{3 \left[ \frac{A_{\text{QPSK}}}{A} \right] + 2 \left[ \frac{A_{\text{16QAM}}}{A} \right] + \left[ \frac{A_{\text{64QAM}}}{A} \right]}$$

**Ecuación 3. Suscriptores uniformemente distribuidos**

En esta ecuación, Máxima Capacidad de Radio es la máxima capacidad soportable por los carriers que operan en el área de cobertura. Por ejemplo, en el AIReach 9000, un solo carrier de 12.5 MHz operando con 64-QAM puede soportar 45 Mbps. En este caso, la máxima capacidad de radio sería igual a 45 Mbps multiplicado por el número de carriers utilizados.

Una base de suscriptores uniformemente distribuida utilizando las relaciones de área de la **Figura 2-1** en la Ecuación 3 resulta en:

**Ecuación 4. Capacidad Alcanzada = 8/17 Máxima Capacidad de Radio = 0.47 Máxima Capacidad de Radio**

Por tanto, si el hub PMP hace una participación de tiempo entre cada una de las modulaciones en proporción con su población de suscriptores, solamente se utilizará el 47% de la máxima capacidad. En la práctica, el espacio de la oficina tiende a conglomerarse, de tal forma que los suscriptores no existen en distribuciones uniformes. Por tanto, la máxima capacidad utilizada real podría diferir de esta cifra. No obstante, si pudiese utilizarse 64-QAM para toda el área, entonces podría alcanzarse la capacidad máxima del hub.

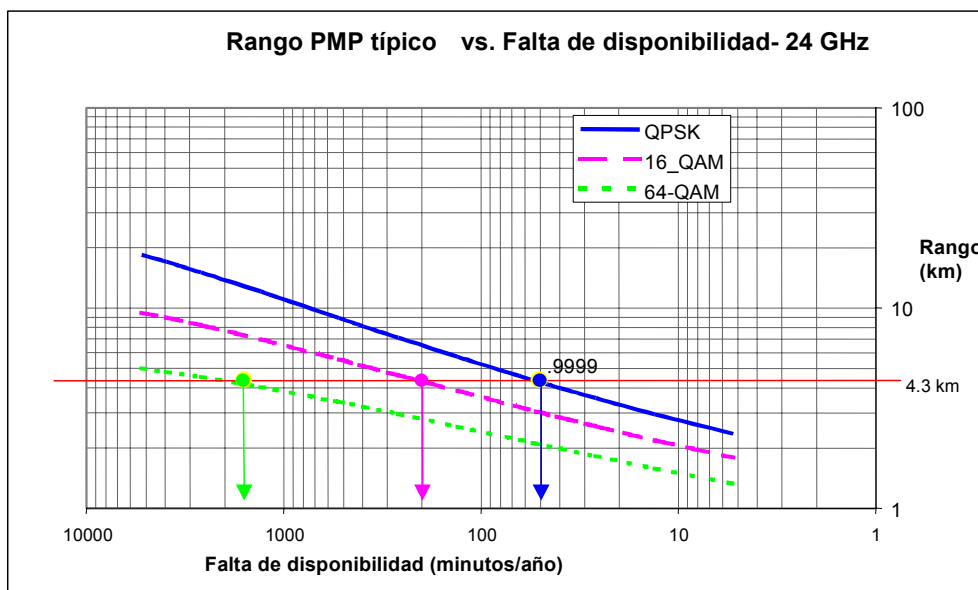
### 3.0 Recuperación de margen de lluvia y de capacidad de sistema

Si el margen de lluvia pudiera ser utilizado durante condiciones de cielo despejado, entonces sería posible ampliar el rango del radio 64-QAM al del radio QPSK (margen de lluvia incluido). Por ejemplo, haciendo referencia a la **Figura 2-1**, si 64-QAM estuviese utilizando su margen de lluvia, su rango o área de cobertura podría ampliarse al círculo exterior. Como resultado de ello, se alcanzaría la máxima capacidad del hub, y toda la población de suscriptores se beneficiaría del máximo rendimiento de velocidad de datos del 64-QAM.

Durante un evento severo de precipitación, sería óptimo que el sistema detectase la necesidad de margen adicional de lluvia y, dependiendo de la intensidad de la lluvia, poder aumentar las modulaciones especificadas por los rangos de modulación en la figura. Este enfoque, que es el que utiliza AIReach de Banda Ancha, permitiría el máximo de rango en el hub, suministro de datos a altas velocidades prácticamente todo el tiempo, y aun garantizaría las velocidades mínimas de datos. Para calcular el tiempo durante el cual los suscriptores en los rangos exteriores de operación estarían siendo servidos por modulaciones QPSK, 16-QAM o 64-QAM, deberá calcularse el rango como función de la disponibilidad. La **Figura 3-1** asume un amplio sector PMP (90°), y muestra rangos típicos vs. rangos de falta de disponibilidad de

rendimiento para las tres modulaciones en la banda de 24 GHz para la Zona K del Modelo de Lluvia ITU. La Zona de Lluvia K, o una zona menos lluviosa, incluye a prácticamente todos los Estados Unidos y al Canadá, al sur de Suramérica, Europa, Asia occidental y al norte, y el Japón.

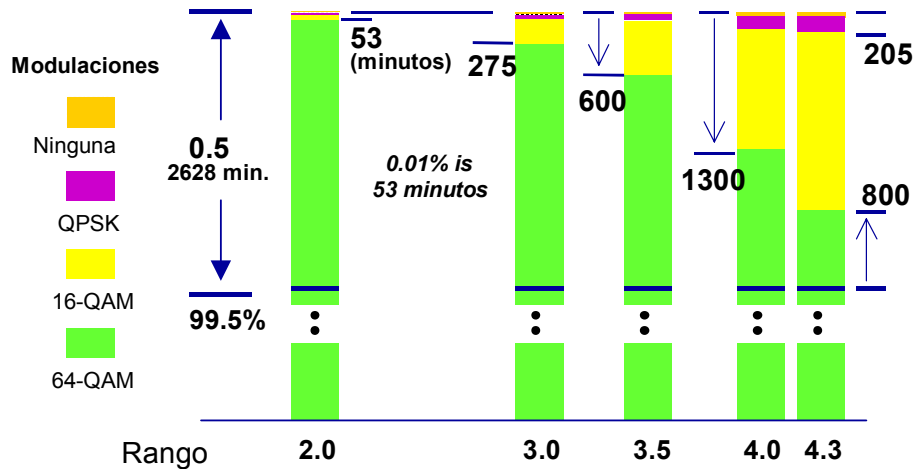
Para una disponibilidad de 0.9999, o para un total de solamente 50 minutos de caídas de servicio durante el año, la **Figura 3-1** muestra que el rango esperado QPSK es de 4.3 kilómetros. El rango 16-QAM correspondiente es de 3 kilómetros, mientras que el rango 64-QAM es de alrededor de 2 kilómetros. En caso de utilizarse un sector de menor tamaño (por ejemplo de 45°), los rangos aumentarían debido al aumento en EIRP.



G-21984 P 01/16/01

**Figura 3-1. Rangos típicos PMP vs. falta de disponibilidad a 24 GHz. Los rangos asumen un sector PMP de 90°.**

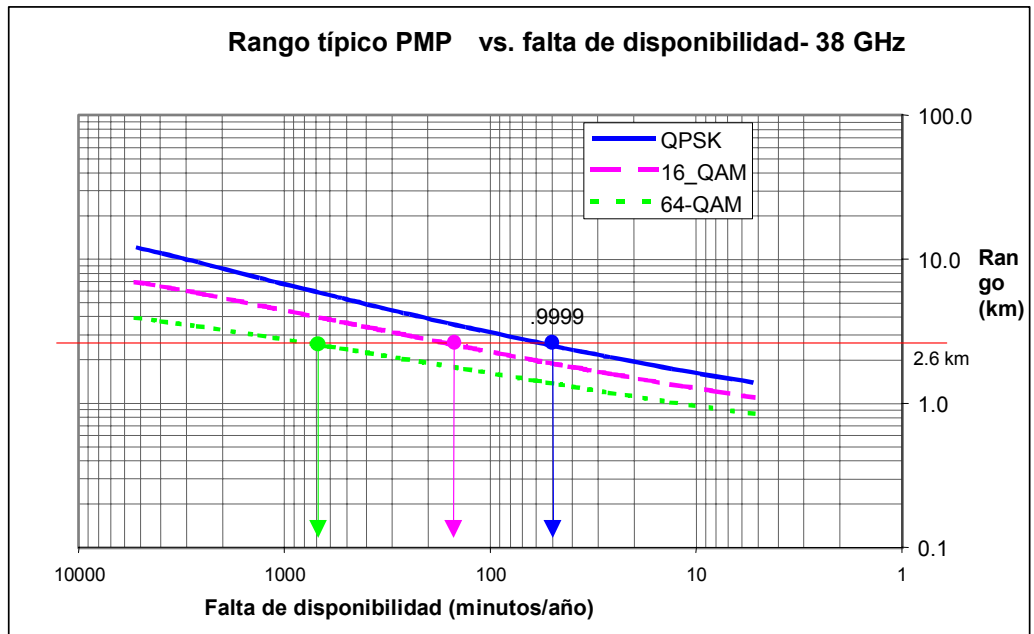
La **Figura 3-1** muestra como aumentando el rango 64-QAM a 4.3 kilómetros, la falta de disponibilidad anual 64-QAM aumenta a aproximadamente 1800 minutos, unas 30 horas por día. Para las modulaciones de orden superior, esto no constituye falta de disponibilidad total, sino simplemente la falta de disponibilidad de una modulación y el cambio a una de un orden inferior. Por tanto, variando la modulación, un sitio de suscriptor, en el extremo peor del rango QPSK, estaría en modo 64-QAM 364 días al año, cambiaría a 16-QAM unas 27 horas al año, y cambiaría a modo QPSK sólo 150 minutos durante el año. A medida que el rango del sitio del suscriptor disminuye, la cantidad de tiempo invertida en modulaciones inferiores también disminuirá.



**Figura 3-2. Formato alternativo de la Figura 3-1 mostrando la disponibilidad de diversas modulaciones**

La información se muestra en un formato diferente en la **Figura 3-2**. Aquí vemos claramente la disponibilidad de 64-QAM como función del rango y que, aun en el peor caso del rango, por lo menos una de la modulaciones de orden superior está casi siempre disponible.

Para la banda de 38 GHz mostrada en la **Figura 3-3**, un sitio de suscriptores en el límite inferior de cobertura QPSK operaría en modo 64-QAM 365 días, menos 700 minutos al año, en 16-QAM 580 (700 – 120) minutos al año, y en modo QPSK 120 minuto al año. Dicho de otra forma, este sitio de suscriptor, en el peor de los casos aún operaría con una de las modulaciones de orden superior todo el tiempo, excepto por 170 minutos al año.



G-21985 P 01/16/01

**Figura 3-3. Rangos PMP típicos vs. caídas de servicio a 38 GHz. Los rangos asumen un sector PMP de 90°**

## 4.0 Maximización de capacidad del sistema con Correspondencia de Modulación Dinámica AIRmatch

Un sistema PMP con modulación estática es aquel en el cual la modulación que sirve un sitio dado es fija, cambia en incrementos cerrados con otros sitios servidos por el mismo carrier, y/o debe cambiarse mediante intervención del operador. Según se indica en la Ecuación 4, un sistema de modulación estática desperdiciaría alrededor del 50% de la capacidad del hub, hablando en términos prácticos.

AIRreach 9000 utiliza una técnica dinámica llamada Correspondencia de Modulación Dinámica AIRmatch para beneficiarse de condiciones de cielo despejado y alcanzar la disponibilidad de las

modulaciones de orden superior. Con la técnica AIRmatch, el sistema hace seguimiento continuo al

enlace con cada sitio para ver qué modulación puede ser

soportada en ese momento. Los sitios que pueden soportar 64-QAM son servidos por esta modulación de nivel superior. En caso de que las condiciones cambiasen y que no pudiese sostenerse 64-QAM, la modulación para ese sitio caería a 16-QAM (y aun a QPSK). Por tanto, aun dentro de un marco TDMA, los sitios son servidos por la modulación de mayor orden que pueden soportar, y la capacidad se optimiza para igualar dinámicamente las condiciones ambientales locales. La importancia de la técnica AIRmatch es que aquello que de otra forma sería ancho de banda perdido por el margen de lluvia se convierte en capacidad generadora de ingresos. Esto es algo especialmente cierto para aquellos servicios de datos en donde los anchos de banda no comprometidos son la norma.

**“La importancia de la técnica AIRmatch es que aquello que de otra forma sería ancho de banda perdido por el margen de lluvia se convierte en capacidad generadora de ingresos”.**

## 5.0 Resumen

Los impactos de los márgenes de lluvia deben ser tenidos en cuenta durante el diseño y operación de un sistema PMP. La Correspondencia de Modulación Dinámica AIRmatch ofrece una forma sencilla para beneficiarse del margen de lluvia bajo condiciones de cielo despejado, recuperando en esta forma capacidad de sistema que se perdería de otra forma.

AIRreach, AIRmatch, AIRrange, y WINNING BY DESIGN son marcas (™) y marcas registradas (®) de Hughes Electronics Corporation (HUGHES).