

Eficiencia MAC en Redes Inalámbricas de Área Local 802.11 a/g en Presencia de Desvanecimiento por Multitrayectorias

Portillo J. Canek, Villaseñor G. Luis A. y Cabanillas N. Juan C.

Resumen—Las comunicaciones a través del canal inalámbrico representan un reto técnico debido a los múltiples efectos negativos inherentes al mismo; algunos de estos efectos se relacionan al desvanecimiento, atenuación, sombreo e interferencia. En este trabajo se presenta un análisis de desempeño del protocolo MAC (Control de Acceso al Medio) para las redes inalámbricas de área local (WLAN) del tipo 802.11a y 802.11g. El análisis toma en cuenta los efectos de un ambiente de propagación típico de interiores que presenta desvanecimiento por multitrayectorias. Se considera también el aspecto de interoperabilidad entre dispositivos, es por ello que en el caso de la WLAN 802.11g se establecen dos escenarios: WLAN homogénea (compuesta sólo de dispositivos 802.11g) y WLAN heterogénea (compuesta de dispositivos 802.11g y 802.11b). Se presentan resultados de desempeño para evaluar la eficiencia en ambas tecnologías (802.11a y 802.11g) considerando el desvanecimiento a pequeña escala, el cual es usual en ambientes de interiores.

Palabras clave—Caudal eficaz, Eficiencia MAC, Desvanecimiento por Multitrayectorias, WLAN 802.11a/g.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas de área local (WLAN) del tipo 802.11 han logrado un gran éxito comercial, siendo actualmente instaladas en hogares, oficinas y empresas. Desde la introducción del estándar 802.11 [1], se han propuesto y aprobado varias extensiones para mejorar el mecanismo de Control de Acceso al Medio (MAC), y para incluir nuevas especificaciones de capa física; estas propuestas se definen en los suplementos 802.11a [2], 802.11b [3] y 802.11g [4]. El protocolo MAC controla el acceso al medio inalámbrico, y es esencialmente el mismo para todos los suplementos. La MAC también se encarga de permitir la interoperabilidad entre las tecnologías 802.11g y

Manuscrito recibido el 11 de diciembre de 2007. Este trabajo fue respaldado por el departamento de Ing. Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Sonora. Los autores agradecen el apoyo recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) bajo el proyecto No. 48391.

Portillo J. Canek colabora actualmente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa; Ciudad Universitaria, Culiacán, México; C.P. 80040; Tel/Fax: (667) 7134053, (e-mail ipi@uas.uasnet.mx).

Villaseñor G. Luis A. es Profesor Investigador del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del CICESE; Km 107 carretera Tijuana-Ensenada, 22860, Ensenada, B.C., México. Tel: (646) 1750500, ext. 25330; Fax: (646) 1750554, (e-mail luisvi@cicese.mx).

Cabanillas N. Juan C. es Profesor en el Departamento de Eléctrica Electrónica del Instituto Tecnológico de Culiacán; Juan de Dios Batís s/n Colonia Guadalupe, C.P. 80220, Culiacán, Sinaloa., México. Tel: (667) 7131796, (e-mail jccnoris1@hotmail.com).

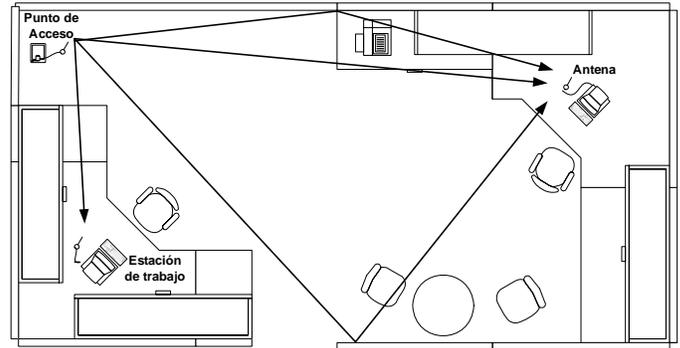


Fig. 1 Ambiente típico con desvanecimientos por multitrayectorias (Vista superior de una oficina)

802.11b, esto es posible al utilizar un mecanismo de protección como RTS/CTS o CTS-to-self, tal y como se propone en [4]; de igual forma existen otras posibles soluciones para resolver el problema de la interoperabilidad [5]. Por otro lado, la principal diferencia entre las diversas extensiones realizadas al estándar 802.11 se relaciona con la especificación de capa física (PHY). La PHY define entre otras cosas la banda de frecuencia de operación, el esquema de modulación, la tasa de codificación, la detección de la portadora y las técnicas de equalización. Los ambientes típicos de operación de una WLAN en interiores, tales como oficinas, hogares y escuelas, se caracterizan por la presencia de objetos de diversos tamaños dentro de edificios cerrados; como resultado el canal inalámbrico presenta múltiples reflexiones, y la transmisión de la señal origina varias trayectorias de propagación llamadas multitrayectorias. En este tipo de ambientes se presentan interferencias constructivas y destructivas en la señal, observándose un proceso de desvanecimiento en la misma a nivel de receptor. A este fenómeno se le conoce como desvanecimiento por multitrayectorias [6]. La figura 1 presenta un ambiente típico de oficina donde comúnmente operan los puntos de acceso (APs) y terminales WLAN; las flechas representan las multitrayectorias de la señal.

En trabajos anteriores hemos presentado estudios teóricos de la eficiencia del protocolo MAC para la extensión 802.11g [7], y para las extensiones 802.11a/g [8], incorporando en este último la extensión 802.11a, para llevar a cabo una comparación entre las tecnologías. En dichos trabajos se realiza una evaluación analítica de la eficiencia de la MAC tomando en cuenta distintos modos y esquemas de operación de la PHY descritos en el estándar 802.11g. Los resultados de desempeño reportados en [7, 8] se

explican a partir de los datos obtenidos, tales como caudal eficaz y eficiencia normalizada, sin embargo dicho análisis no considera el efecto del ambiente con desvanecimientos por multitrayectorias.

Existen varias publicaciones donde se compara el desempeño de estas tecnologías WLANs, como en [9] donde realizan una investigación experimental, para las extensiones 802.11b/g, reportando resultados de probabilidad de entrega de datos y relación señal a ruido (SNR), aunque no analizan el efecto de la MAC a fondo, no toman en cuenta la interoperabilidad entre 802.11b/g, y llevan a cabo el estudio sólo para un ambiente de exteriores. Asimismo, en [10] realizan un estudio de desempeño para exteriores e interiores a través de simulaciones por computadora utilizando un modelo de canal realista, y reportan resultados de tasa de errores de bit (BER) en función de SNR, pero sólo para 802.11g, sin considerar el impacto del protocolo MAC, ni la coexistencia de las tecnologías 802.11b/g. En [11] realizan un estudio de desempeño de 802.11g a través de mediciones en un ambiente de interiores, presentan resultados de caudal eficaz, pero sólo consideran en su análisis la operación de la WLAN en el modo de protección RTS/CTS, sin evaluar el caso donde no se aplica este mecanismo, y sin ahondar en el estudio de la MAC. En [12] evalúan el desempeño para 802.11b/g, consideran el efecto de escenarios mixtos donde hay estaciones 802.11g y 802.11b, presentan resultados en términos de caudal eficaz, pero en su modelo consideran un escenario donde los efectos debidos al canal radio son prácticamente nulos, tales condiciones difícilmente se presentan en un escenario de operación real de una WLAN. Así también se tienen artículos donde se estudia el desempeño y presentan resultados en función del caudal eficaz, derivados de un proceso de simulación [13], así como resultados en términos de tasa de datos a través de mediciones [14], aunque llevados a cabo para el caso de la tecnología 802.11a, sin tomar en cuenta a 802.11g.

Hay evaluaciones de desempeño donde se incluyen tanto a 802.11g como a 802.11a, tal es el caso de [15], donde llevan a cabo una comparación en ambientes de interiores y exteriores, presentando resultados en función del SNR y la tasa de pérdida de paquetes, pero no realizan un estudio del impacto del protocolo MAC, ni se consideran ambientes de operación mixtos 802.11b/g. Una comparación del desempeño 802.11a/g se presenta en [16], donde analizan la interoperabilidad entre los dispositivos 802.11b/g, consideran las repercusiones del protocolo MAC y del canal radio en la eficiencia de dichas tecnologías, mas en lo que respecta a la PHY, para la evaluación de desempeño no utilizan parámetros reales derivados de mediciones en un escenario físico real en particular, sino utilizan parámetros derivados de simulaciones, donde utilizan técnicas que generalmente involucra incertidumbre, como se describe en [17].

La principal contribución de este trabajo es la incorporación del proceso de desvanecimiento por multitrayectorias como parte de la evaluación de la eficiencia MAC. En este trabajo se considera el mismo escenario de operación para las tecnologías 802.11a y 802.11g y se toman en cuenta parámetros característicos reales del canal radio,

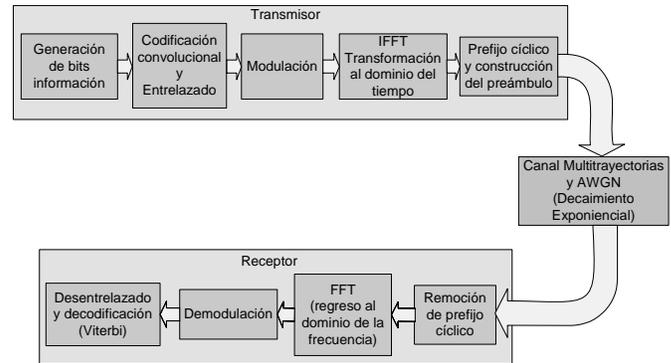


Fig. 2 Diagrama a bloques del sistema de simulación [6].

derivados de mediciones en el sitio de operación, obteniéndose resultados de desempeño en términos de caudal eficaz, tasa de error de paquetes y relación señal a ruido (SNR) para los escenarios que incluyen: WLANs 802.11a (frecuencia de operación a 5 GHz) y 802.11g (frecuencia de operación a 2.4 GHz). De igual forma se consideran escenarios 802.11g homogéneos y heterogéneos dada la capacidad de interoperabilidad entre las tecnologías 802.11b y 802.11g. El escenario homogéneo se refiere a una WLAN conformada solamente por dispositivos 802.11g, mientras en el ambiente heterogéneo se considera una WLAN compuesta por dispositivos 802.11b y 802.11g.

El resto del artículo se organiza de la siguiente forma: el análisis de la eficiencia MAC 802.11a/g sobre un canal inalámbrico con desvanecimientos, se describe en la sección II; la sección III presenta los resultados de desempeño y la discusión de los mismos; finalmente en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA MAC 802.11A/G SOBRE UN CANAL INALÁMBRICO CON DESVANECIMIENTOS

Para el ambiente con desvanecimientos por multitrayectorias se utilizó el simulador de capa PHY elaborado en MatLab por Heiskala y Terry [6], atendiendo a las especificaciones de la capa PHY de los estándares 802.11a/g. El diagrama a bloques del sistema de simulación se muestra en la figura 2, donde se aprecia las etapas de transmisión y recepción que utilizan multicanalización por división de frecuencias ortogonales (OFDM) [18], y una etapa de canal con desvanecimiento por multitrayectorias. Esta última etapa se basa en el modelo recomendado en [19], denominado canal con desvanecimientos Rayleigh con decaimiento exponencial.

En el bloque correspondiente a la transmisión se tiene primeramente una etapa en la que se generan los bits de información en forma aleatoria, y se forman los paquetes de información a transmitir. En la siguiente etapa se introduce un codificador convolucional, aquí se realizan funciones de codificación y de perforado para obtener tasas de codificación de 1/2, 2/3 y 3/4, para posteriormente realizar el entrelazado. La modulación o *mapeo* en alguna combinación especificada de PSK (modulación por cambio de fase) o QAM (modulación por cambio de amplitud y fase) [6], se

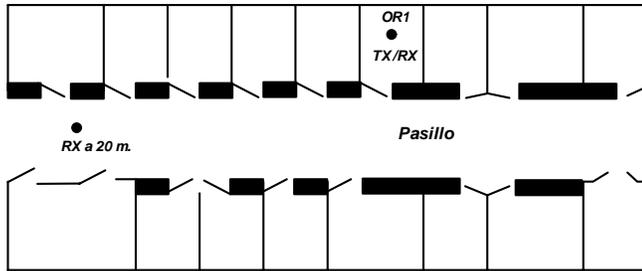


Fig. 3 Croquis de edificio compuesto de oficinas y laboratorios. Escenario con desvanecimientos, considerado en este trabajo [20].

aplica a las subportadoras en otra etapa, y en la siguiente se efectúa la transformación al dominio del tiempo con la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), generándose los símbolos OFDM. Por último se lleva a cabo la construcción del preámbulo y el agregado del prefijo cíclico. En el bloque de recepción se realiza el proceso inverso. Primeramente se remueve el prefijo cíclico y posteriormente se regresa la señal al dominio de la frecuencia al aplicar la transformada rápida de Fourier (FFT). En las siguientes etapas se realiza la demodulación de las subportadoras, el desentrelazado y decodificación [2,19].

El simulador de la PHY 802.11a/g toma varios parámetros como entrada, estos son: la dispersión de retardo RMS, la relación señal a ruido (SNR), el tamaño y número de paquetes a simular, la tasa del código corrector de errores (r), y la técnica de modulación; estos dos últimos parámetros determinan la tasa de transmisión (T_x). Por otro lado, la tasa de error de paquetes (PER) es un parámetro de salida del simulador.

En este trabajo consideramos un ambiente de propagación dentro de un edificio como se muestra en la figura 3; este escenario se describe en [20]. El edificio se compone de múltiples oficinas y algunos laboratorios, y los materiales empleados en el edificio incluyen paredes de ladrillo, tabla-roca y un techo de concreto. El escenario considera una estación WLAN dentro de la oficina OR1 (longitud: 3.6m, anchura: 5m, altura: 3.5m) y otra estación WLAN localizada a 20 m en el pasillo (longitud: 35m, anchura: 3m, altura: 3.5m). Debe notarse que [20] proporciona información acerca de las características de propagación del canal inalámbrico a 2.4 GHz y 4.75 GHz. En consecuencia, los parámetros de propagación del canal inalámbrico proporcionados en [20] pueden ser utilizados para el análisis de las WLANs 802.11a/g, y a 4.75 GHz se consideran como una aproximación al ambiente de operación de una WLAN 802.11a.

II.1 PARÁMETROS DEL SIMULADOR DE CAPA PHY

En esta sección proporcionamos una descripción de los valores de los parámetros de entrada utilizados en el simulador de capa PHY.

A. Tasa de transmisión de datos (T_x)

La combinación de la técnica de modulación y la tasa de codificación puede utilizarse para definir la tasa de

TABLA I.
TÉCNICA DE MODULACIÓN Y TASA DE CÓDIGO CORRECTOR DE ERRORES, CORRESPONDIENTES A LAS DISTINTAS TASAS DE DATOS DE 802.11A/G [2].

Tasa de datos (Mbps)	Modulación	Tasa de código corrector de errores (r)
6	BPSK	1/2
9	BPSK	3/4
12	QPSK	1/2
18	QPSK	3/4
24	16-QAM	1/2
36	16-QAM	3/4
48	64-QAM	2/3
54	64-QAM	3/4

TABLA II.
NIVELES DE POTENCIA DE RECEPCIÓN MÍNIMOS, Y LA CORRESPONDIENTE TASA DE DATOS A LA QUE ES POSIBLE OPERAR CON ESOS NIVELES DE INTENSIDAD [2].

Tasa de datos (Mbps)	Sensibilidad mínima, P_{RX} (dBm)
6	-82
9	-81
12	-79
18	-77
24	-74
36	-70
48	-66
54	-65

transmisión de datos de los dispositivos WLAN. La Tabla I muestra la combinación de la modulación y tasas de codificación que dan origen a las distintas tasas de datos especificadas en los estándares 802.11 a/g [2].

La Tabla II presenta los niveles mínimos de sensibilidad en recepción de la señal (P_{RX}) que permite a un dispositivo 802.11 operar a una determinada tasa de datos, esta información se especifica en el estándar 802.11a [2]. A medida que la intensidad de la señal recibida P_{RX} aumenta, los dispositivos WLAN pueden lograr tasas de transmisión de datos más elevadas; en consecuencia, es posible proporcionar un parámetro de tasa de datos de entrada en el simulador de la PHY, para un determinado nivel de potencia en el receptor P_{RX} . Por lo anterior, la tasa de transmisión de datos se define dentro de la herramienta de simulación de la PHY, especificando una técnica de modulación y la tasa de código corrector de errores correspondiente r .

El nivel de potencia de la señal recibida P_{RX} se obtiene realizando un cálculo de presupuesto de enlace utilizando:

$$P_{RX} = P_{TX} - P_L \quad (1)$$

donde P_{TX} es la potencia de la señal en el transmisor y P_L representa la pérdida por propagación. La Tabla III muestra los niveles de potencia de la señal en el transmisor utilizados en este trabajo; estos niveles de potencia se especifican en [2].

TABLA III.
POTENCIAS DE TRANSMISIÓN ESPECIFICADAS PARA LAS EXTENSIONES
802.11A/G [2].

Potencia de Transmisión (dBm)
16
23
29

TABLA IV.
POTENCIA DE RECEPCIÓN CALCULADA, Y LAS TASAS DE TRANSMISIÓN DE
DATOS CORRESPONDIENTES. SE INCLUYEN LA TASA DE CÓDIGO Y
MODULACIÓN.

Potencia Tx (dBm)	Estándar IEEE	Potencia Rx (dBm)	Tasa de Código y Modulación	Tasa de Datos (Mbps)
29	802.11a	-	64QAM, $r = 3/4$	54
	802.11g	61.69	64QAM, $r = 3/4$	54
23	802.11a	-	16QAM, $r = 3/4$	36
	802.11g	67.70	64QAM, $r = 3/4$	54
16	802.11a	-	QPSK, $r = 3/4$	18
	802.11g	74.69	64QAM, $r = 2/3$	48

La atenuación en la señal P_L se evalúa utilizando un modelo de pérdidas por propagación en interiores [20] definido como:

$$P_L = S_0 + 10a \log_{10}(d) + b \quad (2)$$

donde S_0 es la pérdida por espacio libre a 1 m., a es el exponente de pérdida de potencia, d es la distancia entre el transmisor y receptor, y b es el valor de regresión lineal a 1 m.

La Tabla IV presenta los resultados de P_{RX} y las tasas de transmisión de datos correspondientes para el escenario ilustrado en la figura 3.

B. Relación Señal a Ruido (SNR)

La SNR nos da una idea de la calidad del enlace de comunicaciones, expresándose en (3) como la razón de la potencia de la señal transmitida y la potencia de ruido: [21].

$$SNR = \frac{\text{Potencia Señal}}{\text{Potencia Ruido}} \quad (3)$$

La SNR puede evaluarse en términos de la señal recibida P_{RX} , el ruido presente en el canal (N) y el ruido agregado por

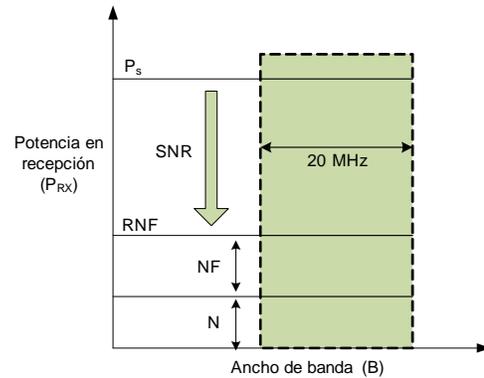


Fig. 4 Comparación de la relación señal a ruido (SNR), ruido del canal (N), factor de ruido (NF) y piso de ruido en receptor (RNF) en el receptor (R_x) [22].

el receptor, también llamado factor de ruido (NF). La suma de N y NF es igual al piso de ruido en el receptor (RNF) y este valor es utilizado como referencia del nivel de potencia para el cálculo de SNR . En el receptor, cualquier señal por encima del nivel de RNF obtiene valores positivos de SNR . La figura 4 ilustra la relación entre SNR , N , NF y RNF [22]. Las expresiones (4) a la (6) se utilizan en el cálculo de SNR [22], [23].

$$SNR = P_{RX} - RNF \quad (4)$$

$$RNF = N + NF \quad (5)$$

$$N = kTB \quad (6)$$

Un valor típico para NF es 10 dB [2]. El ruido N depende del ancho de banda del canal B , k es la constante de Boltzmann y T la temperatura ambiente en Kelvin [23]. La Tabla V presenta los diferentes valores de SNR calculados para los diferentes niveles de potencia en el transmisor, y mostrados en la Tabla III. Se puede observar que en las WLANs 802.11g se logran niveles más altos de SNR para todos los niveles de potencia de transmisión considerados; de ahí que la tecnología 802.11g presente una mejor calidad en el enlace de comunicación. Esta observación puede explicarse por el hecho de que las pérdidas por espacio libre son menores a 2.4 GHz.

C. Dispersión de Retardo RMS

La dispersión de retardo RMS es un parámetro ampliamente utilizado para la caracterización de ambientes que presentan el fenómeno de desvanecimiento por multitrayectorias. Si nos referimos a una señal como un símbolo, la dispersión de retardo se puede definir como el retardo existente, entre el arribo al receptor de un primer eco de un símbolo, y el último eco con amplitud significativa. En un ambiente de oficinas típico, este valor oscila entre 40 y 70 ns [24]. La dispersión de retardo RMS es uno de los parámetros que cuantifica las propiedades dispersivas en el tiempo de los canales que presentan multitrayectorias, y se determina a partir del perfil de retardo de potencia, el cual

TABLA V.
VALORES DE RELACIÓN SEÑAL A RUIDO (SNR), OBTENIDOS PARA LAS TECNOLOGÍAS 802.11A/G, Y LAS TRES POTENCIAS CONSIDERADAS.

Potencia Tx (dBm)	Estándar IEEE	Potencia Rx (dBm)	SNR (dB)	Tasa de Datos (Mbps)
29	802.11a	-61.69	29.28	54
	802.11g	-52.02	38.94	54
23	802.11a	-67.70	23.28	36
	802.11g	-58.02	32.94	54
16	802.11a	-74.69	16.28	18
	802.11g	-65.02	25.94	48

TABLA VI.
VALORES DE DISPERSIÓN DE RETARDO RMS PARA LAS TECNOLOGÍAS 802.11A/G.

Estándar IEEE	Dispersión de Retardo RMS (ns)
802.11g	48.5
802.11a	20.5

resulta de mediciones de la respuesta al impulso del canal [25].

La Tabla VI muestra los valores de dispersión de retardo RMS considerados en este trabajo; estos resultados se tomaron de [20] y se derivan a partir de mediciones reales realizadas directamente en el escenario ilustrado en la figura 3, el cual se considera como el sitio de operación de ambas tecnologías WLANs 802.11a/g. De la Tabla VI es claro que las WLAN 802.11g presentan valores de esparcimiento del retardo RMS mayores en comparación con las observadas en una WLAN 802.11a.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección proporcionamos una descripción de los resultados de desempeño obtenidos para los escenarios WLAN 802.11a y 802.11g.

A. Tasa de error de paquetes PER

La Tabla VII muestra los valores *PER* promedio obtenidos del simulador de capa PHY descrito en la sección II; cada uno de estos resultados se obtuvo al repetir el proceso de simulación en 10 ocasiones, y calculando un valor medio con un intervalo de confianza del 90% [26].

Al comparar ambas tecnologías 802.11a/g, para cada potencia de transmisión en particular tenemos lo siguiente:

Para el caso de la máxima potencia de transmisión ($P_{TX} = 29$ dBm), se observa que las dos tecnologías 802.11a/g operan a una tasa de datos de 54 Mbps, aunque puede verse que en la WLAN 802.11a, la tasa de error de paquete es casi el doble de la *PER* obtenida para la WLAN 802.11g.

En el caso de la potencia media de transmisión ($P_{TX} = 23$ dBm), se aprecian prácticamente el mismo valor de tasa

TABLA VII.
VALORES PROMEDIO DE TASA DE ERROR DE PAQUETE (PER), PARA LOS ESTÁNDARES 802.11A/G, Y LAS TRES POTENCIAS DE TRANSMISIÓN DEFINIDAS.

Potencia Tx (dBm)	Estándar IEEE	PER (promedio)	Tasa de datos
29	802.11g	$0.1462 \pm 1.12 \times 10^{-5}$	54 Mbps 64QAM, r = 2/3
	802.11a	$0.264 \pm 1.77 \times 10^{-5}$	54 Mbps 64QAM, r = 2/3
23	802.11g	$0.3039 \pm 30.95 \times 10^{-5}$	54 Mbps 64QAM, r = 2/3
	802.11a	$0.2785 \pm 0.45 \times 10^{-5}$	36 Mbps 16QAM, r = 3/4
16	802.11g	$0.5532 \pm 1.52 \times 10^{-5}$	48 Mbps 64QAM, r = 2/3
	802.11a	$0.3210 \pm 75.87 \times 10^{-5}$	18 Mbps QPSK, r = 3/4

de error de paquete, en cuanto a la tasa de transmisión de datos, se tiene que los dispositivos 802.11g transmiten a mayor tasa que los dispositivos 802.11a.

Respecto al caso donde se transmite con la mínima potencia ($P_{TX} = 16$ dBm), la tecnología 802.11g logró una mayor tasa de transmisión de datos que la tecnología 802.11a, aunque también obtuvo un nivel de *PER* mucho mayor.

A partir de los resultados de *PER* y tasa de datos de los casos en que las WLAN transmiten a los niveles de potencia de $P_{TX} = 23$ dBm y $P_{TX} = 29$ dBm, se puede inferir que las condiciones del canal radio le son menos favorables a las WLANs 802.11a comparando con las WLANs 802.11g. En el caso particular donde transmiten a la mínima potencia, para hacer la inferencia anterior, hay que apoyarse también de los resultados de la relación señal a ruido (SNR) de la tabla V.

El porqué las WLAN 802.11a presentan desventajas frente a las 802.11g en relación al canal radio, se debe a que la frecuencia de operación es mayor en las WLANs 802.11a, de ahí que la señal transmitida está sujeta a mayor atenuación y a mayor pérdida por propagación. Esta tendencia donde frecuencias mayores sufren mayores pérdidas puede observarse en diferentes publicaciones, tal como en [20] donde realizan mediciones de pérdidas por propagación para distintas frecuencias.

B. Caudal eficaz

TABLA VIII.
EFICIENCIAS MAC PARA ALGUNAS TASAS DE DATOS SOPORTADAS POR LAS
EXTENSIONES 802.11a/G [8].

Tasa de Datos (Mbps)	η_{MAC}
18	$0.86429 - 802.11a/g^1$ $N/D - 802.11g^2$
36	$0.76448 - 802.11a/g^1$ $N/D - 802.11g^2$
48	$0.70983 - 802.11a/g^1$ $0.40275 - 802.11g^2$
54	$0.68534 - 802.11a/g^1$ $0.31042 - 802.11g^2$

¹ WLAN 802.11g Homogénea

² WLAN 802.11g Heterogénea

El caudal de eficaz se obtiene de (7) [16], donde $R_{NOMINAL}$ se refiere a la tasa de datos nominal [2] que se enlista en la Tabla I. La η_{MAC} es la eficiencia normalizada de la capa MAC, que se calculó en [8] considerando una carga útil (MPDU) de 2346 bytes, correspondiente al umbral de fragmentación. La eficiencia también considera los casos de interoperabilidad entre dispositivos 802.11b/g. La Tabla VIII muestra la eficiencia MAC para algunas de las tasas de datos soportadas por 802.11a y 802.11g [27].

$$Caudal\ Eficaz = R_{NOMINAL}(1 - PER)\eta_{MAC} \quad (7)$$

La Tabla IX presenta los resultados de caudal eficaz para los escenarios de la WLAN 802.11a y la WLAN 802.11g homogénea; estos resultado consideran los tres niveles de potencia de la Tabla III. Se puede observar que para ambas tecnologías WLAN se puede alcanzar un caudal eficaz más alto cuando la potencia de transmisión se incrementa. El caudal eficaz más bajo se observa para una WLAN 802.11a, al compararse con un escenario homogéneo WLAN 802.11g; en consecuencia una WLAN homogénea 802.11g presenta un mejor desempeño.

Ahora consideramos una WLAN heterogénea 802.11g; en este escenario la WLAN se compone de dispositivos 802.11b y 802.11g. La Tabla X muestra resultados de desempeño en caudal eficaz para una WLAN 802.11g heterogénea. Debe de notarse que el escenario heterogéneo WLAN 802.11g introduce el mecanismo de protección RTS/CTS para facilitar la interoperabilidad entre los dispositivos 802.11g y 802.11b [4, 8]. Se consideraron tramas RTS/CTS con preámbulo corto, transmitidas a 2 Mbps [8]. De los resultados de la Tabla X, es clara la disminución del caudal eficaz en el escenario heterogéneo WLAN 802.11g, en comparación con los resultados de caudal eficaz obtenidos para una WLAN homogénea 802.11g que se muestran en Tabla IX. La razón es que la eficiencia normalizada es significativamente menor en la WLAN 802.11g heterogénea en comparación con la WLAN 802.11g homogénea [8]. En el caso heterogéneo de la WLAN 802.11g, es necesario introducir las tramas RTS/CTS como mecanismo de protección, y debido a ello, ocurre una disminución en la eficiencia del protocolo MAC.

TABLA IX.
CAUDAL EFICAZ PARA LOS CASOS WLAN 802.11A Y WLAN 802.11G
HOMOGÉNEA, Y LOS TRES NIVELES DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN
CONSIDERADOS.

Potencia Tx (dBm)	Tasa de datos	Estándar IEEE	Caudal Eficaz (Mbps)
29	54 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	802.11a	27.238
	54 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	802.11g	31.597
23	36 Mbps 16QAM, $r = 3/4$	802.11a	19.856
	54 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	802.11g	25.761
16	18 Mbps QPSK, $r = 3/4$	802.11a	10.563
	48 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	802.11g	15.223

TABLA X.
CAUDAL EFICAZ PARA EL CASO WLAN 802.11G HETEROGÉNEA, Y LOS
TRES NIVELES DE POTENCIA DE TRANSMISIÓN CONSIDERADOS.

Potencia Tx (dBm)	Tasa de Datos	Caudal eficaz (Mbps)
29	54 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	14.312
23	54 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	11.668
16	48 Mbps 64QAM, $r = 2/3$	8.637

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un estudio de la eficiencia del protocolo MAC para las WLANs 802.11a/g, incorporando el proceso de desvanecimiento por multitrayectorias a la evaluación de la eficiencia MAC, tomando en cuenta parámetros característicos reales del canal radio, derivados de mediciones en un sitio particular de operación. Para el caso 802.11g la interoperabilidad entre las tecnologías 802.11b/g se considera, al establecer los escenarios 802.11g homogéneo y 802.11g heterogéneo.

De los resultados de simulación, se observa a la tecnología 802.11a más afectada, en relación a la 802.11g, manifestándose en los parámetros de pérdida de paquetes (PER) y/o en el caudal eficaz. Esto se debe a que la frecuencia de operación de 802.11a es mayor a la frecuencia de operación de 802.11g. Es por ello que la señal transmitida por los dispositivos 802.11a es más vulnerable a las condiciones del canal radio, y en consecuencia experimenta mayores pérdidas por propagación.

Haciendo una comparación de desempeño en términos de caudal eficaz, entre las extensiones 802.11a y 802.11g, las WLANs homogéneas 802.11g presentan un mejor desempeño que las WLANs 802.11a; este resultado se observó para todos los niveles de potencia de transmisión considerados. Sin embargo, las WLANs 802.11g deben de poder asegurar compatibilidad con equipos anteriores (i.e. dispositivos 802.11b), debido a esto, las WLANs 802.11g operan generalmente en un ambiente heterogéneo.

Para el escenario 802.11g heterogéneo, los dispositivos 802.11g deben implementar el mecanismo de protección RTS/CTS para proporcionar interoperabilidad con los dispositivos 802.11b. Los resultados de desempeño en términos de caudal eficaz para un ambiente heterogéneo 802.11g, muestran claramente una reducción en comparación con el caso WLAN 802.11g homogéneo.

En este caso se observa que las WLANs 802.11a proporcionan un mejor desempeño que las WLANs heterogéneas 802.11g. En conclusión los dispositivos 802.11g se benefician del hecho de trabajar a una frecuencia de operación más baja (en el intervalo de los 2.4 GHz), sin embargo los dispositivos 802.11g sufren de los requerimientos de interoperabilidad con los dispositivos 802.11b.

Un trabajo a futuro implicará la realización de pruebas de campo, donde se implementen los escenarios de las WLANs 802.11a, 802.11g homogéneo, y 802.11g heterogéneo, con el objetivo de obtener resultados de desempeño, y contrastar los resultados obtenidos en este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std. 802.11-1999, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Reference number ISO/IEC 8802-11:1999(E), IEEE Standard 802.11, 1999.
- [2] IEEE Std. 802.11a, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: High-speed Physical Layer in the 5 GHz Band, IEEE Standard 802.11a, 1999.
- [3] IEEE Std. 802.11b, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer in the 2.4 GHz Band, IEEE Standard 802.11b, 1999.
- [4] IEEE Std. 802.11g, Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer Extensions in the 2.4 GHz Band, IEEE Standard 802.11g, 2003.
- [5] S. Choi y J. del Prado, "802.11g CP: A Solution for IEEE 802.11g and 802.11b Inter-Working", *The 5th IEEE Vehicular Technology Conference*, Korea, 2003, pp. 690-694.
- [6] J. Heiskala, y J. Terry, *OFDM Wireless LANs: A Theoretical and Practical Guide*. Indianapolis, IN: SAMS Publishing, 2002.
- [7] L. Villaseñor-González, C. Portillo-Jiménez y J. Sánchez-García, "A Performance Study of the IEEE 802.11g PHY and MAC Layers over Heterogeneous and Homogeneous WLANs", *Revista de Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. VIII, No. 1, pp. 33-48, 2007.
- [8] C. Portillo, J. C. Cabanillas, y L. A. Villaseñor, "Evaluación Analítica de la Eficiencia del Protocolo MAC en Redes Inalámbricas de Área Local del Tipo 802.11a y 802.11g", *En Decimoséptima reunión de otoño de Comunicaciones, Computación, Electrónica y Exposición Industrial, IEEE ROC&C'*, Acapulco, 2006, pp 1-6.
- [9] G. Bianchi, F. Formisano y D. Giustiniano, "802.11b/g Link Level Measurements for an Outdoor Wireless Campus Network", *IEEE*

Computer Society, International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia, 26-29 June, 2006, 6 pp.

- [10] T.R. Rao, A. Giulietti, "A Performance Study on the 802.11g WLAN OFDM System", *The International Conference on Computer as a Tool*, Belgrade, November 22-24, 2005, pp.128-130.
- [11] M. Boulmalf, H. El-Sayed y A. Soufyane, "Measured Throughput and SNR of IEEE 802.11g in a Small Enterprise Environment", *The 61st IEEE Vehicular Technology Conference*, Stockholm, Sweden, May, 2005.
- [12] S.-C. Wang, Y.-M. Chen, T.-H. Lee and A. Helmy, "Performance Evaluation for Hybrid IEEE 802.11b and 802.11g Wireless Networks", *24th. IEEE International Conference on Performance, Computing, and Communications*, 7-9 April, 2005, pp. 111-118.
- [13] A. N. M. Abdulah, H. Moidnudeen y W. Al-Khateeb, "Scalability and Performance of IEEE 802.11a", *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 1-4 May 2005, pp. 1626-1629.
- [14] M. Mashhour, R. H. M. Hafez y I. Lambadaris, "Measured Performance of Point-to-Point 802.11a", *Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, 6-8 march 2005, pp. 51-55.
- [15] H. Al-Khusaibi, F. Al-Wardi, F. Sawalha and W. Xiang, "Experimental and Analysis on the Comparison of the IEEE 802.11a and 802.11g Wireless Local Area Networks", *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, 7-10 may 2006, pp. 13-16.
- [16] A.S. Doufexi, S. Armour, A. Nix y D. Bull, "An Evaluation of the Performance of IEEE 802.11a and 802.11g Wireless Local Area Networks in Corporate Office Environment", in *IEEE International conference on communications*, 2003, pp. 1196-1200.
- [17] J. Medbo, "Radio Wave Propagation Characteristics at 5 GHz with Modeling Suggestions for HIPERLAN/2", ETSI BRAN 3ERI074A, Jan. 1998.
- [18] R. Van Nee y R. Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communications*, Boston, Artech House, 2000.
- [19] N. Chayat, doc.: IEEE 802.11-98/156r2, IEEE802.11 Wireless LANs, March 1998, 12 pp.
- [20] G.J.M. Janssen, A. Stigter y R. Prasad, "Wideband Indoor Channel Measurements and BER Analysis of Frequency Selective Multipath Channels at 2.4, 4.75, and 11.5 GHz", *IEEE Transaction on communications*, vol. 44, No. 10, pp. 1272-1288, 1996.
- [21] B. Sklar, *Digital Communications; fundamentals and applications*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2001.
- [22] J. Zyren, y A. Petrick, "Tutorial on Basic Link Budget Analysis", *Intersil Applications Note*, 1998, pp.1-5.
- [23] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. Naucalpan de Juárez: Pearson, 2003.
- [24] M.S. Gast, *802.11 Wireless Networks, The definitive Guide*. Sebastopol, CA: O'Reilly, 2002.
- [25] T.S. Rappaport, *Wireless Communications, Principles and Practice*. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 1999.
- [26] A. M. Law, *Simulation Modeling and Analysis*. New York : McGraw-Hill, 2000.
- [27] C. Portillo, "Evaluación del Rendimiento de los Estándares IEEE 802.11a e IEEE 802.11g para Redes Locales Inalámbricas, en Presencia de Desvanecimiento por Multitrayectorias", Tesis de Maestría en Ciencias, Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones, CICESE, México, 2004.



Portillo J. Canek Nació en Culiacán, Sinaloa, México en 1980. Recibió el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el CICESE, Ensenada, Baja California, México (2004). Se graduó de Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México (2002).

Ha sido profesor en el Departamento de Informática de la Universidad Politécnica de Sinaloa, y en el Departamento de Ingeniería en Sistemas Computacionales en la Universidad del Golfo de México. Actualmente es Profesor y Jefe de Carrera de la Licenciatura en Ingeniería en Procesos Industriales de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa, México. Sus intereses de investigación incluyen el análisis y evaluación del desempeño de las redes inalámbricas de área local, y los sistemas OFDM.



Villaseñor G. Luis A. Recibió el grado de Ingeniero Electrónico por parte de la UABC, Ensenada, Baja California, México (1993); El grado de Maestro en Ciencias por el CICESE, Ensenada, Baja California, México (1997); y el grado de Doctor (PhD) en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Ottawa, Canadá (2002).

Ha colaborado como Ingeniero Investigador en Redes en el Centro de Investigación en Comunicaciones (Communications Research Centre, CRC) en Ottawa, Canadá. En el CRC, entre 1999 y 2003, estuvo participando en diversas actividades de investigación en tecnologías de redes para el Gobierno de Canadá. Actualmente es Profesor Investigador Asociado en el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México. Sus intereses de investigación actuales incluyen redes Móviles Ad-hoc, redes de comunicaciones inalámbricas, arquitecturas de protocolos de calidad de servicio (QoS), análisis de desempeño y evaluación de tecnologías de Internet y redes de computadoras.

El Doctor Villaseñor es miembro del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE).



Cabanillas N. Juan C. Nació en Culiacán, Sinaloa, México en 1979. Recibió el grado de Maestro en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones por el CICESE, Ensenada, Baja California, México (2004). Se graduó de Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de Culiacán, Culiacán, Sinaloa, México (2002).

Ha sido profesor de tiempo completo en el Departamento de Ingeniería en Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Sinaloa (UPSIN). Actualmente labora como Profesor en el Departamento de Eléctrica Electrónica del Instituto Tecnológico de Culiacán. Sus áreas de investigación incluyen los sistemas de comunicaciones satelitales, redes inalámbricas y radio frecuencia.