

Analysis of the Geographical-Information Impact on the Performance of ABS-CRE HetNets

N. Torres-Cruz, *Member, IEEE*, I. Villordo-Jimenez, *Member, IEEE*, and A. Montiel-Saavedra

Abstract—In this paper, we analyze the performance of Heterogeneous Networks (HetNets) that are operating under Almost Blank Subframes (ABS) and Cell Range Expansion (CRE) by taking into consideration the effect of geographical information. In order to achieve such analyses, we develop a simulator that incorporates data from a Geographic Information System (GIS); specifically, a set of parameters that define the morphology of buildings and streets in urban areas. We describe the implemented methods to estimate the received power, as well as the average throughput, over an area of interest. Our numerical results clearly demonstrate that the overall network performance significantly depends on geographical information; hence our main contribution consists in developing a simulator that incorporates such information in the analysis and evaluation of ABS-CRE HetNets, which allows proposing design guidelines to improve the performance of these networks in realistic scenarios. To the best of our knowledge, this kind of proposal has not been reported in previous works.

Index Terms—Heterogeneous Networks (HetNets), Almost Blank Subframes (ABS), Cell Range Expansion (CRE), System Level Simulation, Geographic Information System (GIS), COST-231 Walfisch-Ikegami.

I. INTRODUCCIÓN

RECIENTEMENTE, las redes heterogéneas (HetNets - *Heterogeneous Networks*) han sido ampliamente analizadas, ya que se son fundamentales en la implementación de las redes móviles de Quinta Generación (5G) [1]. En una HetNet existen áreas en las que se superpone la cobertura provista por una Estación Base (EB) que transmite a alta potencia (cuya cobertura es denominada macrocelda) con la cobertura provista por múltiples EB que transmiten a baja potencia (por ejemplo, picoceldas), como se ilustra en la Fig. 1.

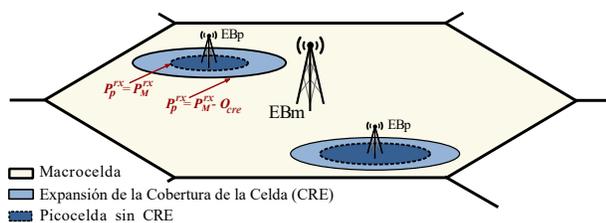


Fig. 1. Macrocela y picoceldas en una HetNet.

La principal ventaja de las HetNets es que por medio de las picoceldas se pueden ofrecer altas tasas de descarga en

Noé Torres-Cruz, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, México, ntorresc@ipn.mx.

Iclia Villordo-Jimenez, UPIITA, Instituto Politécnico Nacional, México, ivillordo@ipn.mx.

Arturo Montiel-Saavedra, Teleworx, México, arturoms92@hotmail.com.

Corresponding author: Noé Torres-Cruz

zonas con gran densidad de usuarios (*hotspots*), sin generar demasiada interferencia en el resto del sistema. Sin embargo, en estas redes es necesario definir estrategias que coordinen la asignación de los recursos (potencia de transmisión y ancho de banda) entre macroceldas y picoceldas y que a la vez mejoren su desempeño, evaluado en términos del *throughput* promedio.

En este trabajo, se analiza el enlace de bajada de una HetNet con Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) y en la que macroceldas y picoceldas operan en la misma banda de frecuencias. En este escenario, una de las técnicas diseñadas para coordinar el uso del ancho de banda es Sub-tramas Casi Vacías (ABS - *Almost Blank Subframes*).

En ABS, una porción de las sub-tramas es reservada para transmitir exclusivamente desde las EB de las picoceldas (EBp). Con ello se evita que las capacidades de las EBp sean limitadas por la interferencia de la EB de la macrocelda (EBm). Para balancear la carga de tráfico entre las EBp y la EBm, ABS suele implementarse en conjunto con Expansión de la Cobertura de la Celda (CRE - *Cell Range Expansion*).

La idea principal en CRE es que un Equipo de Usuario (EU) debe ser asociado a la EBp, siempre y cuando se cumpla que $P_p^{rx} \geq P_m^{rx} - O_{cre}$; donde P_p^{rx} y P_m^{rx} son las potencias recibidas desde la EBp y la EBm, respectivamente, y O_{cre} es un valor de *offset* que controla qué tanto se expande el área de cobertura de la picocelda (véase la Fig. 1).

La implementación de ABS y CRE provee un sistema muy flexible, pues ABS permite controlar la cantidad de recursos y CRE la intensidad de tráfico en cada una de las EB; sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, los trabajos que han analizado a estas estrategias sólo lo hacen con modelos de propagación estadísticos [2]-[10]. Por otra parte, aunque se identificaron trabajos de investigación como [14], [15], [16] y de software propietario como [18]-[20] que incorporan información geográfica en el análisis de redes celulares 4G y 5G, hasta donde se tiene conocimiento, éstos no soportan las técnicas ABS y CRE. Debido a lo anterior, en este trabajo se analiza el desempeño de HetNets que utilizan dichas técnicas, considerando modelos de propagación que incorporan información geográfica.

Para realizar los análisis mencionados, se desarrolló un simulador que utiliza datos provenientes de un Sistema de Información Geográfica (GIS - *Geographical Information System*) y que son traducidos en parámetros propios de un modelo de propagación utilizado. Uno de los aspectos del simulador que se describen detalladamente en este artículo es la metodología requerida para llevar a cabo dicha traducción, así como su aplicación en el análisis de cobertura. En particular, en este trabajo se utiliza el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami [24], debido

al compromiso que presenta entre complejidad y precisión; sin embargo la metodología descrita es aplicable a otros modelos que dependan de parámetros similares a los evaluados. Este análisis de cobertura se complementa con la simulación de descarga de paquetes de datos y con base en ello se evalúa el *throughput* promedio en cada una de las regiones propias de las HetNets con ABS-CRE. Los resultados obtenidos muestran que la información geográfica afecta significativamente el desempeño de la HetNet.

Considerando lo anterior, la aportación principal de este trabajo es el desarrollo de un simulador que, con base en un SIG, permite evaluar el desempeño de una HetNet con ABS-CRE en un escenario real específico. Puesto que el desempeño es altamente dependiente de la información geográfica, las evaluaciones mencionadas pueden usarse para proponer configuraciones (en términos de la ubicación de EB y de los parámetros de ABS-CRE) que mejoren el desempeño de la red. Hasta donde se tiene conocimiento, lo anterior no es factible con los análisis propuestos en trabajos previos.

El resto de este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se resumen algunos trabajos relacionados; en la Sección III se presentan las principales características del simulador; en la Sección IV se describe el modelo de propagación y la metodología utilizada para la conversión de datos del SIG en parámetros de este modelo; en la Sección V se describe el cálculo del *throughput* promedio del sistema y en la Sección VI se discuten los resultados obtenidos.

II. TRABAJO RELACIONADO

Existe una gran variedad de trabajos enfocados a evaluar el desempeño de ABS y CRE en HetNets [2]-[10]. En [2] se propone un algoritmo para optimizar conjuntamente la asociación usuarios-EB y el número de ABS. En [3] los autores se enfocan en incrementar el *throughput* promedio a través de un esquema de selección de celda que depende de la tasa de usuarios esperados y el radio de ABS. En [4] se presenta un algoritmo distribuido, basado en la teoría de juegos, que en función de los parámetros de ABS y CRE optimiza la eficiencia espectral, la eficiencia energética y la justicia en las tasas de datos asignadas a los EU.

Además, en [5], se desarrolla un análisis por medio de simulaciones en MATLAB y se concluye que los parámetros de ABS y CRE deben ajustarse en función de la carga del sistema para maximizar el *throughput*. Esta idea también es considerada en [6], pero además se propone un esquema de selección de celdas que permite hacer los ajustes antes mencionados dinámicamente. En [7], además de establecer guías de diseño para la selección de los parámetros de ABS y CRE, se determina el número de picoceldas que provee el mejor desempeño del sistema. En [8] también se proponen dos algoritmos para asociar EU a las diferentes EB de la HetNet, con la finalidad de balancear las cargas entre ellas.

Adicionalmente, en [9] se propone que no solo las EBm utilicen ABS, sino que las EBp también apliquen esta estrategia con la finalidad de proporcionar recursos libres de interferencias. Para lograrlo, ambos tipos de celdas se coordinan considerando una función de utilidad que maximiza la

tasa de bits de todos los EU del sistema. En [10] se presenta un algoritmo de optimización estocástico que se aplica para encontrar la configuración de ABS-CRE adecuada en función de cambios en las condiciones de la red, tal como el tráfico o la distribución de los usuarios.

Se debe enfatizar que en los trabajos mencionados sólo se usan modelos de propagación estadísticos o sólo se toman en cuenta pérdidas por distancia, mientras que en este artículo se considera un modelo que contempla los efectos de la urbanización. Sin embargo, los esquemas descritos en esos trabajos podrían incorporarse al simulador que aquí se reporta, es decir, podrían ser complementarios.

Por otra parte, se identificó que en la literatura existen múltiples trabajos que incorporan información geográfica en el análisis de redes inalámbricas [11]-[17], sin embargo, sólo [14]-[17] están enfocados al análisis de redes celulares.

En particular, en [14] se desarrolla un software que incluye una base de datos estructural del sitio de medición en dos ciudades brasileñas, el cual fue realizado con la herramienta de regla de Google Earth. De esta manera, con el software se valida el modelo de propagación determinístico propuesto, considerando elementos urbanos como la estructura de las avenidas, los edificios y los efectos de difracción generados en ellas. A diferencia de la presente propuesta, en [14] no se considera el análisis de *throughput* ni se analizan HetNets.

En [15], [16] se proponen simuladores que operan en un escenario geográfico sintético que cuenta, entre otras características, con diversos modelos de propagación (incluyendo COST-231), esquemas de calendarización y movilidad de los usuarios. Particularmente, en [15] se puede evaluar el desempeño de la red en términos de la Relación Señal a Interferencia más Ruido (SINR - *Signal to Interference plus Noise Ratio*) y la eficiencia espectral, mientras que en [16], además de los parámetros anteriores, se puede evaluar el *throughput*, la tasa de bit erróneo y la tasa de trama errónea. Ninguno de estos simuladores incluyen el análisis de ABS-CRE.

En [17] se presenta una adaptación del simulador desarrollado en [16], en la que se agrega el análisis de ABS-CRE y se evalúan parámetros similares a los evaluados en este artículo (potencia recibida, número de usuarios por región, *throughput*). Sin embargo, los resultados y análisis presentados se obtuvieron sin considerar información de urbanización, por lo que no es posible realmente evaluar los efectos de la información geográfica en la HetNet.

Finalmente, en [18], [19], [20] se presentan herramientas de software propietario que simulan redes celulares heterogéneas 4G y 5G; sin embargo, hasta donde se tiene conocimiento, en estas herramientas sólo se asigna una porción diferente del ancho de banda a cada celda pequeña simulada, por lo que no permiten el análisis de ABS-CRE.

Los párrafos anteriores muestran que aunque existen trabajos que evalúan redes celulares en escenarios específicos y trabajos que evalúan sistemas que operan con ABS-CRE, hasta donde se tiene conocimiento, no existen propuestas que integren ambas situaciones. Por lo tanto, la principal contribución de este artículo es la evaluación del desempeño de HetNets con ABS-CRE en escenarios más realistas que sus

predecesores, lo que se consigue mediante el uso de un simulador que incorpora información geográfica. Esta evaluación de desempeño, a su vez, permite proponer guías de diseño que mejoran el desempeño de los sistemas analizados, lo cual es otra contribución de este trabajo.

III. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SIMULADOR

El simulador está constituido por tres capas: datos, aplicación y presentación. Las capas de aplicación y presentación están programadas en Java y la capa de datos opera con el gestor de base de datos (BD) PostgreSQL, haciendo uso de la extensión espacial PostGIS. La interconexión entre las capas de aplicación y de datos ocurre a través de la Conectividad a Base de Datos de Java (JDBC - *Java Database Connectivity*).

Debido a los objetivos del presente artículo, de entre todas las funciones del sistema sólo se describen aquellas que están relacionadas a la simulación de la propagación y la transmisión de paquetes, las cuales se ilustran en la Fig. 2.

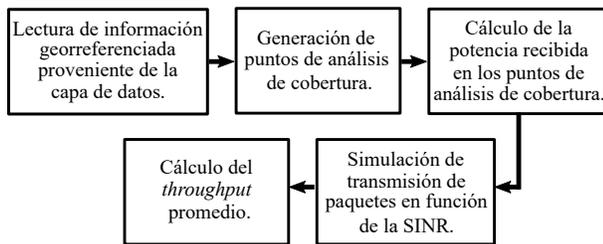


Fig. 2. Principales funciones para la simulación de la propagación y el cálculo del *throughput* promedio.

La información georreferenciada que se obtiene de la capa de datos son edificios, manzanas y vialidades, representadas en un mapa digital a través de poliedros, polígonos y líneas, respectivamente. Esta información puede pertenecer a cualquier área geográfica del mundo, siempre y cuando de haya cargado la BD correspondiente. A partir de estos datos se identifican las áreas exteriores a edificios y en ellas se crea un conjunto de puntos uniformemente distribuidos. En cada uno de estos puntos se analizará la cobertura, es decir, se calcula la potencia recibida de las EB. En la Sección IV se presentan los cálculos implementados para evaluar la cobertura que se acaba de describir.

Con la finalidad de reducir la carga computacional del sistema, las operaciones espaciales fueron programadas en SQL (PostGis), de esta manera, el motor de la BD se encarga de las tareas que involucran tales operaciones, sin la necesidad de transacciones entre la aplicación Java y la BD. Además, se implementaron técnicas que, de acuerdo a nuestras observaciones, disminuyen el tiempo de ejecución de este módulo. Por ejemplo, se observó que éste se reduce, si en lugar de ejecutar una gran cantidad de consultas simples, se integran múltiples procesos y se realizan pocas consultas más complejas.

Tras llevar a cabo el cálculo de cobertura, el simulador aleatoriamente ubica EU en algunos de los puntos de análisis y simula la transmisión de paquetes desde las EB hacia dichos puntos, considerando un *scheduler* de Justicia Proporcional (JP) [21], [22]. En general, las ubicaciones de los EU están uniformemente distribuidos en el área de cobertura, pero el

simulador también permite la creación de *hotspots*, que son áreas donde se conserva la distribución uniforme de EU, pero con una mayor densidad por unidad de área. En la Sección V se describen los detalles de esta simulación, así como del cálculo del *throughput* promedio asociado a ella. Cabe mencionar, que la transmisión de paquetes se simula mediante eventos discretos (sólo se simulan los instantes en que ocurren eventos que alteran el estado del sistema), por lo que este módulo es altamente eficiente en términos computacionales.

Finalmente, es interesante mencionar que el simulador permite configurar parámetros de entrada como la ubicación, altura y potencia de transmisión de EB, así como la densidad de EU por unidad de área, el *offset* de CRE y el número de ranuras en modo ABS.

IV. ANÁLISIS DE COBERTURA BASADO EN EL MODELO COST-231 WALFISCH-IKEGAMI

A. Descripción del Modelo de Propagación

Para simular la propagación de señales se utiliza el modelo COST-231 Walfisch-Ikegami, ya que presenta un excelente compromiso entre complejidad y precisión y permite ilustrar claramente la metodología para convertir la información geográfica (particularmente, la morfología de edificios y vialidades) en parámetros que afectan la potencia recibida en un punto específico. Este modelo está diseñado para operar en las siguientes condiciones:

- Áreas exteriores. Se considera que la señal se recibe a través de línea directa y difracciones por encima de los techos, por lo que se desprecian las pérdidas por penetración de muros y el modelo es particularmente preciso si la altura de la antena transmisora es mayor que las alturas de los edificios.
- Terrenos donde las variaciones de elevación no sean significativas (menores a 10 m)¹.
- Frecuencias entre 800 a 2,000 MHz².

Las evaluaciones llevadas a cabo en este artículo se limitan a escenarios que satisfacen las condiciones ya mencionadas.

A continuación, se describe brevemente este modelo. Dicha descripción está basada en [24] y para una interpretación más amplia se recomienda esta misma referencia.

Como se muestra en la Fig. 3, los elementos morfológicos que se requieren para implementar este modelo son la distancia entre la EB y el EU (d), la altura promedio de los edificios (h), el ancho de la calle en que se ubica el EU (w), la separación promedio entre edificios (b) y la orientación de la calle con respecto a la línea que une a la EB con el EU (φ). Más adelante se describe cómo obtener a todos estos parámetros a partir de la información de edificios, manzanas y vialidades que se mencionaron en la sección anterior.

Además de los parámetros enlistados en el párrafo anterior, el modelo también depende de las alturas a las que se colocan las antenas de la EB (h_b) y del EU (h_m).

¹Para terrenos donde esta condición no se cumple, se sugieren otros modelos, por ejemplo [31].

²Aunque este intervalo no representa todo el espectro que se utilizará en 5G, seguirá siendo una porción muy importante del mismo, según [29], [30].

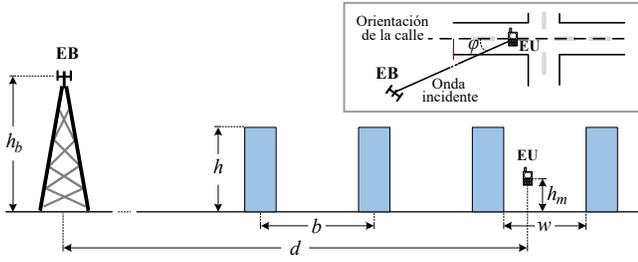


Fig. 3. Parámetros morfológicos del modelo: vista lateral y vista superior.

Este modelo contempla que el cálculo de las pérdidas debe ser diferente, si existe o no línea de vista (*LOS - Line-of-sight*). En el primer caso, las pérdidas en decibelios (dB) se calculan por medio de

$$L_b = 42.6 + 26 \log d + 20 \log f \quad (d \geq 20 \text{ m}), \quad (1)$$

donde f es la frecuencia de transmisión en MHz.

Si no existe línea de vista, las pérdidas están dadas por:

$$L_b = \begin{cases} L_o + L_{rts} + L_{msd}; & L_{rts} + L_{msd} > 0 \\ L_o; & L_{rts} + L_{msd} < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Donde L_o representa las pérdidas por espacio libre, L_{rts} las pérdidas por dispersión y por difracción en los techos de los edificios y L_{msd} las pérdidas por la difracción final que permite a la onda propagarse hacia la calle. Dichas cantidades se obtienen mediante:

$$L_o = 32.44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (d \geq 20 \text{ m}) \quad (3)$$

$$L_{rts} = -16.9 - 10 \log w + 10 \log f + 20 \log(h - h_m) + L_{ori} \quad (4)$$

$$L_{msd} = L_{bsh} + k_a + k_d \log d + k_f \log f - 9 \log b \quad (5)$$

Donde L_{ori} representa las pérdidas que dependen de la orientación de la calle (véase la Fig. 3) y están dadas por:

$$L_{ori} = \begin{cases} -10 + 0.354\varphi; & 0^\circ \leq \varphi < 35^\circ \\ 2.5 + 0.075(\varphi - 35); & 35^\circ \leq \varphi < 55^\circ \\ 4.0 - 0.114(\varphi - 55); & 55^\circ \leq \varphi < 90^\circ. \end{cases} \quad (6)$$

Además, L_{bsh} , k_a , k_d y k_f están dados por:

$$L_{bsh} = \begin{cases} -18 \log[1 + (h_b - h)]; & h_b > h \\ 0; & h_b \leq h \end{cases} \quad (7)$$

$$k_a = \begin{cases} 54; & h_b > h \\ 54 - 0.8(h_b - h); & h_b \leq h \text{ y } d \geq 0.5 \text{ km} \\ 54 - 0.8(h_b - h) \frac{d}{0.5}; & h_b \leq h \text{ y } d < 0.5 \text{ km} \end{cases} \quad (8)$$

$$k_d = \begin{cases} 18; & h_b > h \\ 18 - 15 \frac{(h_b - h)}{h}; & h_b \leq h \end{cases} \quad (9)$$

$$k_f = -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) \quad (10)$$

B. Conversión de Datos del SIG a Parámetros del Modelo de Propagación

Para evaluar a las ecuaciones anteriores, en el simulador se construye, para cada punto de análisis, la recta en el espacio tridimensional (definida por su latitud, longitud y elevación) que une a las antenas de la EB y de un EU ubicado en ese punto. Dicha recta es denotada por l_t , como se muestra en la Fig. 4. Además, se construye la proyección de l_t sobre el plano horizontal, a esta recta se le denota por l_b . Si se denota con C y D a los puntos en el plano horizontal en que se encuentran la EB y el EU, respectivamente, se puede decir que $l_b = \overline{CD}$.

Una vez que se ha obtenido a la recta l_b , se identifica al conjunto de manzanas que se intersecan con ella, y al que se le denomina M . Posteriormente, se identifican a todos los edificios pertenecientes a M , cuya base se interseca con l_b ; a este conjunto de poliedros se le denomina E . A los elementos de E , ordenados de acuerdo a su cercanía con C , se les denota como E_k , para $k \in \{1, \dots, K\}$. Además, se define al polígono B_k como la base del poliedro E_k .

Con base en los elementos geométricos que se acaban de describir es posible calcular los parámetros del modelo, tal como se describe a continuación.

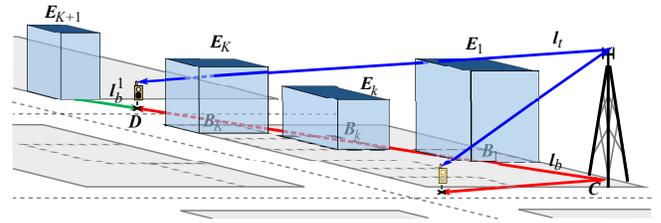


Fig. 4. Elementos geométricos utilizados para el cálculo de los parámetros del modelo de propagación.

La distancia que separa al transmisor del receptor se calcula simplemente como $d = |l_b|$.

Para determinar si existe o no línea de vista, se define a la variable booleana LOS . Si ninguno de los poliedros que pertenecen a E se interseca con l_t , entonces se declara $LOS = true$ y las pérdidas se calculan de acuerdo a (1). En caso contrario se declara $LOS = false$ y se calculan los parámetros adicionales que se requieren para evaluar (2)-(10), según se describe a continuación.

La altura promedio de los edificios es $h = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K h_k$, donde h_k es la altura del poliedro E_k .

Para determinar la separación promedio entre edificios (b), se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- 1: $\{O_1, F_1\} \leftarrow$ Intersecciones de l_b con B_1
- 2: **for** $k = 2 \rightarrow K$ **do**
- 3: $\{O_k, F_k\} \leftarrow$ Intersecciones de l_b con B_k
- 4: $b_{k-1} \leftarrow |F_{k-1}, O_k|$
- 5: **end for**
- 6: **return** $b \leftarrow \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^{K-1} b_k$

El cálculo de w , requiere identificar al poliedro (edificio) que se encuentra más cercano al punto de análisis y que no pertenece a E , al cual se le denomina E_{K+1} . Para lograr lo

anterior, se rota 180° a l_b y a la nueva recta que se genera se le denomina l_b^1 (ver Fig. 4); posteriormente se llevan a cabo las siguientes operaciones:

- 1: $\{O_K, F_K\} \leftarrow$ Intersecciones de l_b con B_K
- 2: $\{O_{K+1}, F_{K+1}\} \leftarrow$ Intersecciones de l_b^1 con B_{K+1}
- 3: **return** $w \leftarrow |F_K, O_{K+1}|$

El cálculo del ángulo de orientación del enlace (φ) requiere que se identifique a la vialidad más cercana al punto de cobertura analizado y que se estime el ángulo entre dicha vialidad y la línea l_b . Para lograr lo anterior, se denota con V al conjunto de rectas que definen a las vialidades dentro del sector en que se encuentra dicho punto (con la finalidad de reducir el número de búsquedas, los puntos de interés están agrupados en sectores); a cada elemento de V se le denomina v_n , para $n \in \{1, \dots, N\}$; y se ejecutan las siguientes operaciones:

- 1: **for** $n = 1 \rightarrow N$ **do**
- 2: $v_n^1 \leftarrow$ Perpendicular a v_n que termina en D
- 3: **end for**
- 4: $m = \operatorname{argmin}_n \{|v_n^1|\}$ \triangleright Vialidad más cercana a B
- 5: **return** $\varphi \leftarrow$ Ángulo entre v_m^1 y l_b

La implementación de los cálculos previos permite obtener todos los parámetros que se requieren para evaluar a (1) – (10) y por lo tanto obtener la potencia que se recibe en cada uno de los puntos de análisis de cobertura. También se debe resaltar que dichos cálculos pueden utilizarse para otros modelos de propagación que utilicen parámetros similares a COST231-Walfisch-Ikegami.

V. CÁLCULO DEL THROUGHPUT PROMEDIO DEL SISTEMA

A partir de los cálculos de cobertura descritos en la sección anterior, es posible determinar la SINR para cada EU y por lo tanto determinar su máxima tasa de transmisión. Para establecer la relación entre estos dos parámetros, algunas referencias, incluyendo modelos de simulación de la 3GPP [23], sugieren utilizar directamente el teorema de Shannon; sin embargo, en este trabajo, se optó por mapear la SINR de los EU a alguna de las posibles tasas de transmisión definidas en estándares, tal como se propone en [22]. En particular, se utilizan las definiciones del estándar 3GPP TS36.213 v10.1.0 (LTE), mostradas en la Tabla I y que garantizan un valor objetivo de Tasa de Bit Erróneo (BER - *Bit Error Rate*) [27].

Una vez que se estiman las tasas de transmisión de cada usuario, es posible simular la transmisión de paquetes de acuerdo a un *scheduler* de JP.

Se debe recordar que en un sistema ABS-CRE, los usuarios deben ser asociados a alguna de las tres áreas de cobertura que se muestran en la Fig. 1, en función de las potencias que reciben de la EBm y de la Ebp, denotadas por P_M^{rx} y P_p^{rx} , respectivamente. Un usuario es asociado a la macrocelda si, $P_p^{rx} < P_M^{rx} - O_{cre}$ y son atendidos únicamente durante las ranuras sin ABS; un usuario se asigna a la cobertura expandida de la picocelda, si $P_M^{rx} - O_{cre} \leq P_p^{rx} < P_M^{rx}$ y es atendido solamente durante las ranuras con ABS; finalmente, un usuario se asigna a la cobertura de la picocelda sin expansión, si

TABLA I
RELACIÓN ENTRE SINR Y LA TASA DE TRANSMISIÓN [27]

SINR mínima	Modulación	Tasa de transmisión (kbps)
-7.28	QPSK	19.1898
-4.78	QPSK	29.5344
-2.04	QPSK	47.502
0.66	QPSK	75.8016
2.84	QPSK	110.502
4.73	QPSK	148.1508
6.38	16 QAM	186.0516
8.78	16 QAM	241.1766
11.49	16 QAM	303.1938
13.27	64 QAM	344.043
16.52	64 QAM	418.6098
19.71	64 QAM	491.6898
23.12	64 QAM	569.9484
26.37	64 QAM	644.5152
28.79	64 QAM	699.8922

$P_p^{rx} \geq P_M^{rx}$ y es atendido sólo durante las ranuras sin ABS [25], [26].

Además, se denota con P_M^{tx} y P_p^{tx} a las potencias de transmisión de una macro y de una picocelda, respectivamente; y con $L_j^{(i)}$ a las pérdidas entre el usuario de interés j y la macrocelda i . Se identifica con $i = 0$ a la macrocelda de análisis y se considera la existencia de I macroceldas interferentes. También se asume que la interferencia entre picoceldas es despreciable (debido a la baja potencia con que transmiten) y se define como $L_j^{(p)}$ a las pérdidas entre una picocelda y el usuario j . De acuerdo a lo anterior, la SINR para los diferentes grupos de usuarios está dada por:

$$\text{SINR}_M = \frac{P_M^{tx} L_j^{(0)}}{P_M^{tx} \sum_{i=1}^I L_j^{(i)} + P_p^{tx} L_j^{(p)} + N_0} \quad (11)$$

$$\text{SINR}_{p,CRE} = \frac{P_p^{tx} L_j^{(p)}}{k P_M^{tx} \sum_{i=0}^I L_j^{(i)} + N_0} \quad (12)$$

$$\text{SINR}_p = \frac{P_p^{tx} L_j^{(p)}}{P_M^{tx} \sum_{i=0}^I L_j^{(i)} + N_0} \quad (13)$$

donde k es la proporción de P_M^{tx} con que la EBm transmite durante las ranuras en ABS y N_0 es la densidad espectral de ruido. Se debe enfatizar que los cálculos de $L_j^{(i)}$ y $L_j^{(p)}$ se obtienen de acuerdo a los procedimientos descritos en la Sección IV.

Por otra parte, a partir del cálculo de la SINR del usuario j es posible determinar su tasa de transmisión, de acuerdo a la Tabla I. A la tasa de transmisión durante la ranura t , se le denota como $R_j(t)$.

En la implementación del *scheduler* de JP se requiere conocer, además de $R_j(t)$, a la tasa de transmisión promedio durante las últimas S ranuras. A esta tasa se le denota como $\bar{R}_j(t)$ y se calcula de acuerdo a:

$$\bar{R}_j(t) = \frac{S-1}{S} \bar{R}_j(t-1) + \frac{1}{S} R_j(t) \quad (14)$$

TABLA II
PARÁMETROS DEL SISTEMA

	Parámetros	Valor
	Frecuencia de operación	1,960 MHz
	Ancho de banda	180 kHz
Macrocelda	Potencia de tx en sub-tramas no ABS	46 dBm
	Potencia de tx en sub-tramas ABS	36 dBm
	Altura de la EBm	30 m
	Ganancia de la antena	14 dBi
Píccocelda	Potencia de tx	24 dBm
	Altura de la EBp	10 m
	Ganancia de la antena	4 dBi
	Número total de sub-tramas	10
	Número de sub-tramas en ABS	1-4
	Offset del CRE	3-12 dB
	<i>Scheduler</i>	JP

En un *scheduler* de JP, en cada ranura, el canal es asignado al usuario identificado con el índice $k(t)$, el cuál se obtiene mediante la operación:

$$k(t) = \underset{j}{\operatorname{argmax}} \left\{ \frac{R_j(t)}{R_j(t)} \right\} \quad (15)$$

Entonces, de acuerdo a (14)-(15), el *throughput* promedio asignado por un *scheduler*, durante un intervalo de simulación de T ranuras, está dado por:

$$Th = \frac{1}{T} \sum_{t=0}^{T-1} R_{k(t)}(t) \quad (16)$$

Al igual que en [21], se asume que en cada una de las áreas de cobertura se ejecuta un *scheduler* independiente con las sub-tramas que tiene asignadas; por ejemplo, se ejecuta un *scheduler* para los usuarios en la región expandida de la píccocelda, utilizando las sub-tramas en ABS. Es decir, en cada área se evalúa de manera independiente a (14)-(16).

También es importante mencionar que para calcular el *throughput*, el simulador:

- Permite la inclusión de *hotspots*, a los que se les puede configurar ubicación, área y densidad.
- Utiliza el modelo de tráfico de *buffer* lleno (los EU siempre tienen paquetes para transmitir).
- Considera que los EU no tienen movilidad.

VI. RESULTADOS NUMÉRICOS Y DISCUSIÓN

Para llevar a cabo las evaluaciones reportadas en esta sección, se simuló la cobertura de una EBm y una EBp sobre una zona urbanizada del norte de la Ciudad de México, cuya coordenada central es $99^{\circ}7'54.22''\text{O}$, $19^{\circ}29'14.48''\text{N}$, su área es de 1.6 km^2 y cuya elevación oscila entre 2,234 y 2,236 metros sobre el nivel del mar ³.

La simulación incluye un *hotspot*, con un radio de 150 m y en el centro del cual se ubica a la EBp (a menos que se indique lo contrario). Los parámetros de operación de la red simulada se muestran en la Tabla II.

³Aunque el modelo utilizado no considera estas variaciones de altitud, los errores introducidos se pueden despreciar, ya que el intervalo de variación es pequeño en comparación con las alturas de edificios y EB.

Aunque sólo se reportan evaluaciones con dos EB, el simulador puede ser escalado a un número mayor de ellas. En ese escenario, se requeriría calcular la potencia recibida desde cada EB, lo cual modificaría los cálculos de SINR descritos en (11)-(13). En ese caso, se espera que, en general, los valores de SINR se reduzcan debido al incremento de la interferencia.

La duración de la simulación reportada en esta sección es de 12 minutos, usando un ordenador con procesador Intel(R) Core(TM) i7-4510U a 2.00 GHz y 12 GB de memoria RAM y se estima que el tiempo de simulación crecería linealmente en función del número de EB incluidas.

A. Evaluación de Cobertura

Los resultados de cobertura se muestran en las Fig. 5 y 6. La Fig. 5 representa la potencia recibida de la EB que provee la mayor intensidad en cada punto de análisis. Se observa claramente el efecto de la urbanización en estos resultados; por ejemplo, a lo largo de las áreas que tienen línea de vista se tienen potencias altas, aun cuando la distancia se incrementa considerablemente, lo cual no sucede en áreas obstaculizadas con edificios.

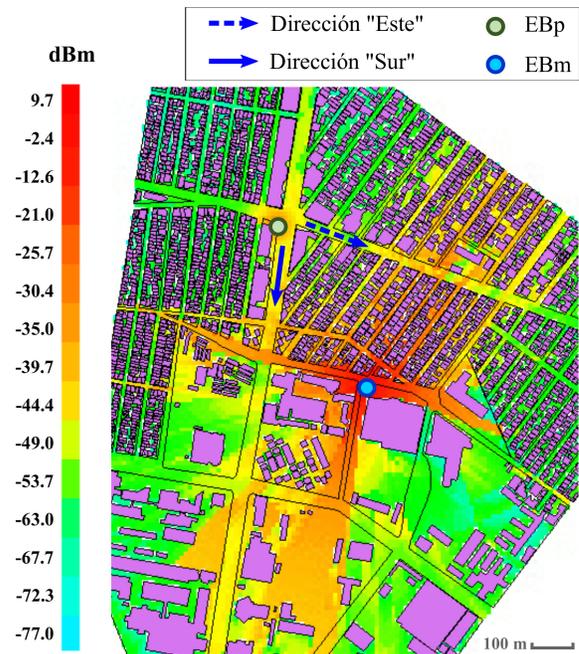


Fig. 5. Potencia recibida de la EB que provee la intensidad mayor.

Por otra parte, en la Fig. 6 se muestran las áreas y los usuarios asignados a cada una de las regiones de cobertura de la HetNet. Como se puede apreciar, la urbanización juega un papel muy importante en la conformación de estas áreas de cobertura, pues sus formas distan significativamente de las idealizaciones que se suelen considerar en modelos estadísticos o cuando sólo se consideran pérdidas por distancia.

Con la finalidad de validar los cálculos de potencia recibida del simulador, éstos se compararon con mediciones de campo, como se muestra en la Fig.7. Se utilizó como transmisor a una EB en operación, ubicada en las coordenadas ($99^{\circ}7'40.29''\text{O}$, $19^{\circ}30'43.02''\text{N}$) y se tomaron mediciones a lo largo de dos

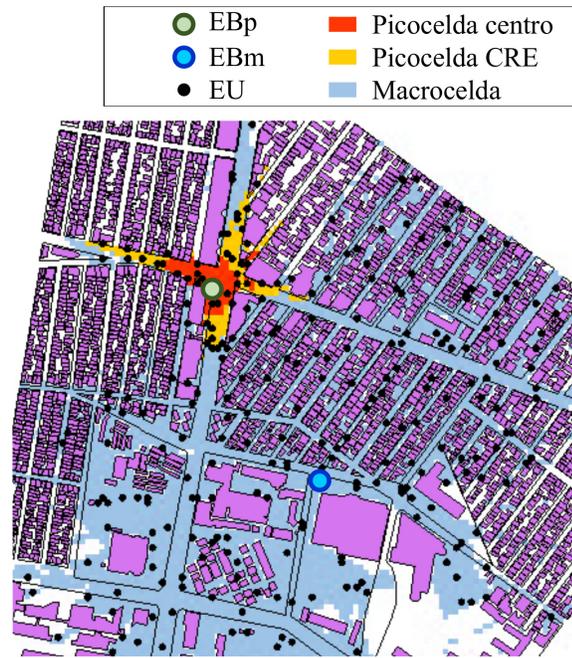


Fig. 6. Áreas de cobertura de la picocelda y la macrocelda para $O_{cre} = 9$ dB.

líneas radiales a dicha ubicación. Estas líneas se intersectan con múltiples edificios, cuyas posiciones con respecto a la EB y alturas se ilustran también en la Fig. 7. Se aprecia que en los puntos donde existe LOS las diferencias entre simulador y mediciones son muy pequeñas (menores a 1 dBm). En el caso de puntos sin LOS, debido a que la potencia recibida depende de múltiples factores, las diferencias son mayores; sin embargo, también se puede concluir que los cálculos son muy precisos, pues sólo en 1 de los 6 puntos evaluados existe una diferencia significativa (5.6 dBm).

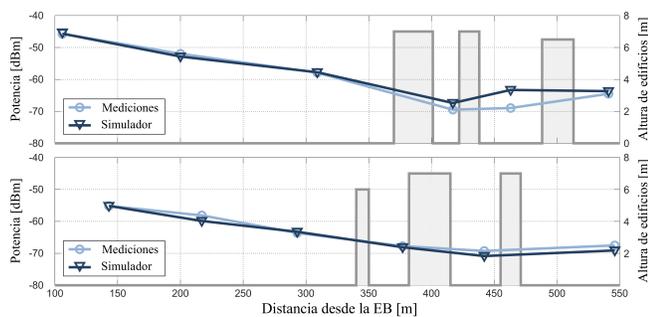


Fig. 7. Comparación entre mediciones de campo y predicciones del simulador.

Para complementar la validación de las pérdidas simuladas, éstas se analizaron estadísticamente. En particular, se obtuvo la función de densidad de probabilidades (FDP) de las pérdidas que dependen de los elementos de urbanización. Esta distribución se comparó con el modelo clásico de pérdidas lognormales por ensombrecimiento (véase Fig. 8), según el cual, este tipo de pérdidas tiene una distribución normal cuando se expresan en dB [28]. A pesar de que las pérdidas del simulador se estimaron sin hacer ninguna suposición sobre sus características estadísticas, su distribución se ajusta con mucha

precisión al modelo lognormal y presenta una desviación estándar (7.36 dB) que coincide con el rango esperado (6 a 13 dB).

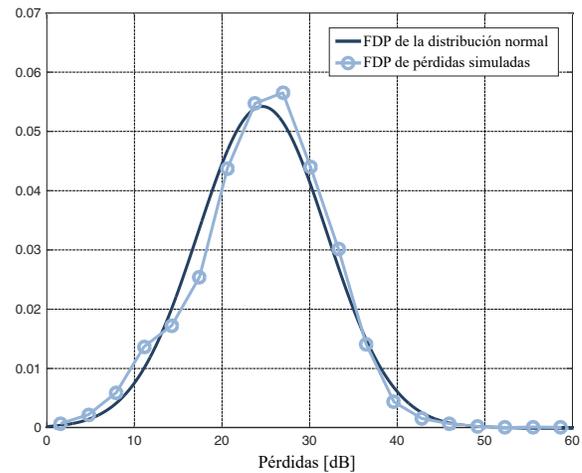


Fig. 8. FDP de pérdidas simuladas en comparación con la distribución normal.

Los resultados mostrados en las Fig. 7 y 8 demuestran que el simulador desarrollado predice con alta confiabilidad las pérdidas; al menos, para el tipo de escenarios en que se realizaron las validaciones ya descritas (centros metropolitanos con alta densidad de edificios).

Finalmente, con el objetivo de analizar las variaciones en los resultados que provocan las secuencias aleatorias usadas para crear los puntos de cobertura, se repitió la simulación 30 veces para el mismo conjunto de parámetros de entrada y se estimó el número de puntos asociados a la EBm (al que se le denota como M). Se observó que dicho parámetro presenta una media $\mu_M=111.57$ y una desviación estándar $\sigma_M=0.635$, por lo que el intervalo de confianza del 95% está dado por (111.32, 111.78).

B. Evaluación de Throughput y Guías de Diseño

Otra de las aportaciones de este trabajo es la posibilidad de analizar al sistema en un escenario específico y con base en ello seleccionar los parámetros de ABS y CRE que proveen un equilibrio entre la eficiencia de la red y la justicia en el servicio que reciben los usuarios. Un ejemplo de dicho análisis se lleva a cabo a continuación.

Para el escenario de cobertura mostrado en la Fig. 5, se evaluó el desempeño por región de cobertura, para diferentes valores del número de tramas en ABS (S_{abs}) y del *offset* del CRE (O_{cre}), como se muestra en la Fig. 9 y en la Tabla III.

En la Fig. 9 se observa que a medida que se incrementa S_{abs} , el desempeño global del sistema se ve degradado (especialmente para valores grandes de O_{cre}), ya que se están destinando más recursos para uso exclusivo de la región expandida y que por lo tanto se dejan de usar tanto en la macrocelda como en la región central de la picocelda.

Por otra parte, se observa que el *throughput* en la macrocelda no varía significativamente en función de O_{cre} , pues el aumento de este parámetro desasocia de la EBm sólo a usuarios que hubieran tenido una SINR muy pobre y que

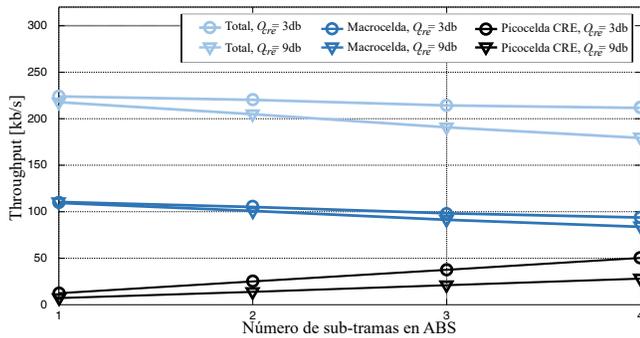


Fig. 9. *Throughput* promedio por región de cobertura en función de S_{abs} y O_{cre} .

TABLA III
NÚMERO DE USUARIOS ATENDIDOS POR REGIÓN DE COBERTURA EN FUNCIÓN DE O_{cre}

Región	Offset del CRE [dB]			
	3	6	9	12
Picoelda centro	12	12	12	12
Picoelda CRE	7	12	20	22
Macrocelda	304	297	293	291
TOTAL	323	323	324	324

de todas formas no hubieran sido atendidos. Sin embargo, el incremento de O_{cre} genera una importante disminución del *throughput* en la región expandida; pero esta reducción es necesaria con la finalidad de incrementar el número de usuarios en dicha región, como se aprecia en la Tabla III, y así conseguir una distribución más justa de recursos en toda el área de cobertura.

En resumen, los valores de S_{abs} y de O_{cre} deben elegirse como un compromiso entre el desempeño global del sistema y la homogeneidad de servicio que reciben los usuarios. En el escenario evaluado, se recomienda utilizar $S_{abs} = 2$ y $O_{cre} = 9$ dB, ya que con esta combinación la reducción del *throughput* con respecto al máximo reportado (224 kb/s para $S_{abs} = 1$ y $O_{cre} = 3$ dB) no excede al 10%, pero se logra triplicar el número de usuarios atendidos en la picocelda.

Por otra parte, para analizar el efecto que la información geográfica tiene en el *throughput* promedio, de nuevo se tomó como base el escenario de cobertura mostrado en la Fig. 5, (con $S_{abs} = 2$ y $O_{cre} = 9$ dB) y se desplazó a la EBp a lo largo de las dos direcciones identificadas como “Este” y “Sur”; es decir, en ambas direcciones se alejó a la EBp del centro del *hotspot*. Los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 10 y la Tabla IV. Se observa que el *throughput* en la macrocelda se ve muy poco afectado por estos desplazamientos, debido a que la potencia de transmisión de la EBm es significativamente mayor que la de la EBp.

Por el contrario, el *throughput* de la picocelda se modifica de manera importante, pero lo que resulta más relevante es que dichas modificaciones tienen diferentes comportamientos para cada una de las direcciones, debido a las características urbanas específicas del escenario.

Cuando la EBp se desplaza hacia el “Sur”, se reduce su distancia con respecto a la EBm por lo que su desempeño se

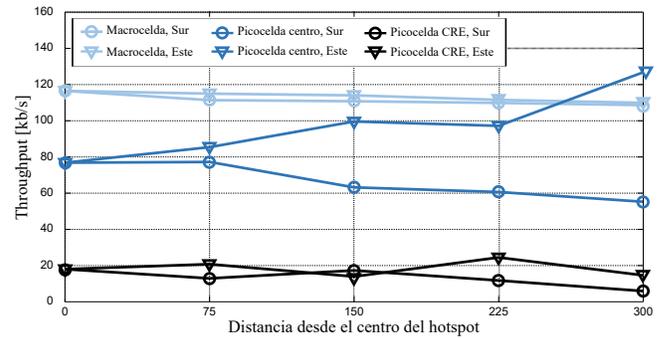


Fig. 10. *Throughput* promedio por región de cobertura en función de la posición de la EBp.

TABLA IV
NÚMERO DE USUARIOS ATENDIDOS POR REGIÓN DE COBERTURA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA EN LA DIRECCIÓN “ESTE”

Región	Distancia [m]			
	0	75	150	225
Picoelda centro	18	10	11	3
Picoelda CRE	17	16	9	8
Macrocelda	300	306	312	320
TOTAL	335	332	332	331

ve deteriorado (de manera más crítica en su área central); sin embargo, cuando esta misma EBp se desplaza hacia el “Este” también se reduce su distancia con respecto a la EBm, pero en este caso el desempeño de la primera mejora substancialmente en su área central. La explicación a este hecho, aparentemente contradictorio, radica en que al mover la EBp hacia el “Este”, hay más edificaciones que se interponen entre ella y la EBm, como consecuencia, se reduce la interferencia de la macrocelda y se incrementa el *throughput*. Este resultado hace patente la pertinencia de tomar en cuenta la información geográfica a la hora de diseñar una HetNet.

Para analizar la dispersión de estos últimos resultados, se calculó el intervalo de confianza del 95% para el *throughput* en la región CRE de la picocelda y desplazamiento de 0 m. Puesto que este intervalo, dado por (18.295, 20.919) kb/s, es considerablemente menor que las variaciones en función del desplazamiento, se concluye que éstas últimas efectivamente son producto de la urbanización del escenario.

Finalmente, se debe señalar que al alejar a la EBp del *hotspot* (otro de los elementos del simulador que posee características geográficas), el *throughput* de la picocelda no necesariamente se ve reducido, aunque sí lo hace el número de usuarios atendidos, como se aprecia en la Tabla IV. Es decir, el alejamiento de la picocelda con respecto al *hotspot* afecta fuertemente a algunos EU específicos, pero no tiene un efecto muy significativo en el desempeño de la red, bajo las condiciones simuladas.

VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Los resultados obtenidos demuestran que la conformación de las áreas de cobertura existentes en una HetNet depende significativamente de la configuración específica del ambiente

urbano en que se evalúe; por lo tanto, herramientas de simulación especializadas, como la presentada en este trabajo, deben ser consideradas en la planeación de este tipo de redes. También se concluye que la inclusión de información geográfica, no solo permite determinar las mejores ubicaciones de las EB, sino también los valores de los parámetros de ABS y CRE que proveen el mejor desempeño, en términos de un compromiso entre el *throughput* promedio y la distribución justa de recursos entre usuarios.

Además, se observó que el *throughput* promedio de la picocelda es muy susceptible a cambios en la distancia entre la EBp y la EBm, pero que estos cambios pueden ser positivos o negativos, dependiendo de la configuración específica de la urbanización. También se observó que el *throughput* de la picocelda no necesariamente se reduce al alejar a la EBp de un *hotspot*; sin embargo, dicha EB debe estar en el centro de él, con la finalidad de beneficiar a una mayor cantidad de usuarios.

También se debe resaltar que, a pesar de la relativa simplicidad del modelo de propagación utilizado, las mediciones de campo obtenidas demuestran la precisión de las predicciones del simulador en el escenario estudiado.

Finalmente, es importante mencionar que para superar algunas limitaciones del simulador, se considera que en trabajos futuros se deben integrar los siguientes aspectos:

- Modelos de propagación para otros escenarios (por ejemplo, interiores de edificios o terrenos con variaciones significativas de elevación) o para otras bandas de operación (por ejemplo, bandas milimétricas).
- Modelos de movilidad de usuarios.
- Evaluación del rendimiento de la red en función de sus costos de instalación y operación.

REFERENCIAS

- [1] A. Osseiran, et al., "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project", *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 520-527, May, 2014.
- [2] D.H. Sung and J. S. Baras, "Load Balancing with Almost Blank Subframe Control in Heterogeneous Cellular Networks", *In Proc. of IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pp. 3615-3621, Dec, 2014.
- [3] J. Oh and Y. Han, "Cell Selection for Range Expansion with Almost Blank Subframe in Heterogeneous Networks", *In Proc. of IEEE 23rd International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pp. 653-657, Sept, 2012.
- [4] Y. Liu, C. S. Chen and C. W. Sung, "Joint optimization on inter-cell interference management and user attachment in LTE-A HetNets", *In Proc. of 13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, pp. 62-69, May, 2015.
- [5] G. Budura, C. Balint, M. Oteteanu, I. Petrut, HetNet Performance Analysis from the eICIC Parameters Perspective", *In Proc. of 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Oct, 2016.
- [6] S. Moon, et al., "Interference Management with Cell Selection Using Cell Range Expansion and ABS in the Heterogeneous Network Based on LTE-Advanced", *Wireless Personal Communications*, vol. 81, No. 1, pp. 151-160, Mar, 2015.
- [7] Y. Xu, et al., "Performance of Macro-Pico Heterogeneous Networks based on LTE-Advanced", *In Proc. of 15th IEEE International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pp. 298-303, Nov, 2013.
- [8] A.T. Hirata, E. C. Xavier and J. F. Borin, "Load Balance and User Association on HetNets", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, No. 12, pp. 4781-4786, Dec, 2016.
- [9] R. Singh and C.S.R. Murthy, "Techniques for Interference Mitigation Using Cooperative Resource Partitioning in Multitier LTE HetNets", *IEEE Systems Journal*, Vol. 12, No. 1 March 2018.
- [10] J. A. Ayala-Romero, et al., "Online Optimization of Interference Coordination Parameters in Small Cell Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 16, No. 10, Oct. 2017.
- [11] G. Yi, et al., "Exploring LTE-V Link Level Performance by Geometry Enhanced Winner II Channel Model", *In Proc. of IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN)*, pp. 346-351, Jan. 2018.
- [12] A. Espinoza Ruiz, et al., "Performance Comparison Between Simulated and Real Case Scenario of RSSI-Based Localization Algorithms on a WSA", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 14, No. 1, pp. 115-121, Jan. 2016.
- [13] M. Hadded, et al., "Performance evaluation of a TDMA-based multi-hop communication scheme for reliable delivery of warning messages in vehicular networks", *In Proc. of 13th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 1029-1034, June 2017.
- [14] R.T. Santos, et al., "Waveguide Propagation Model and Measurements for Mobile Systems in Brazilian Cities", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 16, No. 2, pp. 435-443, Feb. 2018.
- [15] F. Letourneux, Y. Corre, E. Suteau, I. Lohan, "3D coverage analysis of LTE urban heterogeneous networks with dense femtocell deployments", *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Dec, 2012.
- [16] Vienna University of Technology, Austria, LTE-A Downlink System Level Simulator, [Online] Available at: <https://www.nt.tuwien.ac.at/research/mobile-communications/vccs/vienna-lte-a-simulators/>
- [17] N. Teerasuttakorn, et al., "Study of Almost Blank Subframe Configurations for Traffic offload in HetNets", *In Proc. of International Conference on Information and Communication Technology Convergence*, pp. 201-206, Oct. 2018.
- [18] Tetcos, NetSim: Network Simulation and Emulation Software, [Online] Available at: <https://tetcos.com/>
- [19] Remcom, Wireless InSite: 3D Wireless Prediction Software, [Online] Available at: <https://www.remcom.com/wireless-insite-em-propagation-software>
- [20] Qualcomm, 5G Network capacity Simulation, [Online] Available at: <https://www.qualcomm.com/videos/5g-network-capacity-and-user-experience-simulation>
- [21] K. Somasundaram, "Proportional Fairness in LTE-Advanced Heterogeneous Networks with eICIC", *In Proc. of IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, pp. 1-6, Sept, 2013.
- [22] H. A. M. Ramli, et al., "Performance of Well Known Packet Scheduling Algorithms in the Downlink 3GPP LTE System", *In Proc. of IEEE 9th Malaysia International Conference on Communications (MICC)*, Dec. 2009.
- [23] 3GPP (2010) Radio Frequency (RF) system scenarios TR 36.942V 8.3.0 Release 8.
- [24] J. D. Parsons, "Propagation in Built-up Areas" in *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd Edition, Ed. John Wiley & Sons, pp. 91-95, 2000.
- [25] R. Q. Hu and Y. Qian, "Evolution of HetNet Technologies in LTE-advanced Standards 289" in *Heterogeneous Cellular Networks*, Ed. Wiley / IEEE Press, pp 289-313, 2014.
- [26] J. Acharya, L. Gao and S. Gaur, "Release 10 Enhanced ICIC" in *Heterogeneous Networks in LTE-Advanced*, Ed. John Wiley & Sons, pp 110-119, 2014.
- [27] A. ElNashar, M. A. El-saidny and M. Sherif, "Coverage and Capacity Planning of 4G Networks" in *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach*, Ed. John Wiley & Sons, pp 379, 2014.
- [28] Y. S. Yeh and S. Schwartz, "Outage Probability in Mobile Telephony Due to Multiple Log-Normal Interferers", *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 32, No. 4, pp. 380-388, April 1984.
- [29] Q. Bodinier, F. Bader and J. Palicot, "On Spectral Coexistence of CP-OFDM and FB-MC Waveforms in 5G Networks", *IEEE Access*, Vol. 5, pp. 13883-13900, July 2017.
- [30] I. Da Silva, et al., "Tight Integration of New 5G Air Interface and LTE to Fulfill 5G Requirements", *In Proc. of IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, May 2015.
- [31] A. P. Garcia, et al., "Effect of terrain on electromagnetic propagation in urban environments on the andean region, using the COST 231-walfisch-ikegami model and GIS planning tools", *In Proc. of Twelfth International Conference on Antennas and Propagation*, April 2003.



Noé Torres-Cruz obtuvo el título de Ingeniero Electrónico por el Instituto Tecnológico de Oaxaca, México en 2002; el de Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por el CINVESTAV-IPN, México, en 2006 y el de Doctor en Ciencias de la Computación por el CIC, IPN, México, en 2019. Actualmente es Profesor en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas del IPN (UPIITA-IPN, México). Sus intereses de investigación incluyen el análisis de servicios de Video bajo Demanda (VoD) y el manejo de recursos

en redes de Quinta Generación (5G).



Iclia Villordo-Jimenez obtuvo el título de Ingeniería en Electrónica por el Instituto Tecnológico de Puebla (ITP, México) en 2002 y el de Maestra en Ciencias en Electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE, México) en 2007 y el de Doctora en Ciencias de la Computación por el CIC-IPN, México, en 2020. Actualmente es profesora en la Academia de Telemática en la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas (UPIITA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN). Sus líneas de investigación de interés son: el análisis del consumo de energía en redes inalámbricas de última generación.

gación de interés son: el análisis del consumo de energía en redes inalámbricas de última generación.



Arturo Montiel-Saavedra obtuvo el título de Ingeniero Telemático por la UPIITA-IPN, México, en 2019. Actualmente es Consultor de Redes en Teleworx, México. Entre sus intereses de investigación están la evaluación del desempeño y la planeación de redes celulares de última generación.