

Proyecto fin de carrera

**Planificación del espectro radioeléctrico y diseño
de una red de LTE en la ciudad de
Sevilla con Atoll**

Autor: Gonzalo Romeo del Río

Tutor: Francisco José Simois Tirado

INDICE

Agradecimientos.....	6
1. Introducción.....	7
2. LTE.....	8
2.1 Arquitectura del sistema LTE.....	8
2.1.1 Evolved NodeB (eNB)	9
2.2 Interfaz radio.....	10
2.2.1 Protocolos en la interfaz radio	12
2.3 Tecnología nivel físico	15
2.3.1 Fundamentos de OFDM	15
2.3.1.1 Efecto de la dispersión del canal: concepto de prefijo cíclico.....	16
2.3.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente	18
2.3.2.1 Procedimientos de RRM asociados a OFDMA.....	20
2.3.2.1.1 Scheduling de paquetes	21
2.3.2.1.2 Adaptación de enlace.....	22
2.4 Sistemas celulares OFDMA	24
2.4.1 Parámetros de OFDMA empleados por LTE	26
2.4.2 SC-FDMA para el enlace ascendente.....	28
2.4.2.1 Procedimientos de RRM asociados a SC-FDMA.....	28
2.4.2.2 Parámetros de SC-FDMA empleados por LTE.....	29
2.4.3 MIMO.....	29
3. La herramienta ATOLL.....	31
3.1 Diseño de una red LTE en ATOLL.....	31
3.2 Simulaciones Monte Carlo	35
4. Simulaciones.....	38
4.1. Parámetros generales	38
4.2. Simulaciones con LTE 800.....	44
4.2.1. Simulaciones e interpretación de resultados.....	47
4.3 Simulaciones con LTE 1800.....	53
4.3.1 Simulaciones e interpretación de resultados.....	55
4.4. Simulaciones con LTE 2600.....	74
4.4.1. Simulaciones e interpretación de resultados.....	75
5. Conclusiones y futuras líneas de investigación	97
5.1 Conclusiones.....	97

5.2 Futuras líneas de investigación.....	101
6. Bibliografía.....	103

Agradecimientos

A la Escuela Superior de Ingeniero de Sevilla , a sus profesores especialmente por compartir sus conocimientos y sentar así las bases para poder dedicar mi vida laboral a un mundo que me apasiona desde muy pequeño , las telecomunicaciones.

A mi tutor Francisco José Simois por sus buenos consejos y por guiarme en la elaboración de este proyecto.

A la Universidad Nacional de Rio Cuarto por acogerme de esa manera y renovarme de nuevo el entusiasmo por el mundo de las telecomunicaciones.

A mi tutor en la Universidad Nacional de Rio Cuarto, Roberto Manno ,por llegar mucho mas allá de lo que sus responsabilidades le exigían y tratarme como si un miembro de su familia fuera.

Y especialmente a mis Padres y Hermano por aguantarme todos estos años y siempre intentar guiarme por el camino correcto , sin ellos ,sin duda alguna jamás hubiera llegado hasta donde estoy .

1. Introducción

El objetivo de este proyecto consiste en diseñar la red de acceso de una red de LTE para la ciudad de Sevilla que cumpla con los criterios mínimos de accesibilidad exigidos por el ministerio es decir, 2% de bloqueo para llamadas de voz, para el caso de LTE VozIP, además de imponer un tamaño de radio de celda no inferior a 300 metros. Para ello usaremos la herramienta atoll que nos permitirá cargar los planos necesarios para recrear las condiciones de estudio, como tráfico, orografía, tipo de terreno, etc., además de poder definir infinidad de parámetros de nuestra red. Empezaremos con una descripción a nivel teórico de la arquitectura de LTE y la definición de las tecnologías físicas empleadas en los enlaces descendentes y ascendentes. En el tercer capítulo haremos una descripción de las características de la herramienta que se usará para hacer las simulaciones necesarias así como una descripción de la información que nos puede brindar. En el cuarto capítulo se desarrollarán las diferentes simulaciones para las frecuencias elegidas LTE 2600 - 5/10/15/20 MHz (E-UTRA Band 41), LTE 1800 – 5/10/15/20 MHz (E-UTRA Band 3), LTE 800 – 5/10MHz (E-UTRA Band 5), se mostrarán los resultados, se interpretarán y si procede se realizará la optimización de la red. En el quinto y último capítulo se realizarán las conclusiones finales con la elección del diseño más óptimo y se propondrán nuevos estudios que se podrán hacer a partir de este proyecto.

2. LTE

2.1 Arquitectura del sistema LTE

En la Figura 2.1 se muestra de forma simplificada la arquitectura completa del sistema LTE, denominado formalmente en las especificaciones como Evolved Packet System (EPS). Los componentes fundamentales del sistema LTE son, por un lado, la nueva red de acceso E-UTRAN y el nuevo dominio de paquetes EPC de la red troncal.

En la Figura también se encuentran las principales interfaces de E-UTRAN y EPC. La interfaz entre E-UTRAN y EPC se denomina S1 y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina E-UTRAN U_u. Por otro lado, las plataformas de servicios como IMS y la conexión a redes de paquetes externas IP se lleva a cabo mediante la interfaz S_Gi de la EPC que constituye el punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE.

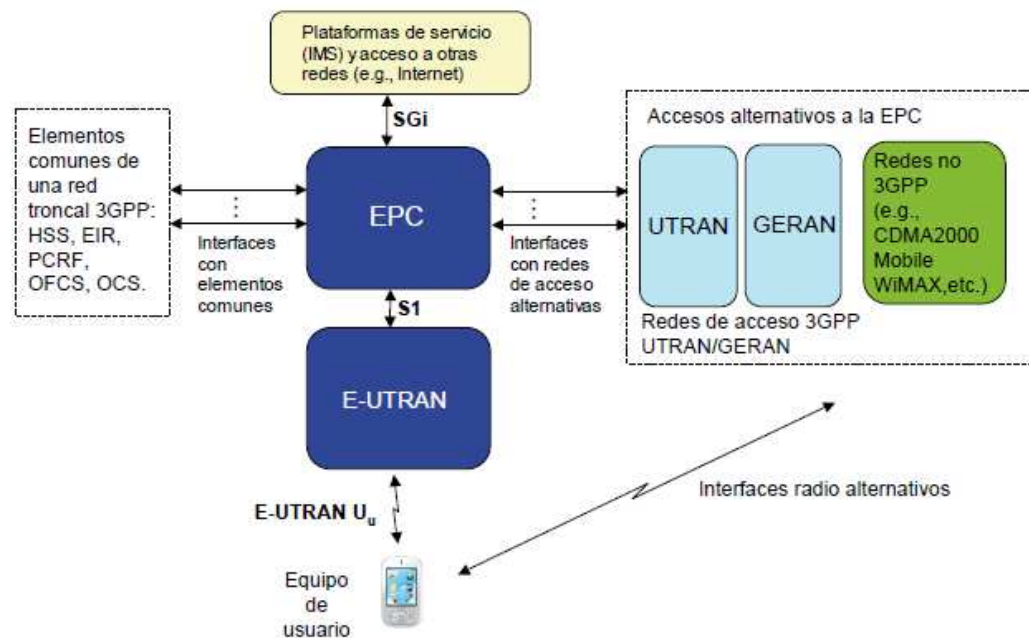


Fig 2.1 Arquitectura de E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada evolved NodeB (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN. Así

pues, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS compuestas por estaciones base (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC).

Tal y como se ilustra en la Figura 2.2, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.

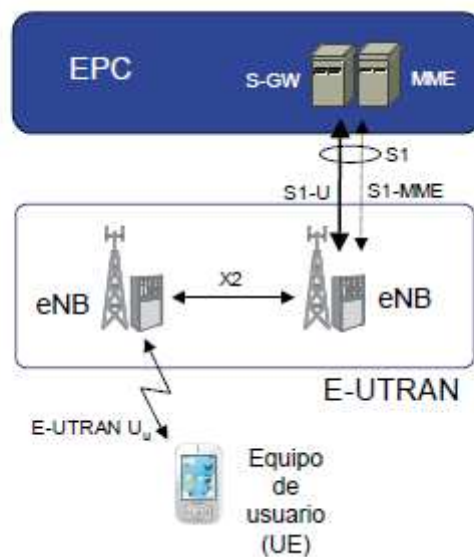


Fig 2.2 Interfaces de la red de acceso E-UTRAN

La interfaz E-UTRAN Uu permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

2.1.1 Evolved NodeB (eNB)

El eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador radio (Radio Bearer, RB).

El eNB mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.).

El eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (p.ej., decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (denominadas funciones de scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.

Un eNB puede enviar/recibir paquetes IP de los usuarios a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW de la red troncal EPC. Ello conlleva que el eNB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia la pasarela de red S-GW correspondiente.

2.2 Interfaz radio

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB. Los tres mecanismos citados se ilustran en la Figura 2.3 y se describen a continuación:



Figura 2.3. Mecanismos de transferencia de la información en el canal radio

- Difusión (*broadcast*) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros básicos de operación (p.ej., potencia máxima que pueden utilizar los equipos de usuario en la celda) así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNB.
- Transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio. Es importante destacar que los servicios portadores radio de E-UTRAN han sido diseñados específicamente para soportar tráfico IP y no permiten la transferencia de otros protocolos. Por ello, de cara a la optimización del envío de tráfico IP a través de la interfaz radio, los servicios portadores albergan funciones como la compresión de cabeceras de los paquetes IP que permiten reducir el número de bytes enviados por la interfaz radio.
- Transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible de cara a poder gestionar el uso de los servicios portadores radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal (p.ej., registro del terminal en la red). La conexión de control se soporta mediante el protocolo *Radio Resource Control* (RRC). A través de dicho protocolo se gestionan, además del establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el eNB y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio. Entre dichos mecanismos cabe citar el control y envío de medidas radio desde los terminales hacia el eNB y el mecanismo de *handover*, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con E-UTRAN se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo *idle* en que el terminal no tiene

una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red.

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio (p.ej., *scheduling*).

2.2.1 Protocolos en la interfaz radio

El envío de paquetes IP entre el eNB y un equipo de usuario a través de la interfaz radio se sustenta en una torre de protocolos formada por una capa de enlace (o capa de nivel 2) y una capa física. La torre de protocolos utilizada se muestra en la Figura 2.4 La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas: Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC) y Medium Access Control (MAC). Cada capa/subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concreto y define el formato de los paquetes de datos (p.ej., cabeceras y colas) que se intercambian entre entidades remotas. A continuación se describen las principales características de las diferentes capas/subcapas:

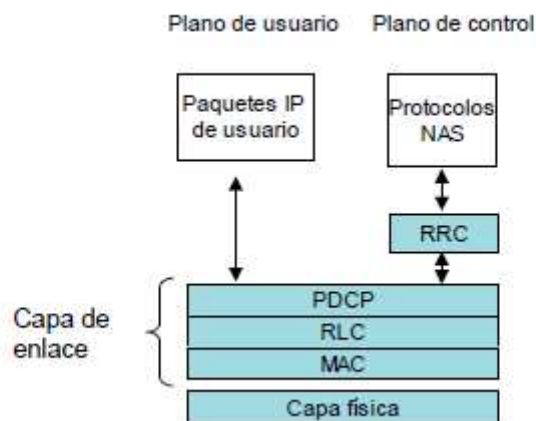


Figura 2.4 Protocolos de la interfaz radio de E-UTRAN

- Packet Data Convergence Protocol (PDCP). Constituye la capa superior de la torre de protocolos encargada de proporcionar el punto

de acceso al servicio portador radio (Radio Bearer, RB). Es decir, los paquetes IP del tráfico de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por la capa PDCP. Las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP y el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad. La cabecera añadida por la capa PDCP básicamente contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP en el extremo receptor así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP (ocasionados por ejemplo en un proceso de handover). Cada servicio portador radio tiene una entidad PDCP asociada.

- Radio Link Control (RLC). La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante mecanismos Automatic Repeat ReQuest (ARQ), concatenación, segmentación y re-ensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de handover), detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.
- Medium Access Control (MAC). Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. Para ello, la capa MAC soporta funciones de scheduling dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física (un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario) y realiza un control de errores mediante Hybrid ARQ (HARQ). Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos. Existe una única entidad MAC por celda.

- Capa física. Es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Alberga funciones de codificación de canal, modulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo apropiados. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema single-carrier FDMA. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. Existe una única entidad de capa física por celda.

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, éste se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física utilizadas en el plano de usuario. Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

- Radio Resource Control (RRC). Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (p.ej., señalización para el establecimiento, liberación y modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad (p.ej., señalización de handover), la difusión (broadcast) de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida (p.ej., envío de avisos a través del canal de paging). El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización (Signalling Radio Bearer, SRB).
- Señalización de los protocolos NAS. Los protocolos NAS se extienden entre la entidad de red MME en la red troncal y el equipo de usuario.

Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

2.3 Tecnología nivel físico

2.3.1 Fundamentos de OFDM

La técnica de transmisión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción. La característica fundamental de la técnica OFDM es el empleo de un conjunto de K subportadoras que presentan la propiedad de ser ortogonales.

La Figura 2.5 muestra un ejemplo con el módulo de los espectros correspondientes a un conjunto de 6 subportadoras OFDM. Obsérvese en la figura que para cada frecuencia múltiplo de $1/T_s$ únicamente existe contribución espectral de una de las subportadoras, mientras que el resto presentan nulos. A su vez, la Figura 2.6 muestra la evolución temporal de la parte real de las 6 subportadoras.

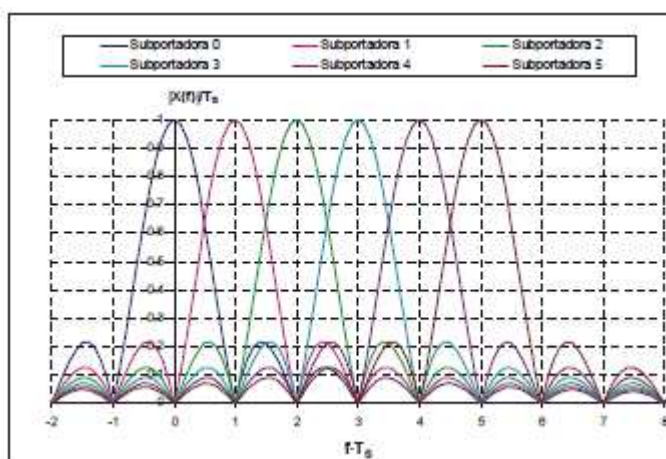


Figura 2.5 Ejemplo del espectro correspondiente a 6 subportadoras OFDM

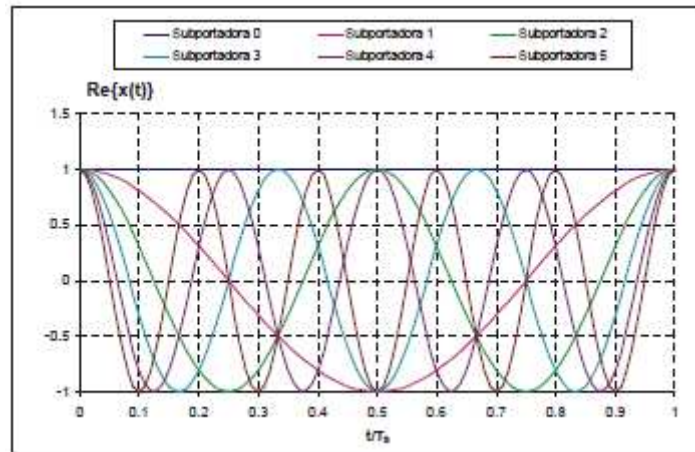


Figura 2.6 Ejemplo de la señal temporal correspondiente a 6 subportadoras OFDM

2.3.1.1 Efecto de la dispersión del canal: concepto de prefijo cíclico

En cualquier sistema de comunicaciones móviles, la propagación se ve afectada por diferentes fenómenos que varían según el entorno del terminal móvil receptor, tales como la presencia de múltiples reflexiones, la difracción por obstáculos, etc. Como resultado de dichos fenómenos, la señal recibida realmente está compuesta por diferentes réplicas de la señal originalmente transmitida, cada una correspondiente a un camino de propagación diferente, y que por lo tanto serán recibidas en diferentes instantes de tiempo y con diferentes amplitudes y fases.

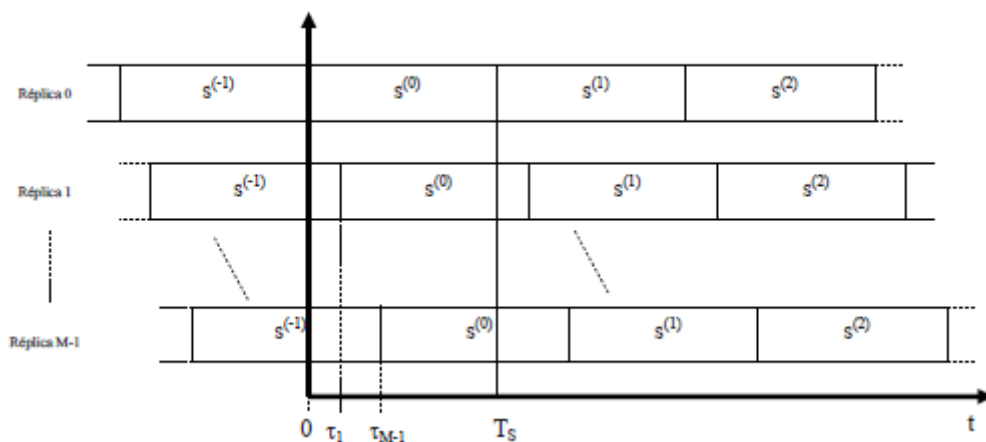


Figura 2.7 Señal recibida tras pasar por un canal con M caminos de propagación

Con objeto de combatir estos efectos negativos de la propagación multicamino, la solución utilizada en OFDM es el empleo en transmisión del denominado prefijo cíclico. Consiste en alargar la transmisión de cada símbolo OFDM hasta una duración total de T_P+T_S a base de repetir, al principio del símbolo, la señal que se envía durante los últimos T_P segundos del símbolo, tal y como se ilustra en la Figura 2.8 a partir del símbolo OFDM que anteriormente se envió. En el ejemplo aquí mostrado se ha supuesto una duración del prefijo cíclico igual a la décima parte del período de símbolo.

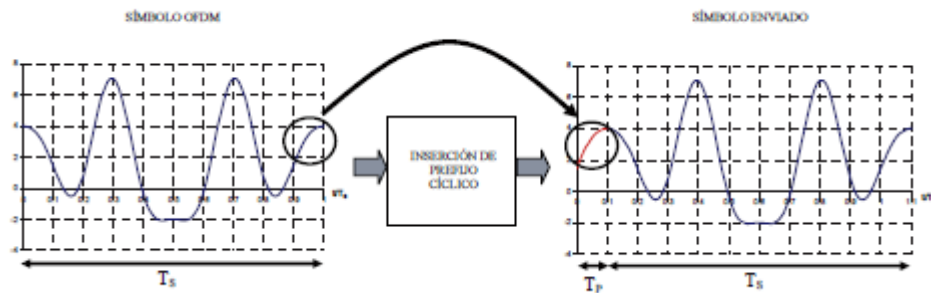


Figura 2.8 inserción de prefijo cíclico

De este modo, en tanto que se escoja una duración de prefijo cíclico superior al máximo retardo de las componentes multicamino se consigue eliminar totalmente la interferencia intersimbólica. De la misma manera, al repetir en el prefijo cíclico la parte final del símbolo, conseguimos que la integración de cada una de las réplicas se haga sobre el símbolo OFDM completo (observar en la figura que justamente la parte de símbolo que cae fuera del intervalo de integración coincide con la añadida en el prefijo cíclico) lo que permite recuperar la ortogonalidad entre subportadoras y evitar la interferencia entre ellas.

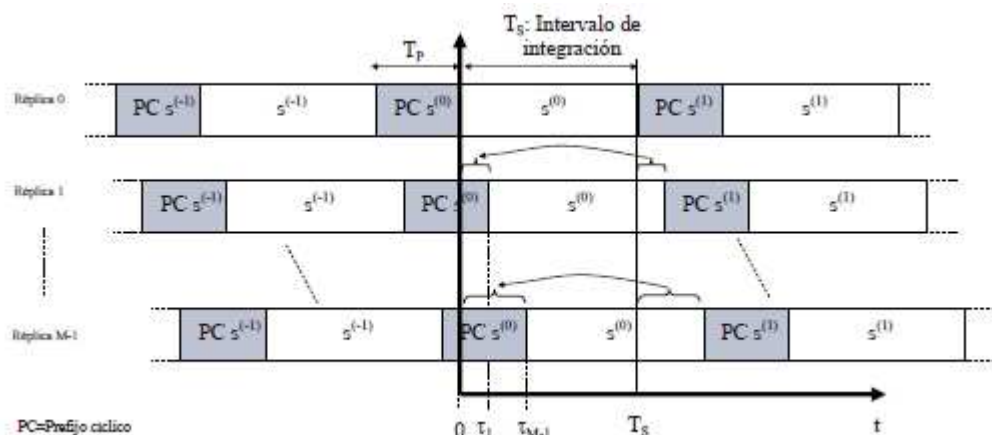


Figura 2.9 Señal recibida tras pasar por un canal con M caminos de propagación con prefijo cíclico

El inconveniente de la inserción del prefijo cíclico radica en una menor eficiencia en términos de la potencia transmitida y de la velocidad de transmisión

2.3.2 OFDMA como técnica de acceso múltiple para el enlace descendente

La técnica de acceso múltiple OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), utilizada en el enlace descendente de LTE, surge de forma natural a partir de la modulación OFDM presentada anteriormente al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes, tal y como se ilustra en el esquema de transmisión de la Figura 2.10.

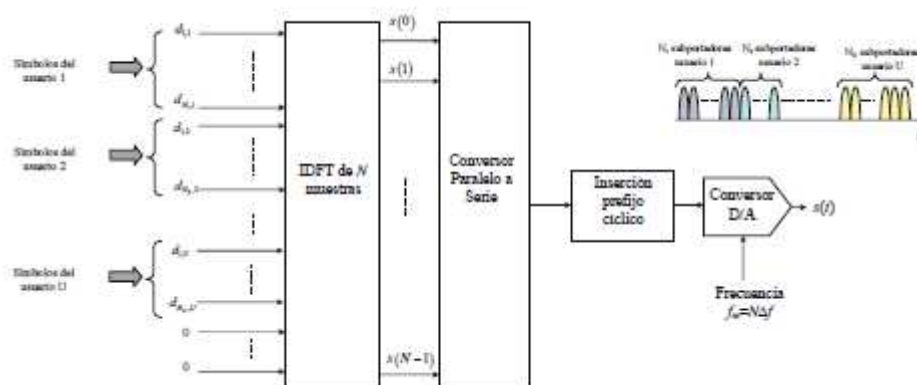


Figura 2.10 Multiplexación de usuarios en OFDMA

El empleo de la técnica de acceso múltiple OFDMA conlleva las siguientes ventajas:

- **Diversidad multiusuario:** Mediante OFDMA la asignación de subportadoras a usuarios se lleva a cabo dinámicamente, pudiéndose cambiar en períodos cortos de tiempo dicha asignación a través de estrategias de *scheduling*. De esta forma, teniendo en cuenta que el canal radio presentará desvanecimientos aleatorios en las diferentes

subportadoras, y que dichos desvanecimientos serán independientes para cada usuario, se puede intentar seleccionar para cada subportadora aquel usuario que presente un mejor estado del canal (esto es, perciba una mejor relación señal a ruido), lo que se traducirá en una mejor utilización de la banda disponible para conseguir una mayor velocidad de transmisión. Este procedimiento se suele denominar *scheduling* en el dominio de la frecuencia.

- **Diversidad frecuencial:** Es posible asignar a un mismo usuario subportadoras no contiguas, suficientemente separadas como para que el estado del canal en las mismas sea independiente, lo que proporciona diversidad frecuencial en la transmisión de dicho usuario ante canales selectivos en frecuencia.
- **Robustez frente a la propagación multicamino:** Gracias a la aplicación del prefijo cíclico, la técnica OFDMA es muy robusta frente a la interferencia intersimbólica resultante de la propagación multicamino y se puede combatir la distorsión mediante técnicas de ecualización en el dominio de la frecuencia, que resultan más eficientes y menos complejas que las técnicas de ecualización clásicas en el dominio temporal. Esto es particularmente relevante cuando se pretenden emplear bandas de transmisión superiores a 5 MHz, como ocurre con LTE, en que se pretende llegar hasta los 20 MHz.
- **Flexibilidad en la banda asignada:** La técnica OFDMA proporciona una forma sencilla de acomodar diferentes velocidades de transmisión a los diferentes usuarios en función de los requerimientos de servicio de cada uno, simplemente a base de la asignación de más o menos subportadoras por usuario.
- **Elevada granularidad en los recursos asignables:** Al subdividir la banda total en un conjunto elevado de subportadoras de banda estrecha que se asignan dinámicamente a los usuarios, se dispone de una elevada

granularidad a la hora de asignar más o menos recursos a cada uno, lo que resulta útil para acomodar servicios con diferentes requerimientos de calidad.

- Elevado grado de utilización de la banda asignada: Gracias al empleo de la transmisión OFDM la transmisión multiportadora se consigue con un espaciado mínimo entre las diferentes subportadoras utilizadas, existiendo de hecho una cierta superposición en el espectro ocupado por éstas sin que ello afecte a la recuperación de la señal transmitida. Por el contrario, otras técnicas de transmisión diferentes de OFDM requerirían una cierta banda de guarda entre los diferentes canales, lo que reduciría el grado de utilización de la banda asignada y en consecuencia la eficiencia espectral.

En todo caso, también es preciso remarcar algunas de las desventajas que esta tecnología presenta:

- Elevada relación entre la potencia instantánea y la potencia media: uno de los inconvenientes de las técnicas de transmisión multiportadora como OFDMA es que la potencia instantánea transmitida puede ser significativamente superior a la potencia media, lo que plantea problemas de finalidad para los amplificadores de potencia, limitando su eficiencia e incrementando su coste.
- Susceptibilidad frente a errores de frecuencia: La ortogonalidad en OFDMA se basa, en que la separación entre subportadoras coincide con el inverso de la duración del símbolo OFDMA.

2.3.2.1 Procedimientos de RRM asociados a OFDMA

Para conseguir un uso eficiente de los recursos radio disponibles, que en el caso de OFDMA son las diferentes subportadoras en que se subdivide la banda total, es preciso disponer de un conjunto de mecanismos de gestión para decidir cómo dichos recursos se distribuyen entre los diferentes usuarios y los servicios asociados, según sus

requerimientos de calidad de servicio (QoS: *Quality of Service*). Estos mecanismos forman parte de la denominada gestión de recursos radio, en inglés *Radio Resource Management (RRM)*.

A continuación se enumeran aquellos mecanismos más íntimamente ligados con las características de la técnica de acceso múltiple OFDMA para el enlace descendente.

2.3.2.1.1 Scheduling de paquetes

Como se ha comentado, mediante OFDMA es muy sencillo efectuar una asignación dinámica de las subportadoras disponibles a los diferentes usuarios. Esto permite que, en periodos muy cortos de tiempo, típicamente compuestos por un pequeño número de periodos de símbolo (p.ej., 6 o 7 periodos en el caso de LTE), se puedan modificar las subportadoras empleadas por cada usuario, lo que proporciona la flexibilidad necesaria para poder acomodar flujos de información con diferentes requerimientos de QoS.

En este contexto, el mecanismo de *scheduling* de paquetes es el responsable de determinar, en cada momento, cuáles de las subportadoras se asignan a cada uno de los diferentes usuarios, o incluso a los diferentes flujos de información que pudieran existir de un mismo usuario, correspondientes a diferentes servicios. El proceso se ilustra gráficamente en la Figura 4.15. Como puede apreciarse, por un lado existen datos asociados a cuatro usuarios diferentes, cada uno representado mediante un color, y por el otro el conjunto de recursos se puede contemplar como una rejilla en los ejes frecuencial y temporal, de modo que en frecuencia existe un conjunto de subportadoras separadas Δf , cada una de las cuales se puede asignar durante un período temporal T . El *scheduling* de paquetes es responsable de asociar las parejas subportadora/periodo de tiempo a cada uno de los usuarios.

Para llevar a cabo la decisión de la asignación, en general el algoritmo de *scheduling* tendrá en cuenta información sobre lo siguiente:

- Requisitos de QoS para los diferentes usuarios, en tanto que servicios que requieran de enviar más información deberán disponer de más subportadoras asignadas durante más tiempo.
- Información sobre el estado del canal para cada usuario en las diferentes subportadoras, de modo que se pueda evitar la asignación a un usuario de una subportadora en la que se sabe que el canal presenta una elevada atenuación o interferencia. Notar que para disponer de esta información, que se puede obtener de medidas efectuadas en el receptor del terminal móvil, será preciso disponer de la señalización apropiada en el enlace ascendente que permita enviar esta información desde el móvil hasta el nodo de la red en el que se ejecute el *scheduling* (y que en LTE será el eNB).

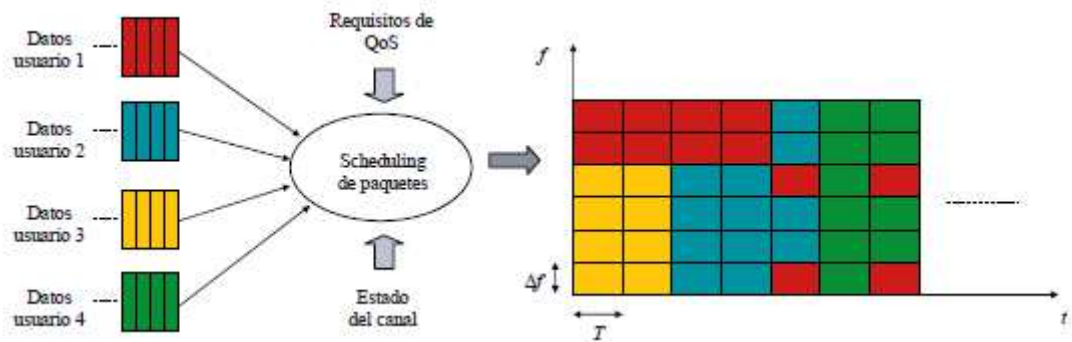


Figura 2.11 Ilustración del scheduling de paquetes en OFDMA

2.3.2.1.2 Adaptación de enlace

Una de las características de OFDMA es que no impone a priori ninguna condición sobre los símbolos que se modulan sobre las diferentes subportadoras y en consecuencia pueden pertenecer a modulaciones que incluyan más o menos bits de información por símbolo según el orden de la modulación empleada, reflejado en el número de símbolos de su constelación.

Con objeto de incrementar la velocidad de transmisión resultaría conveniente incrementar el número de bits por símbolo de la modulación empleada a base de utilizar constelaciones con más símbolos. Sin embargo, ante unas condiciones de relación señal a ruido (SNR: *Signal to Noise Ratio*) en el canal dadas, el empleo de modulaciones de

orden elevado ocasiona un peor comportamiento en términos de probabilidad de error de bit, ya que al existir más símbolos en la constelación y encontrarse éstos más próximos, es más fácil que debido al ruido se detecte erróneamente un símbolo en lugar de otro.

De acuerdo con lo anterior, una estrategia que habitualmente se emplea en el contexto de OFDMA es la denominada adaptación de enlace, que intenta extraer el máximo rendimiento del canal (en términos de velocidad de transmisión) mediante la selección de la modulación que permita enviar el mayor número de bits por símbolo ante unas condiciones de SNR dadas.

El proceso de adaptación de enlace para OFDMA se ilustra gráficamente en la Figura 2.12, en un ejemplo en el que existen tres modulaciones disponibles, QPSK, 16-QAM y 64-QAM.

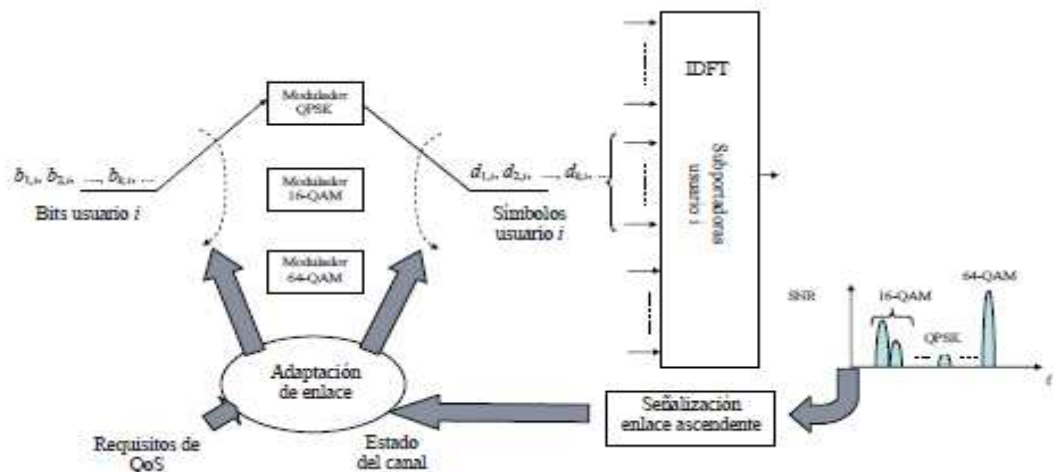


Figura 2.12 Ilustración de la adaptación de enlace en OFDMA

La información que necesita el mecanismo de adaptación de enlace para tomar la decisión apropiada se basa, por un lado en el estado del canal, en términos de SNR, que deberá proporcionarse a través de mecanismos de señalización en el enlace ascendente, pero por otro lado también en los requisitos de QoS, en tanto que por ejemplo determinados servicios con bajos requerimientos de velocidad de transmisión pueden no necesitar de las modulaciones de mayor orden.

Por otra parte, también conviene tener en cuenta que, si bien el mecanismo de adaptación de enlace descrito aquí únicamente ha contemplado la selección de la

modulación, desde una perspectiva más amplia, también puede seleccionar la codificación de canal empleada, esto es, el grado de redundancia en los diferentes bits enviados para detectar y corregir los posibles errores en la transmisión. Una misma modulación puede combinarse con diferentes códigos de canal y en consecuencia disponer de mayor o menor robustez frente a errores, aunque esto afectará a la velocidad de transmisión neta.

2.4 Sistemas celulares OFDMA

El despliegue de un sistema de comunicaciones móviles para proporcionar cobertura a una determinada región se basa en la distribución de un conjunto de estaciones base o células por el territorio a cubrir, de modo que cada una proporciona la cobertura a los usuarios de una zona geográfica, y entre todas las bases aseguran la cobertura de todo el territorio. Esto da lugar a lo que tradicionalmente se ha denominado un sistema celular, y que se ha venido empleando en todos los sistemas de comunicaciones móviles previos a LTE, tales como GSM o UMTS.

Uno de los problemas a los que se debe hacer frente en un sistema celular consiste en determinar qué recursos radio se asignan a las diferentes estaciones base para conseguir, por un lado, disponer de la suficiente capacidad de acuerdo con la cantidad de usuarios a los que cada base debe dar servicio, y por el otro lado conseguir una utilización eficiente de dichos recursos, intentando consumir el mínimo número de ellos.

En el caso de los sistemas celulares basados en OFDMA, en los que la banda total se subdivide en un conjunto de subportadoras, y por lo tanto presentan intrínsecamente una componente FDMA, una forma natural de proceder consistiría en emplear técnicas de reutilización de frecuencia similares a las de los sistemas de segunda generación como GSM.

En este caso, el conjunto total de subportadoras disponible se subdivide en F grupos (siendo F el factor de reuso) cada uno de los cuales se asigna a una célula diferente de un conjunto de F células denominado *cluster*. A su vez, cada uno de los

grupos se reutiliza en células pertenecientes a diferentes *clústeres*. Este proceso se ilustra en la Figura 2.13 para un caso de factor de reuso $F=3$ asumiendo que cada base se encarga de dar servicio a un área hexagonal.

Como puede apreciarse, mediante este mecanismo se garantiza que células adyacentes no trabajen con las mismas subportadoras y por lo tanto no se interfieran mutuamente.

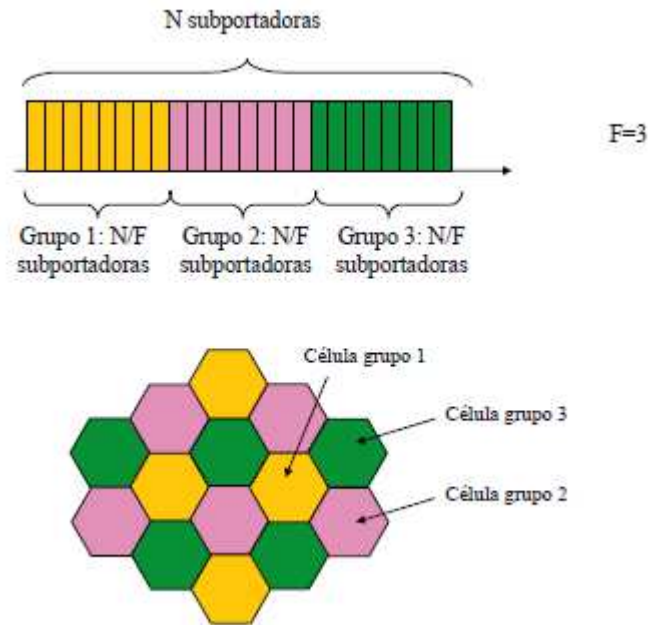


Figura 2.13 Ejemplo de asignación de subportadoras a células según un factor de reuso $F=3$

Por otra parte, es importante remarcar que el empleo de las técnicas de *scheduling* de paquetes y de adaptación de enlace descritas en los apartados anteriores permite efectuar dentro de cada célula una gestión dinámica de las subportadoras disponibles, asignándolas a los usuarios según sus condiciones de canal medidas ahora no sólo como relación señal a ruido sino como relación señal a ruido más interferencia. De esta forma, a diferencia de lo que ocurría en los sistemas de segunda generación como GSM, en OFDMA la interferencia intercelular no se controla únicamente mediante el reuso de frecuencias sino que también se puede regular mediante un *scheduling* apropiado. Por este motivo, sería posible trabajar con factores de reuso inferiores, pudiendo llegar incluso a utilizarse un factor $F=1$, esto es, asignar todas las subportadoras disponibles en todas las células. En esta situación, sería tarea del *scheduling* asignar apropiadamente las subportadoras a los usuarios, de modo que a

aquellos usuarios más susceptibles a la interferencia intercelular, típicamente aquellos que se encuentren en el extremo de la célula, se les asignasen subportadoras que en un momento dado no están siendo utilizadas en las células adyacentes, mientras que a los usuarios menos susceptibles a la interferencia intercelular, típicamente los que se encuentran cerca de la estación base, se les podrían asignar subportadoras utilizadas en otras células.

La operación de un sistema celular OFDMA con reuso $F=1$ se ilustra en la Figura 2.14.

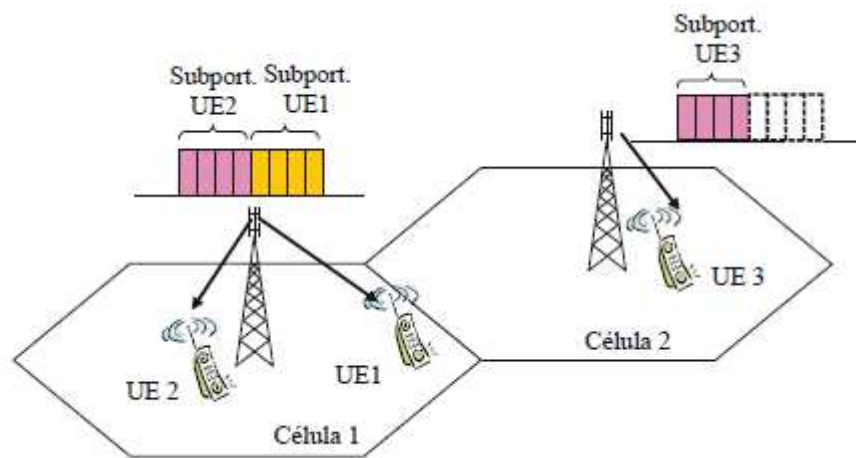


Figura 2.14 Ejemplo de OFDMA con reuso $F=1$

2.4.1 Parámetros de OFDMA empleados por LTE

Con objeto de ilustrar los conceptos anteriormente presentados para la técnica de acceso múltiple OFDMA, a continuación se presentan los parámetros definidos en el contexto del enlace descendente del sistema LTE.

La separación definida entre subportadoras es de $\Delta f=15$ kHz, si bien también existe un espaciado reducido de 7.5 kHz, particularmente pensado para el caso de transmisión multicast.

Las subportadoras se agrupan en bloques de 12 subportadoras consecutivas, con un ancho de banda resultante de $12\Delta f=180$ kHz, constituyendo cada uno de estos bloques un recurso en el dominio frecuencial, o equivalentemente la unidad mínima de

asignación de recursos a un usuario. A partir de aquí, el número total de subportadoras ocupadas por una portadora LTE en el enlace descendente es de $N_S=12N_B+1$, siendo N_B el número de bloques de 12 subportadoras utilizados. En esta última expresión, hay que tener en cuenta que la subportadora en el centro de la banda no se utiliza en ninguno de los bloques, en tanto que puede ser altamente interferida por el oscilador local en recepción.

La flexibilidad en el ancho de banda ocupado viene dada por el número de bloques N_B utilizados, que puede tomar los valores $\{6, 15, 25, 50, 75, 100\}$, correspondiente a anchuras de banda de transmisión de $BW=(12N_B+1)\Delta f = \{1.095, 2.715, 4.515, 9.015, 13.515, 18.015\}$ MHz. De acuerdo con estos valores, se pueden configurar diferentes espaciados entre canales LTE, correspondientes a $\{1.4, 3, 5, 10, 15, 20\}$ MHz, en los que, como puede observarse, la anchura de banda ocupada es aproximadamente un 90% del espaciado entre canales (excepto para el caso de 1.4 MHz, que es del 78%).

El empleo de una u otra configuración en términos del número de bloques empleados se regula mediante el número de muestras empleado para los procesos de IDFT/DFT, dados por: $N=\{128, 256, 512, 1024, 1536, 2048\}$, y los correspondientes valores de frecuencia de muestreo $f_m=N\Delta f=\{1.92, 3.84, 7.68, 15.36, 23.04, 30.72\}$ MHz. Es importante remarcar que la selección de estos valores de frecuencia de muestreo se hizo teniendo en cuenta aspectos de compatibilidad con los actuales sistemas UMTS, en tanto que la frecuencia de muestreo de 3.84 MHz coincide con la tasa de chips de UMTS de valor 3.84 Mchips/s, lo que facilita la implementación de terminales multimodo UMTS/LTE con un único oscilador.

Por otra parte, del conjunto anterior de frecuencias de muestreo, la mayor de ellas define el intervalo temporal de referencia como $T_m=1/30.72 \mu s$, a partir del cual se definen las duraciones de los símbolos, de los prefijos cíclicos, y finalmente de la estructura temporal de trama.

En concreto, la duración del símbolo OFDM, que corresponde al inverso de la separación entre subportadoras, $T_S=1/\Delta f=66.67 \mu s$, puede expresarse como $T_S=2048 T_m$.

Análogamente, para la duración del prefijo cíclico existen diferentes valores, que son $T_p=160T_m=5.21 \mu s$, $T_p=144T_m=4.68 \mu s$ y $T_p=512T_m=16.7 \mu s$.

Por último, comentar que en relación a las modulaciones empleadas, en el enlace descendente de LTE pueden utilizarse QPSK, 16QAM y 64 QAM, correspondientes a 2, 4 y 6 bits por símbolo, respectivamente.

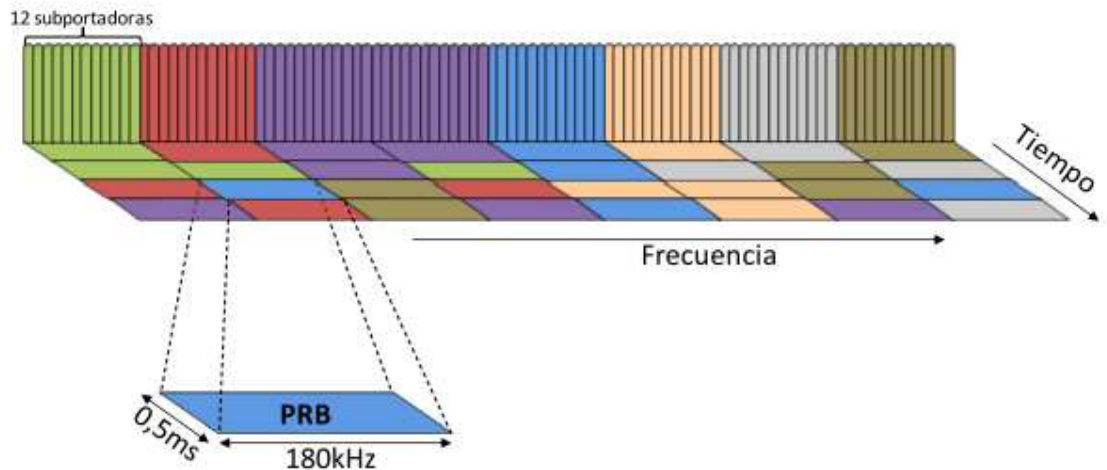


Figura 2.15 Trama LTE

2.4.2 SC-FDMA para el enlace ascendente

2.4.2.1 Procedimientos de RRM asociados a SC-FDMA

Los procedimientos de gestión de recursos asociados al enlace ascendente para SC-FDMA son de hecho similares a los empleados por OFDMA, en tanto que ambas técnicas de acceso se basan en unos principios de transmisión parecidos. En este sentido será preciso, tal y como se detalló en el apartado 4.2.1, disponer también de mecanismos de *scheduling* y de adaptación de enlace para saber cuáles son los recursos asignados en cada momento a un usuario, así como los formatos de modulación y codificación de canal a emplear. En todo caso, es preciso destacar que aspectos como la estimación de canal en el enlace ascendente, necesarios para llevar a cabo un *scheduling* que tenga en cuenta las condiciones de canal de cada usuario, son más complejos que en el enlace descendente, ya que implican la necesidad de disponer de señales de referencia que se envíen desde cada uno de los móviles involucrados en el proceso de *scheduling* (a diferencia del enlace descendente, en que los mismos símbolos de referencia podían ser

empleados por todos los terminales), lo que se traducirá en un incremento en la señalización del sistema.

2.4.2.2 Parámetros de SC-FDMA empleados por LTE

Los parámetros definidos para SC-FDMA en el contexto del enlace ascendente para LTE presentan bastantes similitudes con los del enlace descendente, en tanto que la técnica de transmisión se basa en principios similares. En particular, la separación entre subportadoras es también de $\Delta f=15$ kHz agrupadas en bloques de 12 subportadoras cada uno. Dichos bloques se pueden asignar de forma flexible a los diferentes usuarios según sus necesidades, con la única limitación de que, al emplearse SC-FDMA localizado, todas las subportadoras asignadas a un único usuario deben ser contiguas.

A diferencia del enlace descendente, el número de subportadoras total disponible es de $N_S=12N_B$, ya que ahora no se deja sin utilizar la subportadora central de la banda. Puesto que con SC-FDMA un usuario debe ocupar un conjunto de subportadoras contiguas, gracias a permitir el uso de la subportadora central, sería potencialmente posible llegar a asignar todas las subportadoras de la banda a un único usuario. Por otra parte, la posible interferencia del oscilador local sobre la subportadora central, que era el problema del enlace descendente, gracias a la precodificación basada en la DFT empleada por SC-FDMA quedaría dispersada sobre toda la banda ocupada, por lo que no resulta ser tan crítico como en el enlace descendente.

2.4.3 MIMO

El estándar LTE implementa la técnica de múltiples antenas en recepción y transmisión denominada MIMO (Multiple Input Multiple Output) con el objetivo de mejorar las prestaciones del enlace. Los modos de operación de la técnica dependen del tratamiento que se le dé a la información a transmitir por las diversas antenas:

- **Diversidad en transmisión:** consiste en transmitir el mismo flujo de información por las múltiples antenas. Busca mejorar la relación señal

a ruido de recepción, aprovechando los múltiples caminos de propagación (independientes entre sí) del entorno.

- Multiplexación espacial: consiste en transmitir distintos flujos de información por las antenas. Busca incrementar la velocidad de transmisión percibida, aunque depende de qué tan dispersivo sea el canal.
- Beamforming: consiste en utilizar antenas inteligentes para lograr una conformación de haz buscando eliminar las interferencias.

3. La herramienta ATOLL

ATOLL es un software para planificación y optimización radio que permite a los operadores de comunicaciones móviles realizar el diseño y planificación de sus redes y estudiar el comportamiento de las mismas para optimizarlas de la mejor manera posible. A partir del año 2008 ATOLL cuenta con un módulo LTE, el primero en el mercado, que permite implementar con detalle y precisión las características de una red E-UTRAN.

A continuación se explicarán algoritmos, términos y definiciones de ATOLL necesarios para la comprensión del proyecto.

3.1 Diseño de una red LTE en ATOLL

En la Figura 3.1 se muestra el diagrama de flujo correspondiente al diseño de una red LTE con la herramienta ATOLL. El primer paso para cualquier proyecto de planificación radio es recopilar la información necesaria en cuanto a los equipos radio (p. ej., emplazamientos, transmisores, antenas, etc.), información de la tecnología radio (bandas de frecuencias y otros parámetros específicos de la tecnología a implementar) e información geográfica (p. ej. Clutter classes, clutter heights, mapas de tráfico, etc.) que se utilizará en el despliegue.

Posteriormente se debe abrir o crear un nuevo proyecto, para esto ATOLL tiene definido unas plantillas (Templates) con parámetros específicos a cada tecnología, en este caso el Template LTE es seleccionado para modelar la red según las especificaciones de la 3GPP.

El tercer paso consiste en la configuración de la red agregando los mapas del terreno, emplazamientos (Sites), transmisores (Transmitters), celdas (Cells) y todos aquellos parámetros de la red que fueron recopilados en el primer paso.

ATOLL ofrece la posibilidad de realizar predicciones básicas de cobertura por nivel de señal recibida sin tomar en cuenta las interferencias. Estas predicciones

comprenden estudios del nivel de señal recibido de distintas señales LTE en cada píxel del mapa, coberturas por transmisor que permiten estudiar la configuración inicial de la red sin tomar en cuenta datos de tráfico.

Como quinto paso se propone calcular y establecer los vecinos de cada celda para después realizar una asignación de las frecuencias en base a las colindancias establecidas evitando en la mayor medida las interferencias.

Posteriormente se realiza una asignación de los Physical Cell IDs para facilitar el procedimiento de selección de celdas. ATOLL permite que estos tres pasos puedan llevarse a cabo de forma manual o automática.

Para realizar predicciones de cobertura avanzadas es necesaria la información de cargas de tráfico de las celdas que conforman la red. Para ello pueden realizarse simulaciones Monte Carlo, basadas en los mapas de tráfico. Las predicciones en este punto se calculan en base a la calidad de la señal recibida tomando en cuenta las interferencias y comprenden el estudio de nivel portadora a interferencia, área de servicio de las celdas, cobertura por throughput.

Por último se analizan los resultados de las simulaciones y las predicciones de cobertura por calidad de señal para realizar modificaciones, si es necesario, en los parámetros configurados al inicio o realizar cambios en la planificación frecuencial.

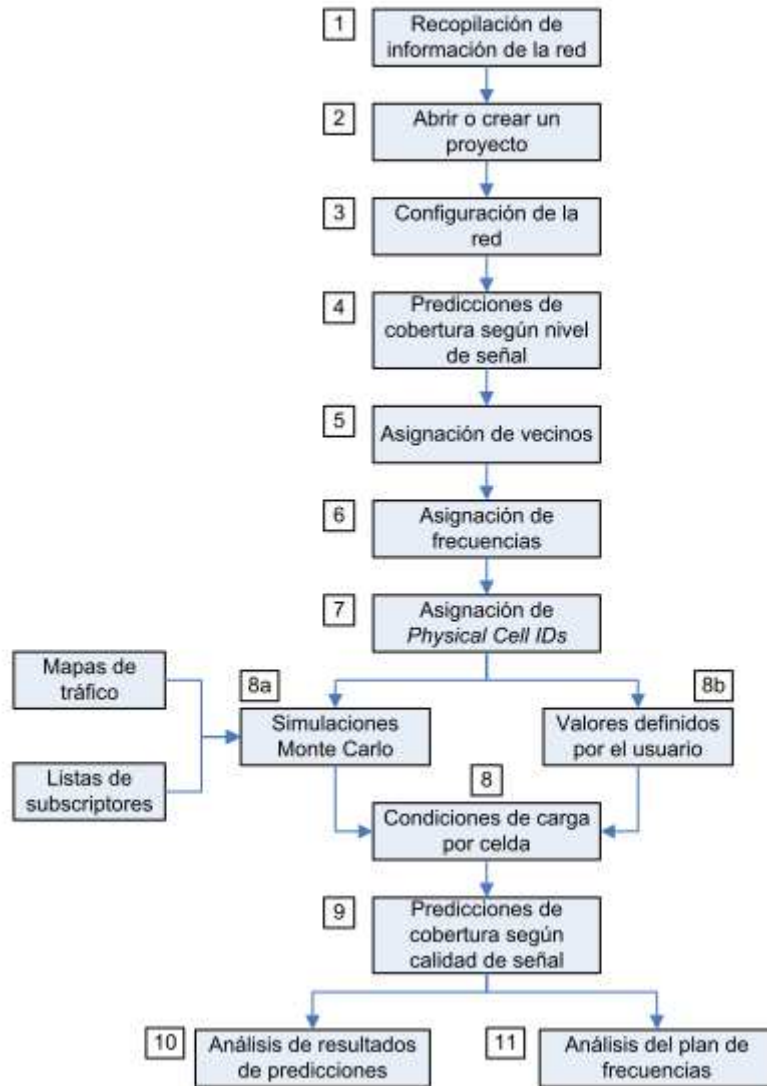


Figura 3.1 Predicciones de Cobertura

En las predicciones cada píxel del mapa es considerado como un usuario no interferente con un servicio, movilidad y terminal específico que se definen al momento de realizar la predicción. En cuanto al servicio, se toman en cuenta los valores de Bearer máximo y mínimo que puede emplear el servicio en cuestión, así como el Throughput Scaling Factor, Throughput Offset y las pérdidas por cuerpo. La movilidad determina los umbrales de selección de Bearers y las curvas de calidad de los equipos de recepción empleadas en los cálculos, ya que los requisitos de $C/(I+N)$ para la selección de diferentes Radio Bearers depende en gran medida de la velocidad del móvil. Por último, el tipo de terminal influye en tanto que la figura de ruido establecida afectará los cálculos del ruido total en el downlink, así como el número de antenas afectará los casos que empleen diversidad.

Las predicciones de calidad de señal se basan en los valores de DL Traffic Load y UL Noise Rise establecidos en la tabla de celdas (Cells Table) o calculados por simulaciones Monte Carlo para calcular la relación portadora a interferencia más ruido, $C/(I+N)$, en cada píxel del mapa.

Clasificación	Nombre	Descripción
Por nivel de señal	Coverage by Signal Level	Permite predecir las zonas de cobertura según los niveles de señal del transmisor en cada píxel del mapa.
	Coverage by Transmitter	Permite predecir las zonas de cobertura por transmisor analizando para cada píxel del mapa el mejor transmisor.
	Overlapping Zones	Permite calcular las zonas donde existe cobertura de dos o más transmisores.
	Effective Signal Analysis	Permite calcular los niveles de señal de diferentes señales LTE (señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH, PDCCH PUSCH).
Por calidad de señal	Coverage by $C/(I+N)$ Level	Permite predecir los niveles de interferencia y de portadora a interferencia y ruido $C/(I+N)$ para cada píxel del mapa.
	Service Area Analysis	Permite calcular y mostrar los mejores Radio Bearers disponibles para cada píxel del mapa basados en las $C/(I+N)$ de los mismos.
	Effective Service Area Analysis	Permite mostrar las zonas donde un servicio se encuentra disponible tanto en el DL como en el UL.
	Coverage by Throughput	Permite calcular y mostrar para cada píxel del mapa los Channel Throughputs y Cell Capacities basados en los niveles de $C/(I+N)$ y en los Radio Bearers disponibles. Además permite mostrar el Aggregate Cell Throughput para resultados de simulaciones.
	Coverage by Quality Indicator	Permite calcular y mostrar diferentes indicadores de calidad (BLER, BER, etc.) basados en los Radio Bearers y en los niveles de $C/(I+N)$ de cada píxel.

Tabla 3.1 Tipo de predicciones posibles con atoll

3.2 Simulaciones Monte Carlo

Las simulaciones de ATOLL corresponden a una foto instantánea de la red para una distribución de usuarios dada. Los principales outputs de las simulaciones son la distribución geográfica de los usuarios con sus respectivas demandas de tráfico, la asignación de los recursos a cada uno de los usuarios simulados y las cargas de tráfico de las celdas.

Los resultados de dichas simulaciones pueden ser observados en el mapa así como en tablas que muestran las estadísticas de las simulaciones y los datos relacionados a los Sites, Cells y Mobiles.

El algoritmo que emplea ATOLL para las simulaciones de las redes LTE se muestra en la Figura 3.2. El proceso consta de los siguientes pasos:

1. Generación y distribución de los usuarios.

ATOLL genera una distribución de usuarios para cada simulación mediante el algoritmo Monte Carlo. Los usuarios son generados usando una distribución de Poisson basándose en los mapas de tráfico que contienen la información del tipo de entorno (Environment) para cada píxel del mapa. Cada uno de los Environments tiene a su vez la información de los perfiles de usuario con sus movilidades y densidades asociadas.

Cada móvil generado tiene asignado un servicio, una movilidad y un tipo de terminal de acuerdo al perfil de usuario que se le ha asignado previamente. También se determina para cada móvil el status de transmisión (p. ej. inactivo, activo en el DL, activo en el UL o activo en DL y UL) de acuerdo a las probabilidades de actividad para cada servicio.

2. Determinación de la mejor celda servidora

En este punto se determina la mejor celda servidora para cada móvil según los niveles de señal recibida en el downlink de las señales de referencia de los distintos transmisores, siendo seleccionada aquella con la mayor potencia de señal recibida.

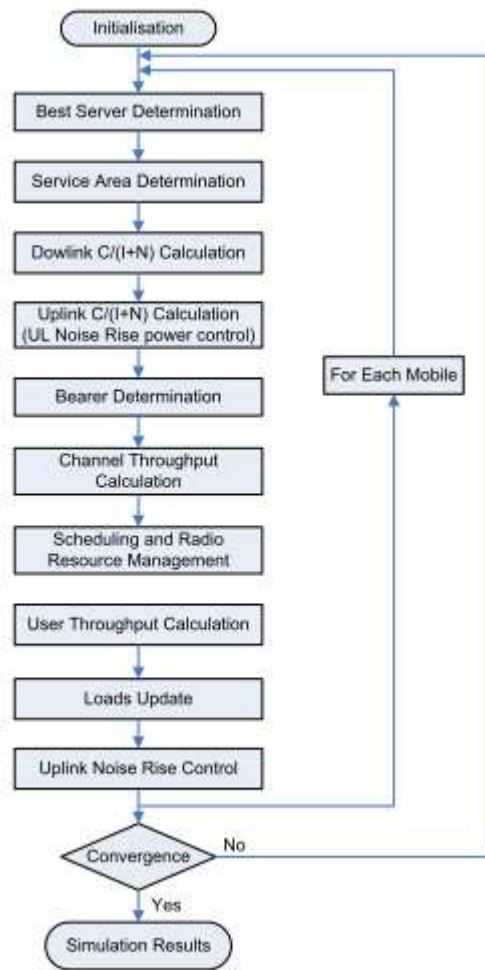


Figura 3.2 Simulación Montecarlo

3. Determinación del área de servicio

Para cada móvil se determina si se encuentra dentro del área de servicio de la celda seleccionada como su mejor servidor. Para esto se debe cumplir que el EPRE de la señal de referencia recibido por el móvil sea mayor o igual al mínimo RSRP (Received Reference Signal Energy per Resource Element) definido para la celda.

4. Cálculos en el downlink

Se calcula la $C/(I+N)$ de las señales de referencia, SS, PBCH, PDSCH y PDCCH para cada móvil en el downlink, se determina el mejor Bearer disponible según la $C/(I+N)$ del canal PDSCH, se calcula el Channel Throughput en la ubicación del móvil, se realiza la asignación de los recursos a los usuarios de cada celda de acuerdo a las prioridades de los servicios y a las demandas de throughput y por último se calcula el User Throughput de cada usuario según los recursos que le fueron asignados.

5. Cálculos en el uplink

De forma similar al downlink, en el uplink se calcula la $C/(I+N)$ de los canales PUSCH y PUCCH, se determina el mejor Bearer disponible según la $C/(I+N)$ de los canales PUSCH y PUCCH, se realiza el control de potencia en el uplink, se calcula el Channel Throughput, se lleva a cabo la asignación de los recursos y se calcula el User Throughput de cada usuario.

6. Resultados

Una vez que se han asignado los recursos a todos los móviles se actualizan los valores de Traffic Load y UL Noise Rise de acuerdo a la cantidad total de recursos en uso en cada celda.

De acuerdo a los valores de UL Noise Rise y Max UL Noise Rise de cada celda se realiza el control de potencia de transmisión de los móviles de las celdas vecinas para ser tomados en cuenta en las siguientes iteraciones.

4. Simulaciones

4.1. Parámetros generales

Para las diferentes simulaciones que se van a realizar existen una serie de parámetros globales y de capas necesarios para la creación de los proyectos. En este capítulo se describirán la configuración de los usuarios para crear el mapa de tráfico, los diferentes tipos de servicio que se brindarán por usuario, el mapa de altitudes, foto aérea donde reproduce la simulación, tipos de clusters y el mapa vector.

El archivo SEVILLA_ortho_1.bmp no es más que una foto aérea en blanco y negro de la ciudad de Sevilla siendo la dimensión de este mapa 30 x30 km.

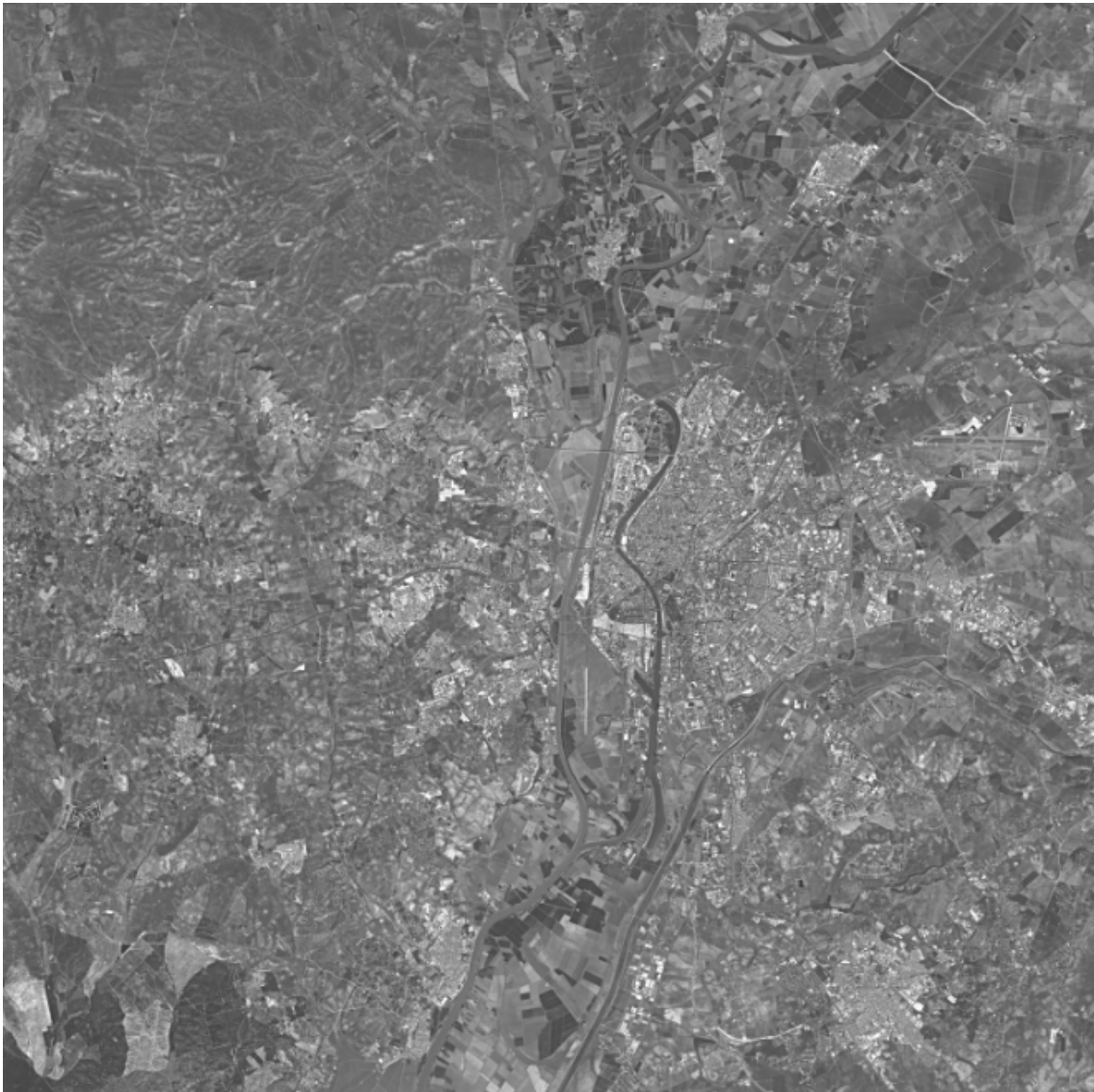


Fig4.1 Foto aérea de Sevilla

El archivo Sevilla_dem_1_1 es un archivo que contiene por cada píxel, con una resolución de 2 metros, la altitud.

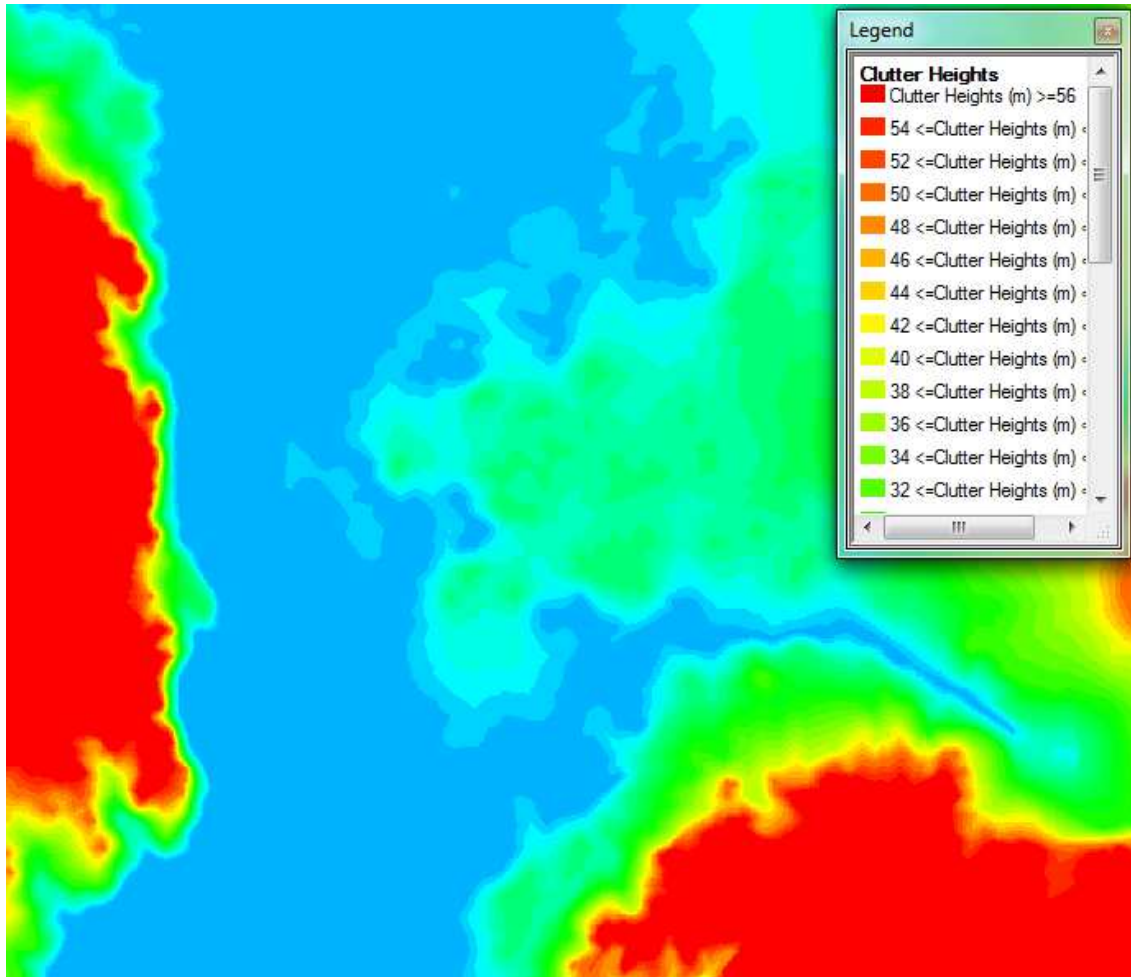


Fig4.2 Orografía del terreno

El archivo Clutter muestra los Clutter que componen la ciudad de Sevilla los cuales nos servirán para definir los modelos de propagación.

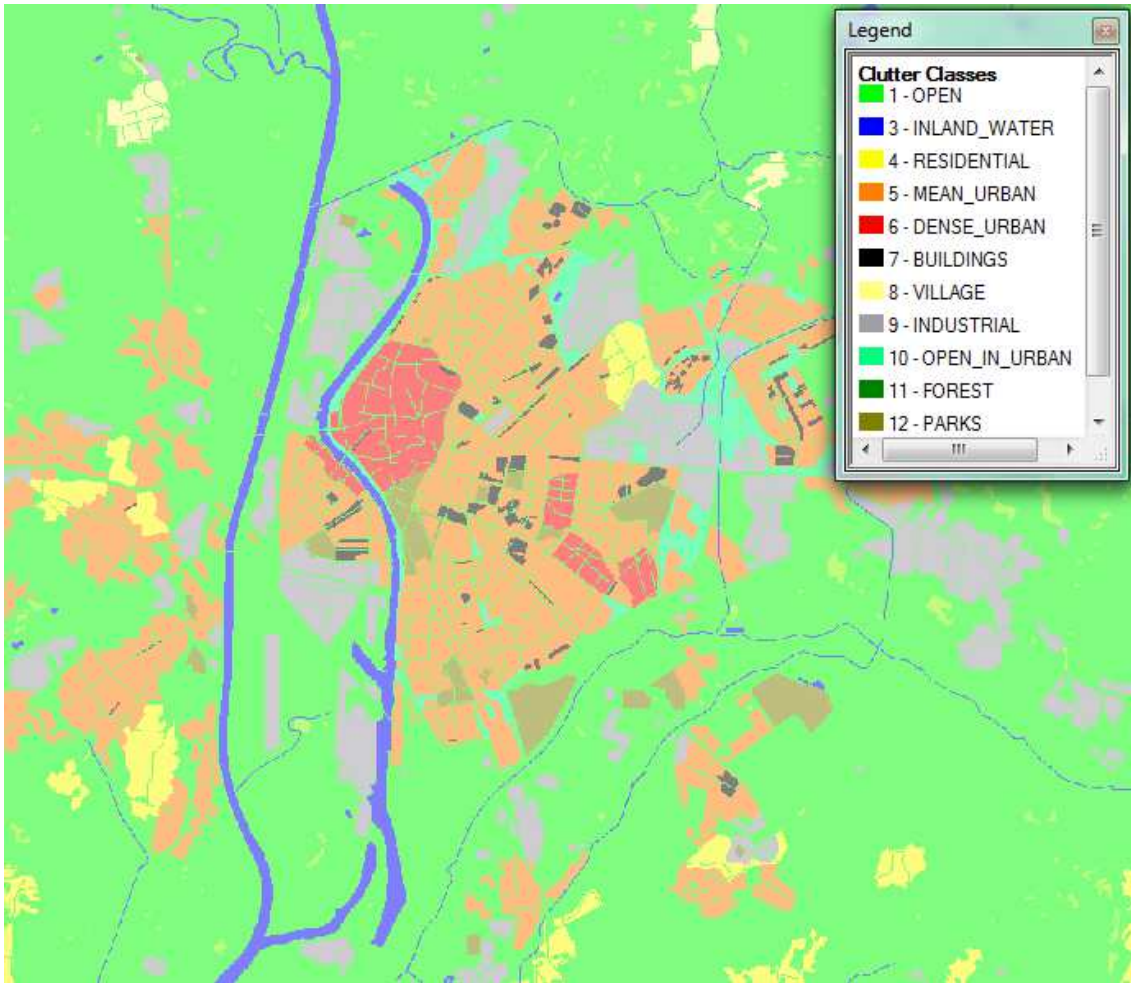


Fig4.3 Distribución Clutters

En el archivo traffic están definidas las densidades de población por km cuadrado y la distribución de usuarios.

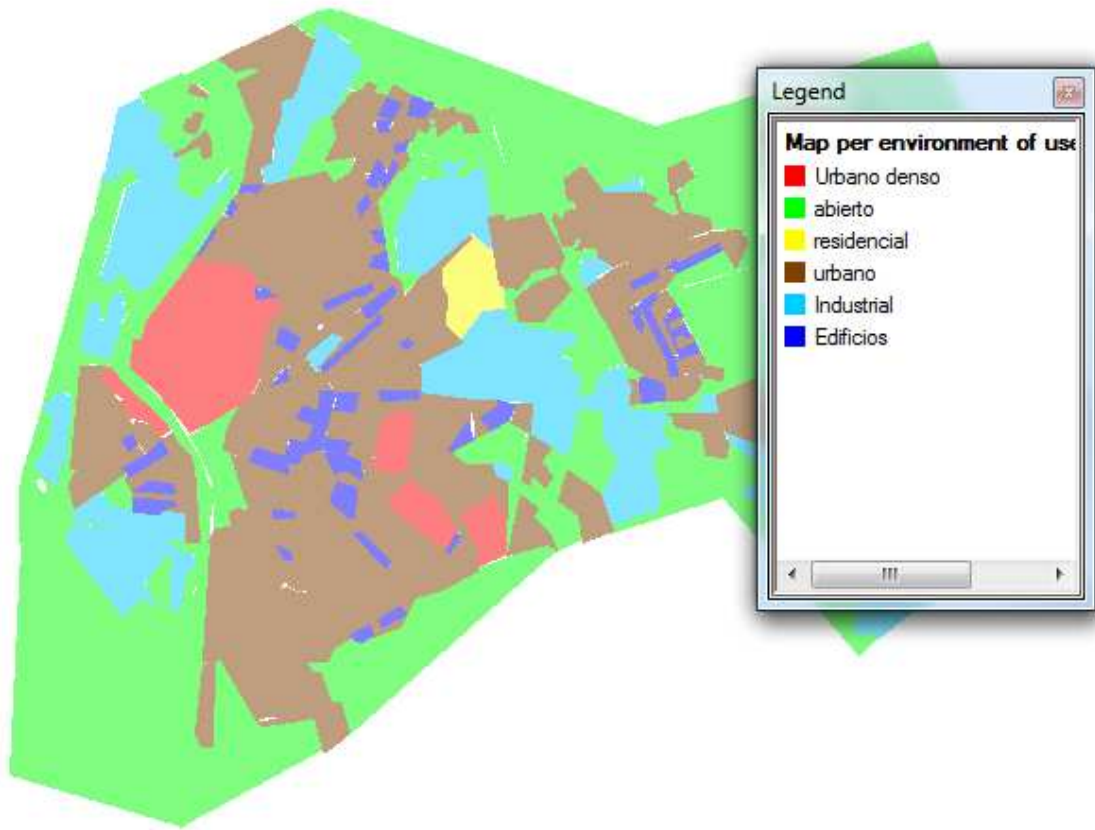


Fig4.4 Mapa de tráfico

Zona	Standard users	Bussiness Man
Urbano denso	800	800
Abierto	20	0
Residencial	200	0
Urbano	400	400
Industrial	400	400
Edificios	600	600

Tabla 4.1 Tipo de usuarios por zona de tráfico

Cada usuario tiene las siguientes características:

Bussiness man					
Service	Terminal	Calls/hours	Duration(sec)	ULVol(kB)	DLVol(kB)
FTP Download	MIMO Terminal	0.01		2000	15000
Video Conferencing	MIMO Terminal	0.01	600		
VIP	Mobile Terminal	0.2	240		
Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4500

Tabla 4.2 Características de usuario Bussiness man

Standard Users					
Service	Terminal	Calls/hours	Duration(sec)	ULVol(kB)	DLVol(kB)
VoIP	Mobile Terminal	0.2	240		
Web Browsing	MIMO Terminal	0.1		700	4500

Tabla 4.3 Características de usuario Standard Users

Y finalmente los servicios.

Nombre	Tipo	Prioridad	Máximo TH	Mínimo TH	Perdidas(dB)
			DL/UL (kbps)	DL/UL (kbps)	
VIP	Voz	3	12,2/12,2	12,2/12,2	3
Web Browsing	Datos	1	128/64	64/32	0
FTP Download	Datos	0	1000/100	0/0	0
Video conferencing	Voz	2	64/64	64/64	0

Tabla 4.4 Características de los servicios

Los tamaños usados en las celdas para las simulaciones en las tres bandas 800, 1800, 2600 son 550, 500, 450, 400 y 300 metros para conseguir el objetivo marcado por el ministerio para cualquier operador de telefonía de un 2% en la tasa de bloqueo de llamadas.

El modo de proceder para realizar todas las simulaciones será el siguiente:

1. Crear una plantilla para crear los emplazamientos a utilizar en la que se definirá los parámetros. En todas las simulaciones será la misma a excepción de la banda utilizada, antena y radio. A continuación se muestra un ejemplo de la plantilla utilizada para la simulación de LTE 800 con ancho de canal de 10 MHz y radio de celda de 550 m.

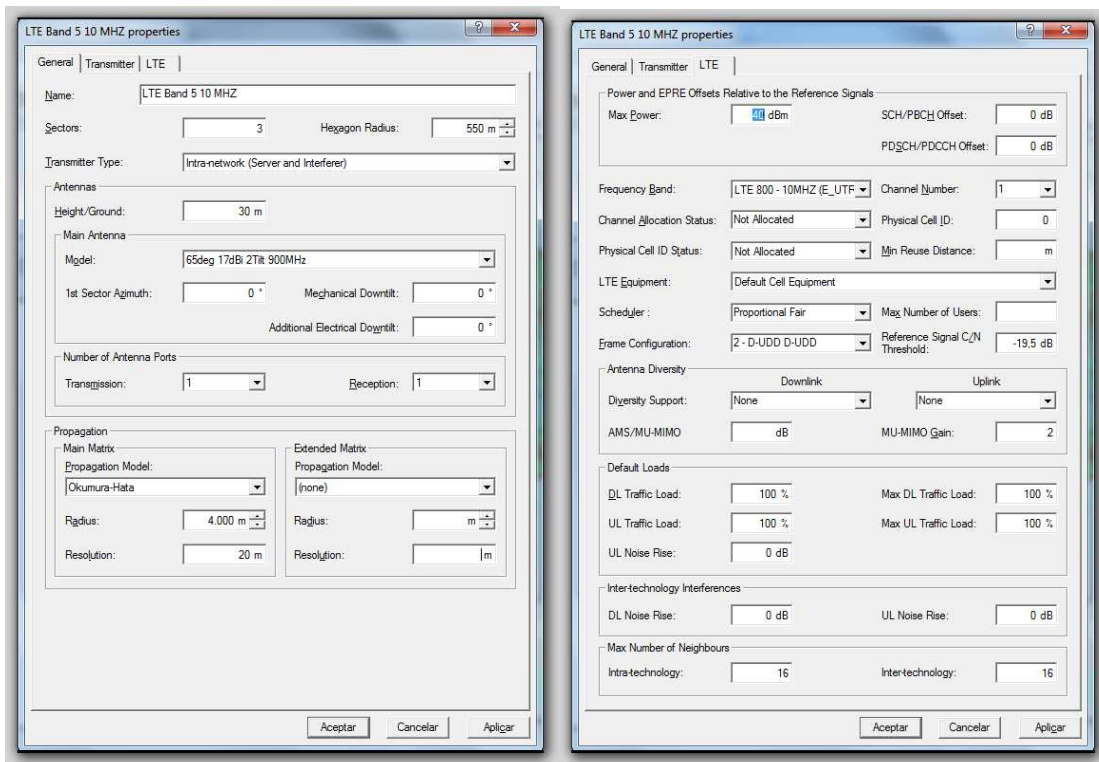


Fig4.5 Plantilla LTE

Obteniendo una distribución como se muestra en la captura siguiente:

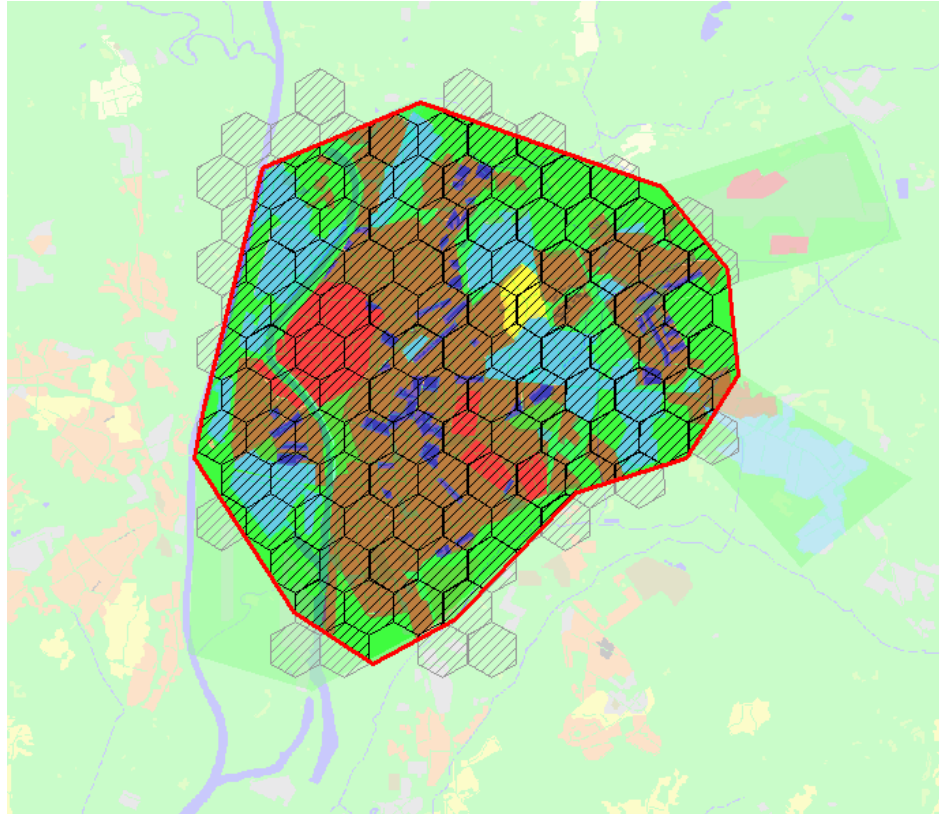


Fig4.6 Distribución de celdas

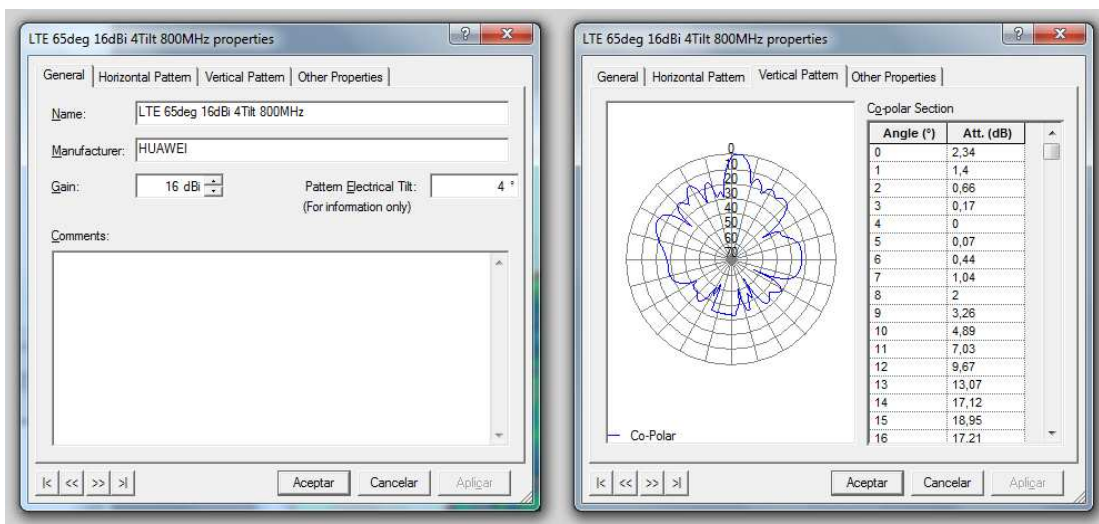
2. Definición de los vecinos (*Transmitters > cells > Neighbours*)
3. Asignación de frecuencias de las celdas(*Transmitters > cells > Frequency Plan*)
4. Asignación de la id física de las celdas(*Transmitters> cells> Physical Cell ID*)
5. Simulación de los resultados(*LTE Simulations*)

4.2. Simulaciones con LTE 800

Las características de la banda que vamos a utilizar en este apartado se muestran en la tabla 4.5, y la antena que se utilizará para todas las simulaciones en esta banda será la mostrada en la figura 4.7

Banda	LTE 800 – 10MHZ	LTE 800 - 5MHZ
Channel Width (MHz)	10	5
First channel	0	0
Last channel	1	4
FDD: DL Start Frequency (MHz)	894	894
FDD: UL Start Frequency (MHz)	849	849
Adjacent Channel Suppression Factor (dB)	28,23	28,23
Sampling Frequency (MHz)	15,36	7,68
Duplexing Method	FDD	FDD
Number of Frequency Blocks (RB)	50	25

Tabla 4.5 Características de las bandas para LTE 800



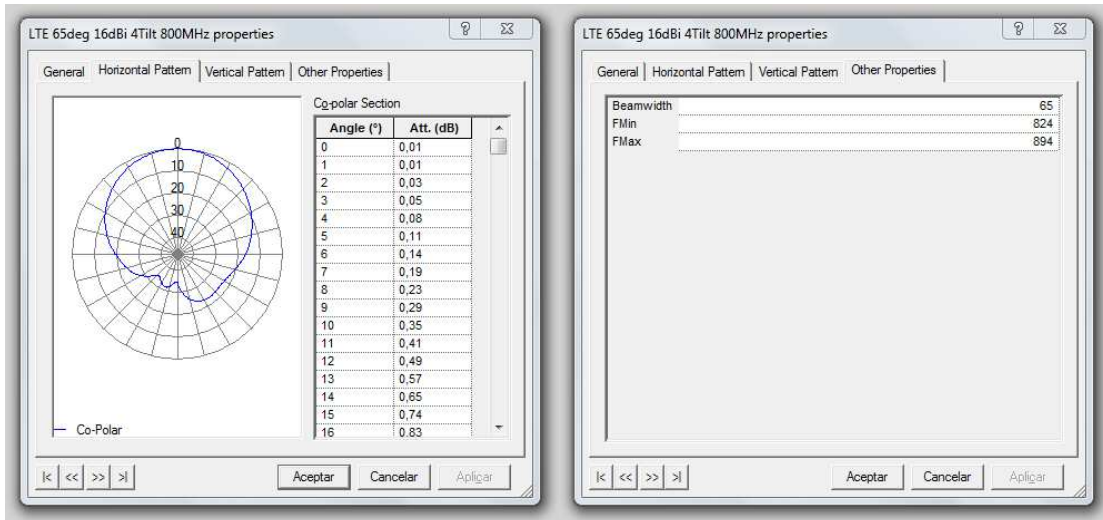


Fig4.7 Características de las antenas para LTE 800

El módulo de propagación es Okumura-Hata siguiendo las recomendaciones del manual de atoll.

La distancia de reutilización para la asignación de frecuencias y de las Cell ID para la banda LTE 800 10 MHz utilizando las formula descrita a continuación y teniendo en cuenta las características de las bandas disponibles son:

$$D = \sqrt{3KR}$$

Siendo la D la distancia entre celdas que usarán el mismo canal, K el número de frecuencias disponibles, y R el radio de las celdas.

Tamaño de celda(m)	LTE 800 5 MHz	LTE 800 10 MHz
550	2130	1347
500	1936	1224
450	1742	1102
400	1549	979
300	1161	734

Tabla 4.6. Distancia de reutilización para LTE 800

4.2.1. Simulaciones e interpretación de resultados

Lo primero que comprobamos es que el nivel de señal en todas las celdas es suficiente para dar los servicios que se quieren simular. Como se puede apreciar el 100% de la zona de estudio está por encima de -85 dBm, con lo que tenemos suficiente potencia de señal.

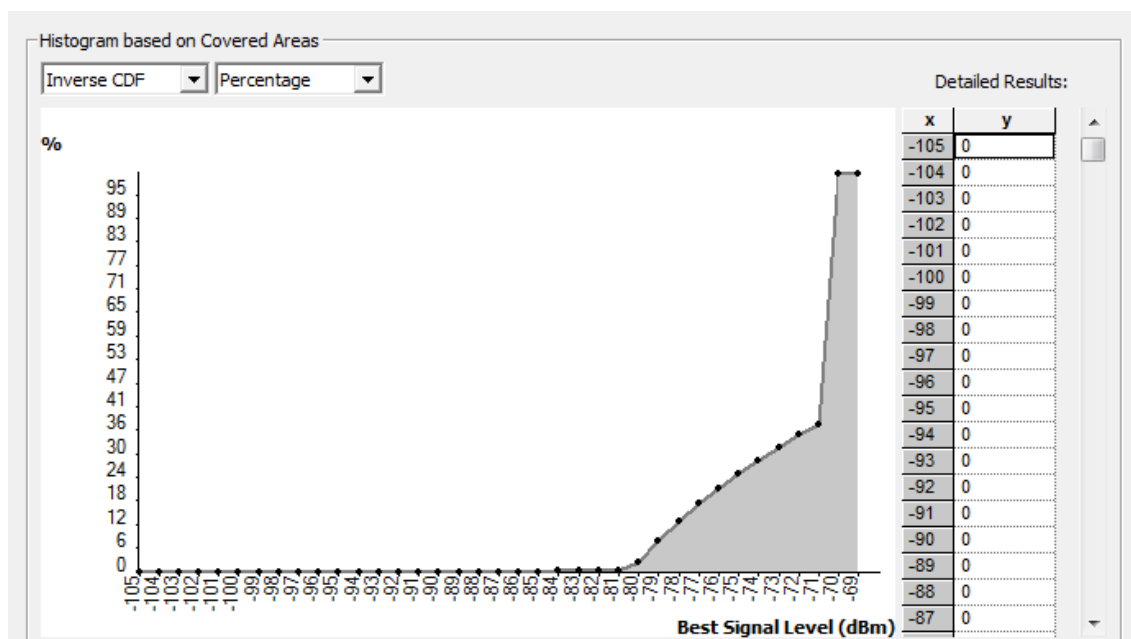


Fig4.8. Best Signal Level LTE 800 10 MHz con radio de 550 metros

Vistos los resultados de la anterior predicción sabemos con total seguridad que no tendremos problemas con el resto de tamaños de celda para dar cobertura, ya que estos son de un radio menor y la señal se verá menos atenuada al tener que recorrer menor distancia.

Antes de mostrar los datos arrojados por las simulaciones aclararemos los términos que aparecen en ellos:

- *Radio de Hexágono*: Radio de hexágono de la celda.
- *Usuarios Conectados*: Usuarios que cumplen las condiciones mínimas requeridas para la asignación de una portadora

- *Saturación Scheduler*: Cantidad de usuarios no conectados por saturación del Scheduler.
- *Saturación Recursos*: Cantidad de usuarios no conectados por falta de recursos RF.

- *RLC Efectivo DL/UL* : es el Throughput neto de la capa RLC (usuario o canal) que puede ser logrado en una determinada localidad usando el bearer más alto disponible calculado, teniendo en cuenta la reducción de velocidad dada por retransmisiones debido a errores.

- *Usuarios FTP Download*: Cantidad de usuarios utilizando el servicio FTP de forma exitosa.

- *Usuarios Video Conferencia*: Cantidad de usuarios utilizando el servicio de Video Conferencia de forma exitosa.

- *Usuarios Voz IP*: Cantidad de usuarios utilizando el servicio de Voz IP de forma exitosa.

- *Usuarios Web Browsing*: Cantidad de usuarios utilizando el servicio WEB de forma exitosa.

Los resultados de las simulaciones para la banda LTE 800 10 MHz son

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2080(83)	2029(82)	2032(81,7)	1989(80,3)	1982(80,5)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	571,46	580,61	599,09	582,79	624,87
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,04	30,79	31,3	30,31	30,25
Usuarios FTP Download (%)	753(81,5)	741(80,3)	728(79,9)	711(78,2)	710(78,6)
Usuarios Video Conferencia (%)	26(86)	26(87,7)	25(87,7)	26(79,8)	23(84,3)
Usuarios Voz IP (%)	460(85,1)	453(82,7)	447(82,5)	436(82,5)	444(82,5)
Usuarios Web Browsing (%)	841(83,1)	808(83)	831(82)	817(80,9)	805(81)

Tabla 4.7. Simulación LTE 800 10 MHz

Para la banda de LTE 800 5 MHz los resultados son los siguientes:

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2240(90,2)	2241(91,5)	2229(89,4)	2229(89,4)	2198(87,5)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	516,3	563,76	588,72	588,53	659,93
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,04	31,59	32,15	31,13	31,04
Usuarios FTP Download (%)	822(89,4)	810(90,2)	817(88,5)	824(88,6)	800(86,4)
Usuarios Video Conferencia (%)	27(93,5)	29(94,2)	25(90,6)	27(90)	26(87,7)
Usuarios Voz IP (%)	488(90,5)	496(92,4)	477(90,2)	469(89,6)	485(88,4)
Usuarios Web Browsing (%)	903(90,3)	905(91,5)	909(89,7)	893(89,5)	886(88)

Tabla 4.8. Simulación LTE 800 5 MHz

Como se aprecia en los resultados arrojados por las simulaciones llega un momento en que aunque reduzcamos el radio de la celda la accesibilidad empeora, esto es debido a que más usuarios tienen un peor $C/(I+N)$ y son rechazados. Este comportamiento se muestra en las dos siguientes gráficas que muestran las predicciones para los casos de ancho de 5 MHz para los radios de hexágono de 500 m y 300 m.

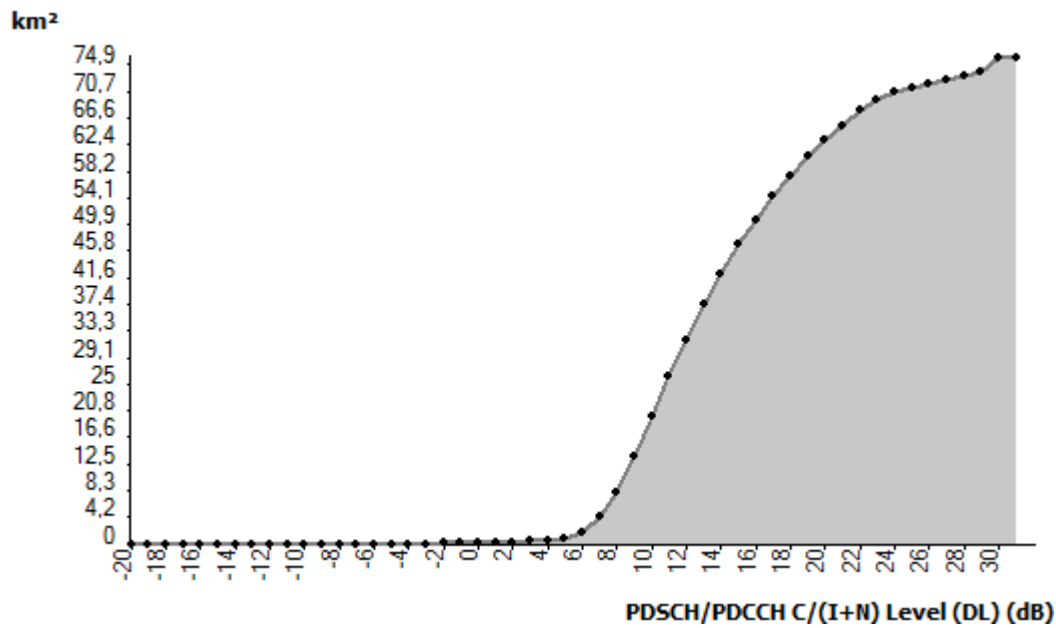


Fig4.9. PDSCH/PDCCH C/(I+N) LTE 800 5 MHz con radio de celda de 500 metros

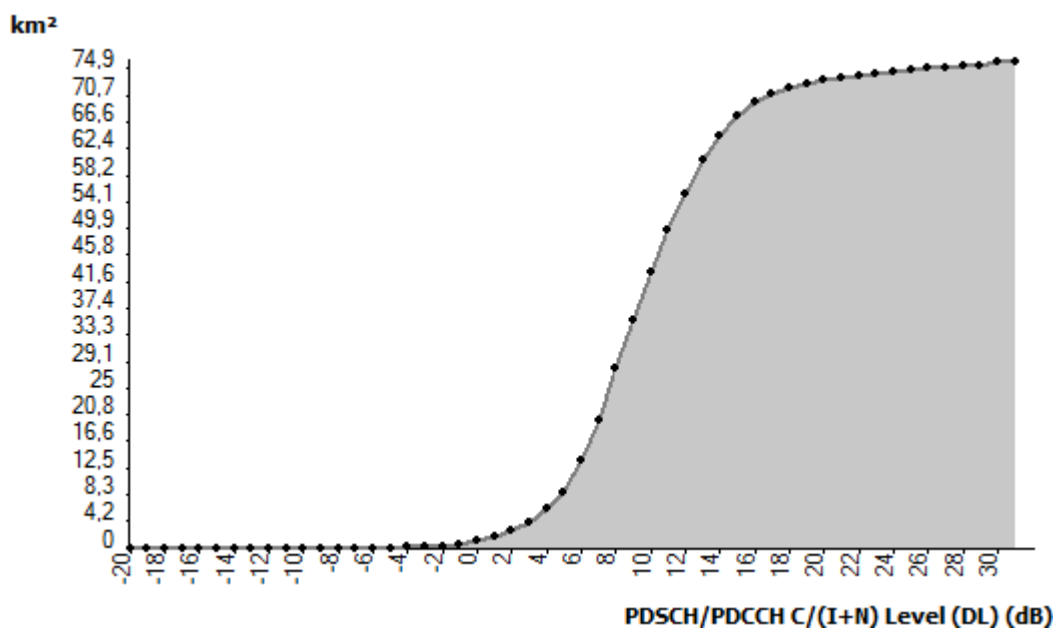


Fig4.10. PDSCH/PDCCH C/(I+N) LTE 800 5 MHz con radio de celda de 300 metros

Se aprecia que para el caso de radio de hexágono de 300 metros hay un mayor número de móviles con un valor menor a -6,5 dB, el valor mínimo de asignación de portadora. En la figura 4.11 se muestran los diferentes valores de asignación de portadora en una red LTE.

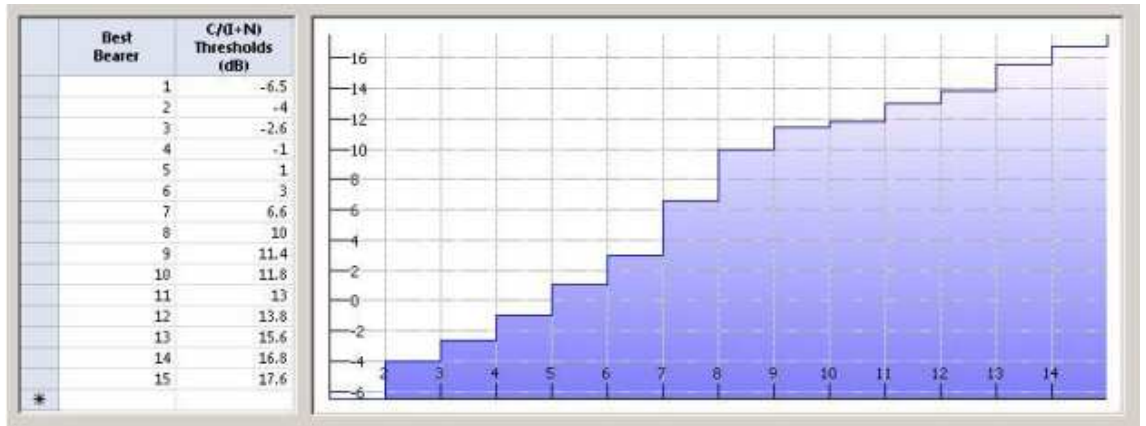


Fig4.11. Niveles de selección de portadora

A su vez se produce un aumento de la cantidad de bits cursados por la red al disminuir el radio de la celda a pesar de que el número de usuarios conectados a la red sea menor. Esto se produce porque los usuarios que están conectados tienen una mejor relación de $C/(I+N)$ y por tanto pueden optar a portadoras que le brindan un mayor Throughput. Este comportamiento se muestra en las Figuras 4.12 y 4.13.

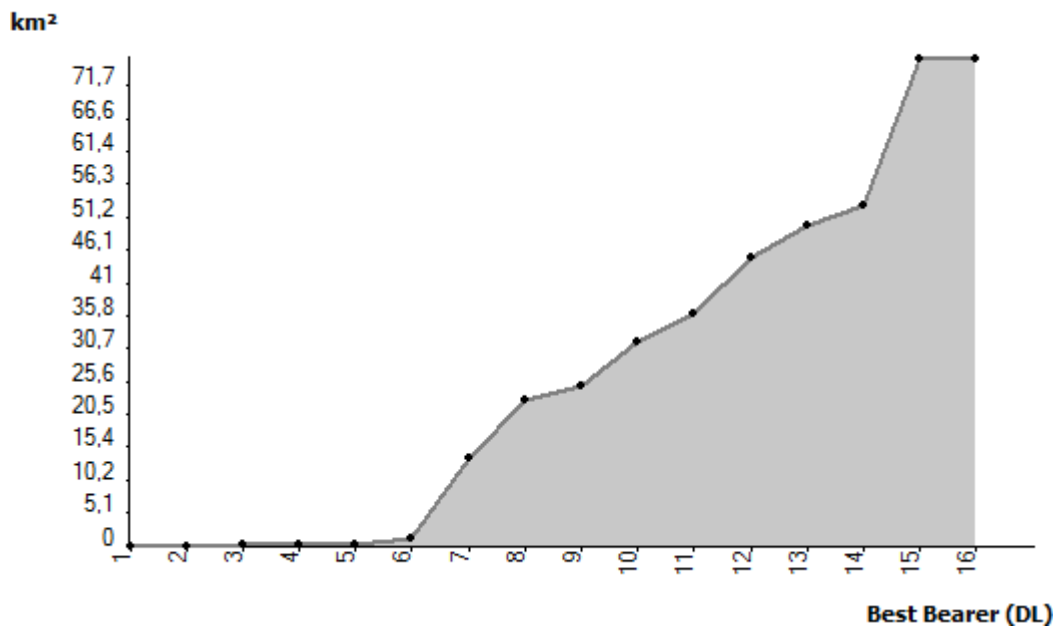


Fig4.12. Best bearer LTE 800 5 MHz radio de celda 500 metros

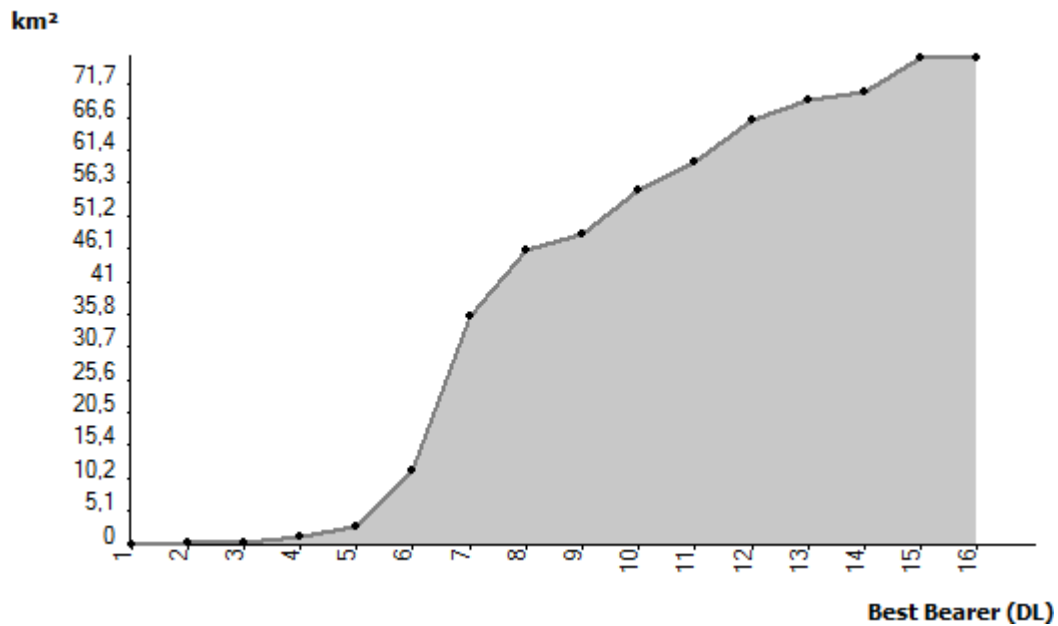


Fig4.13. Best bearer LTE 800 5 MHz radio de celda 300 metros

4.3 Simulaciones con LTE 1800

Las características de las 4 bandas que utilizaremos son:

Channel Width (MHz)	20	15	10	5
First channel	0	0	0	0
Last channel	2	4	6	14
FDD: DL Start Frequency (MHz)	1805	1805	1805	1805
FDD: UL Start Frequency (MHz)	1710	1710	1710	1710
Adjacent Channel Suppression Factor (dB)	26,99	26,99	28,23	28,23
Sampling Frequency (MHz)	23,04	23,04	7,68	7,68
Duplexing Method	FDD	FDD	FDD	FDD
Number of Frequency Blocks (RB)	100	75	50	25

Tabla 4.9. Bandas utilizadas para simulación LTE 1800

La antena que se utiliza para todas las simulaciones en esta banda es:

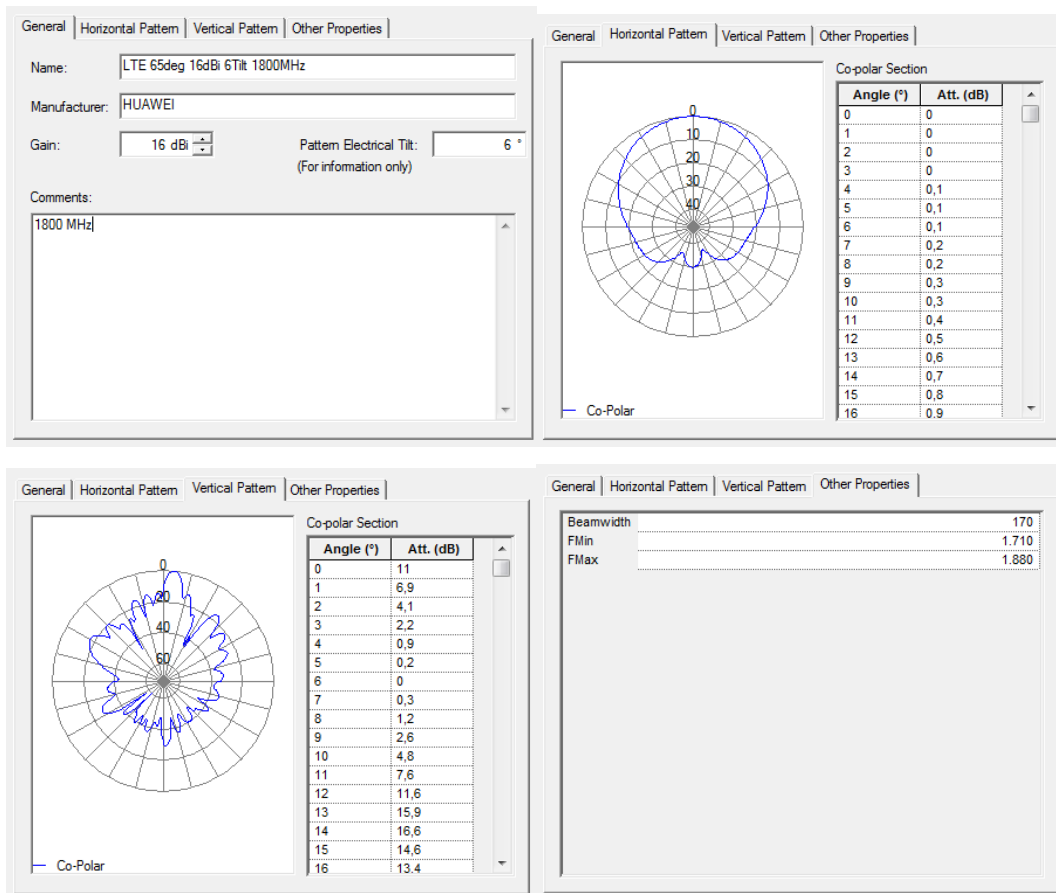


Fig4.14. Antena para LTE 1800

El módulo de propagación es Cost-Hata siguiendo las recomendaciones del manual de atoll.

La distancia de reutilización para la asignación de frecuencias y de las Cell ID para los diferentes anchos de banda es:

Tamaño de celda	Ancho de banda 5 MHz	Ancho de banda 10 MHz	Ancho de banda 15 MHz	Ancho de banda 20 MHz
550	3689	2520	2130	1650
500	3354	2291	1936	1500
450	3018	2062	1742	1350
400	2683	1833	1549	1200
300	2012	1374	1161	900

Tabla 4.10. Distancia de reutilización para LTE 1800

4.3.1 Simulaciones e interpretación de resultados

Lo primero que comprobamos es que el nivel de señal en todas las celdas es suficiente para dar los servicios que se quieren simular. Como se puede apreciar, el 100% de la zona de estudio está por encima de -102 dBm, con lo que tenemos suficiente potencia de señal, teniendo en cuenta que la sensibilidad de un móvil es de -105 dBm.

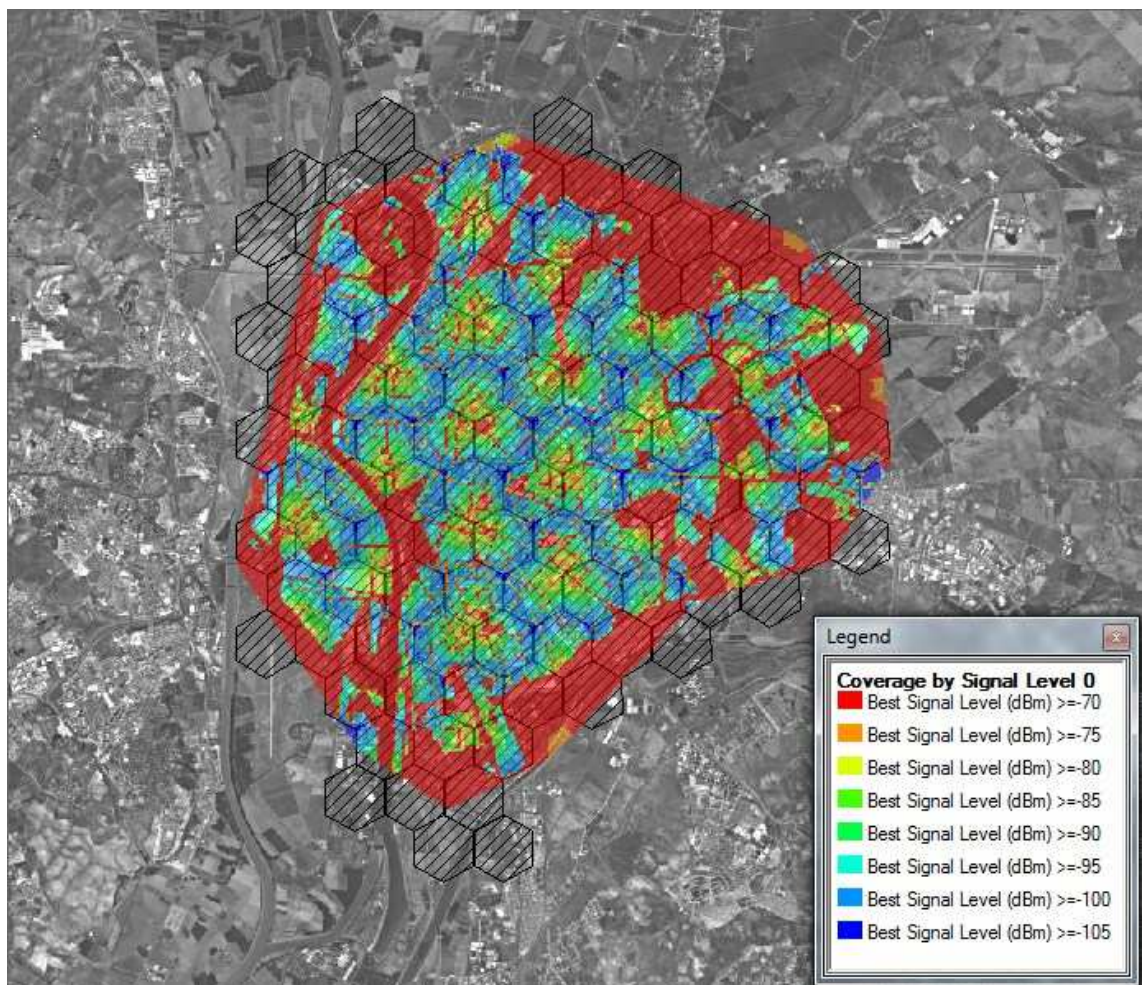


Fig4.15. Best Signal Level LTE 1800

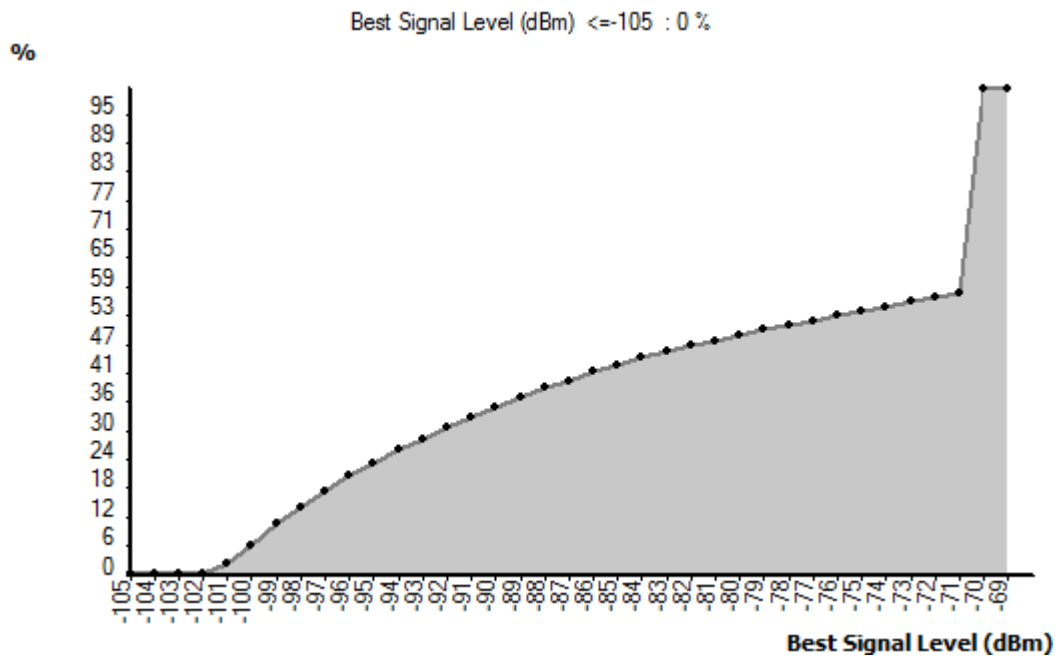


Fig4.16. Best Signal Level LTE 1800

Vistos los resultados de la anterior predicción sabemos con total seguridad que no tendremos problemas con el resto de tamaños de celda para dar cobertura ya que estos son de un radio menor y la señal se verá menos atenuada al tener que recorrer menor distancia.

Los resultados de las simulaciones para la banda LTE 1800 20 MHz, LTE 1800 15 MHz, LTE 1800 10 MHz, LTE 1800 5 MHz se encuentran en las tablas 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 respectivamente.

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2180(87,5)	2191(89,2)	2239(90,2)	2293(91,4)	2301(93)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	730,48	763,72	774,65	794,72	839,8
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,77	29,5	30,68	31,28	31,31
Usuarios FTP Download (%)	790(87)	803(88,6)	809(89,1)	826(90,6)	839(92,2)
Usuarios Video Conferencia (%)	30(89,6)	27(94,6)	26(93)	33(93)	29(94,8)
Usuarios Voz IP (%)	462(86,1)	472(89,1)	491(91,1)	507(92)	498(93,4)
Usuarios Web Browsing (%)	897(88,5)	888(89,7)	911(90,7)	926(91,6)	934(93,2)

Tabla 4.11. Resultados simulación LTE 1800 20 MHz

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2293(92,4)	2310(94,5)	2384(95,3)	2374(96,1)	2441(96,9)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	778,52	814,54	844,12	843,81	866,63
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,08	30,43	31,92	31,82	32,05
Usuarios FTP Download (%)	844(92,2)	844(94,5)	875(95,1)	868(95,7)	831(96,9)
Usuarios Video Conferencia (%)	28(92,1)	28(96,3)	31(95,2)	25(97,7)	27(96,5)
Usuarios Voz IP (%)	504(91,5)	496(93,8)	517(95,3)	509(96,2)	527(96,7)
Usuarios Web Browsing (%)	923(93,1)	941(94,9)	960(95,6)	970(96,5)	1005(97,1)

Tabla 4.12. Resultados simulación LTE 1800 15 MHz

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2360(95,6)	2370(96,3)	2391(97)	2411(97,4)	2420(98,3)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	793,94	826,7	859,94	870,09	909,44
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,08	31,2	31,04	31,63	31,79
Usuarios FTP Download (%)	856(95,7)	873(96,3)	888(96,7)	893(97,5)	927(98)
Usuarios Video Conferencia (%)	26(93,6)	28(96,5)	28(97,5)	32(97)	30(99,7)
Usuarios Voz IP (%)	512(94,9)	510(96)	514(96,6)	524(97)	536(98,7)
Usuarios Web Browsing (%)	964(96)	959(96,5)	969(97,4)	961(97,5)	976(98,3)

Tabla 4.13. Resultados simulación LTE 1800 10 MHz

Radio de hexágono (m)	550	500	450
Usuarios Conectados (%)	2437(97,7)	2426(98,3)	2467(98,8)
Saturación Scheduler	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	754,35	817,11	876,59
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,21	30,87	31,64
Usuarios FTP Download (%)	898(97,9)	902(98,3)	925(99)
Usuarios Video Conferencia (%)	31(97,5)	27(96,1)	28(99,6)
Usuarios Voz IP (%)	533(97)	512(97,7)	518(98,1)
Usuarios Web Browsing (%)	975(98)	985(98,6)	995(98,9)

Tabla 4.14. Resultados simulación LTE 1800 5 MHz

Al igual que en el caso de LTE 800 la limitación la encontramos en el canal descendente, donde se produce una interferencia cocanal que hace que los usuarios sean rechazados por la red por no cumplir unos mínimos aceptables de $C/(I+N)$, que como en el caso anterior están fijados para -6,5 dB.

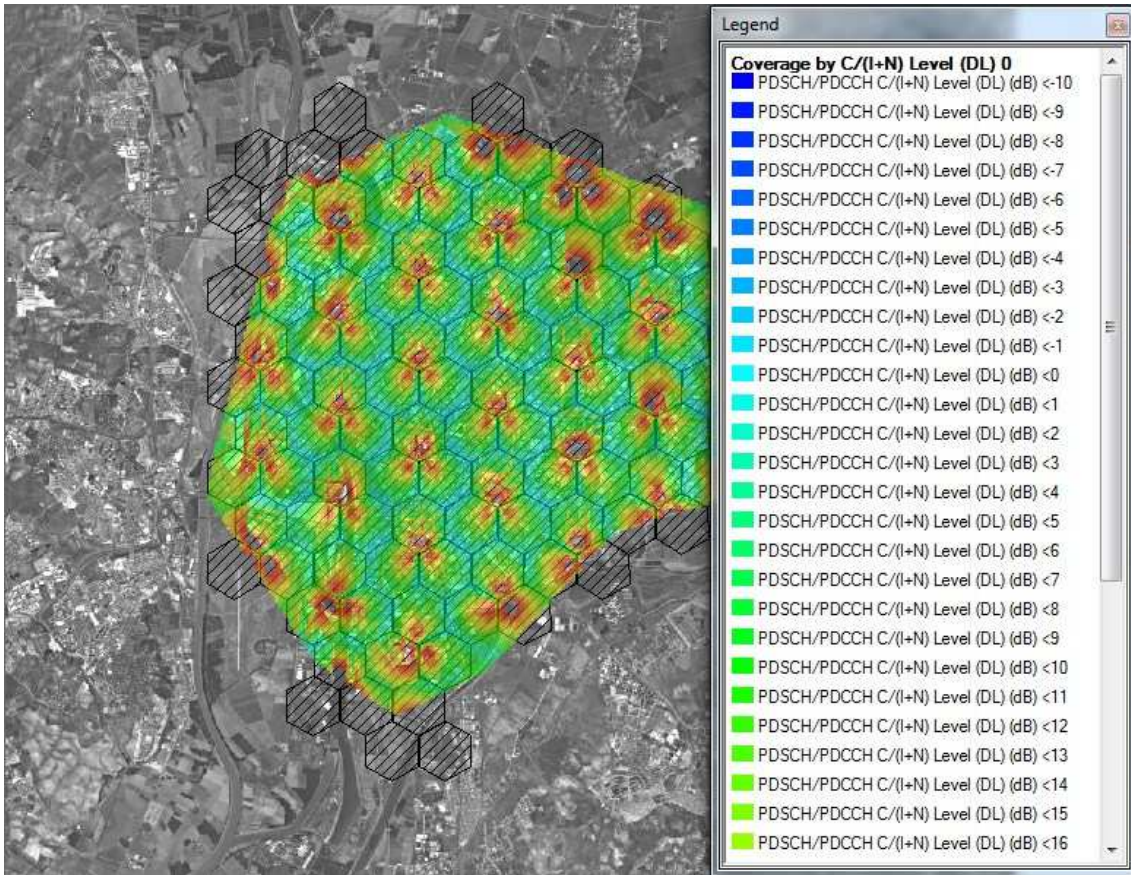


Fig4.17. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 20 MHz con radio de 550 metros

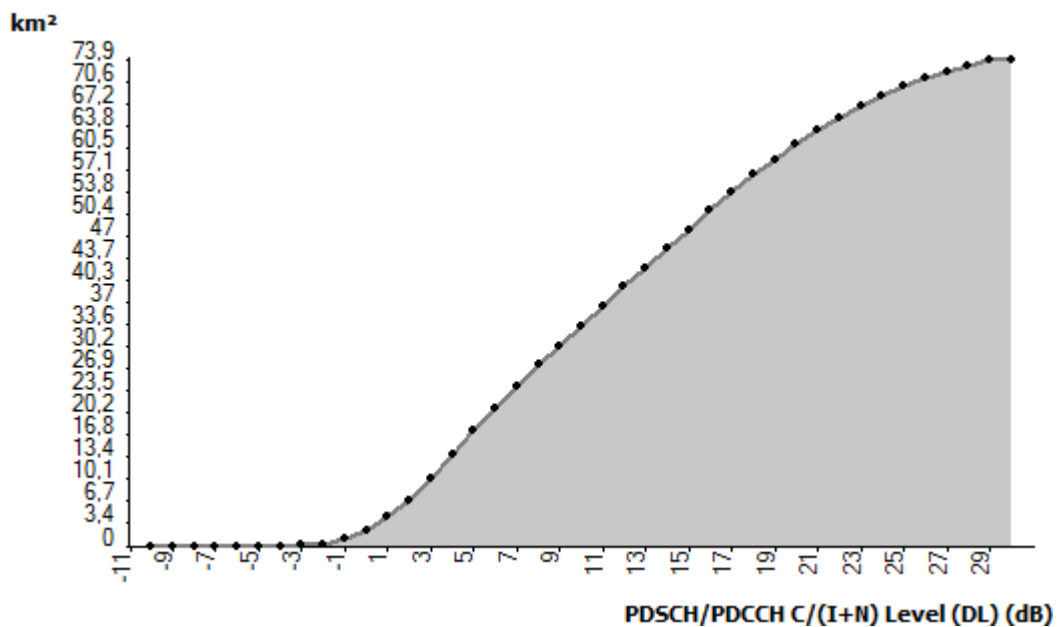


Fig4.18. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 20 MHz con radio de 550 metros

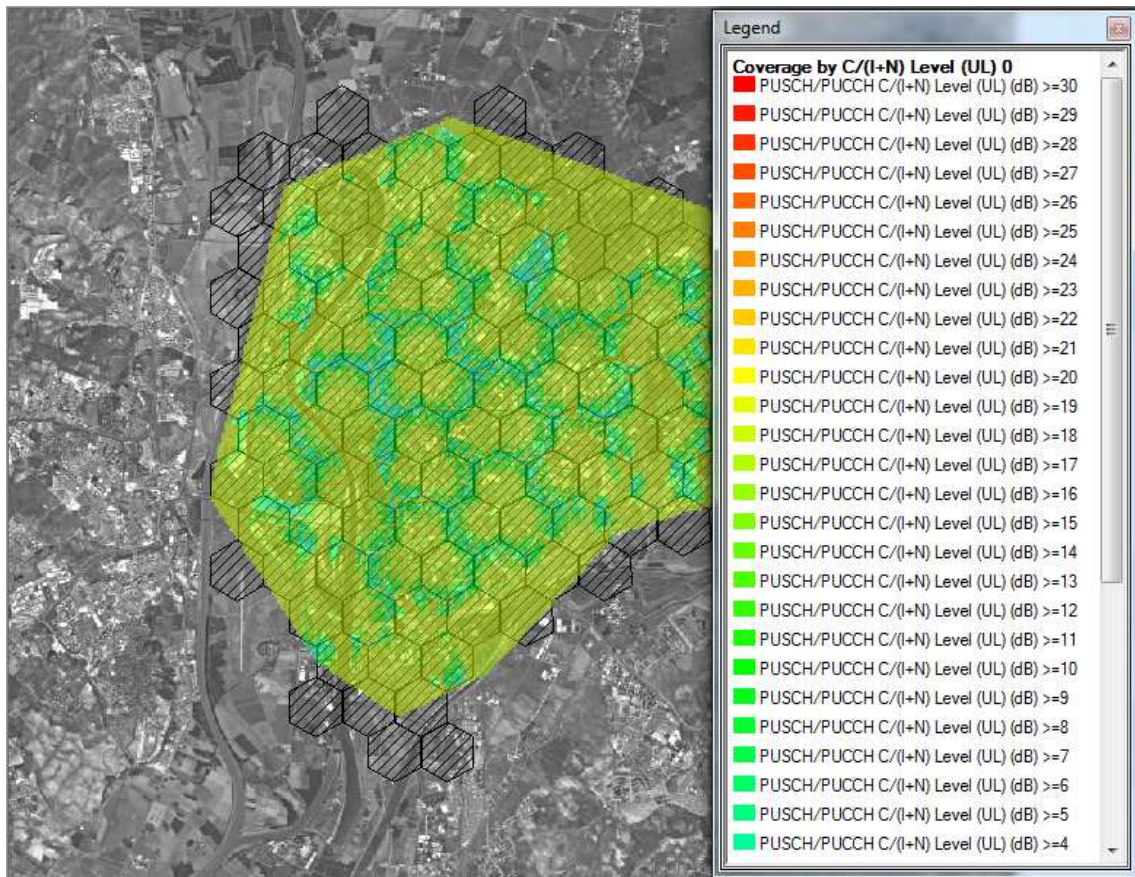


Fig4.19. PUSCH/PUCCH C/(I+N) Level UL LTE 1800 20 MHz con radio de 550 metros

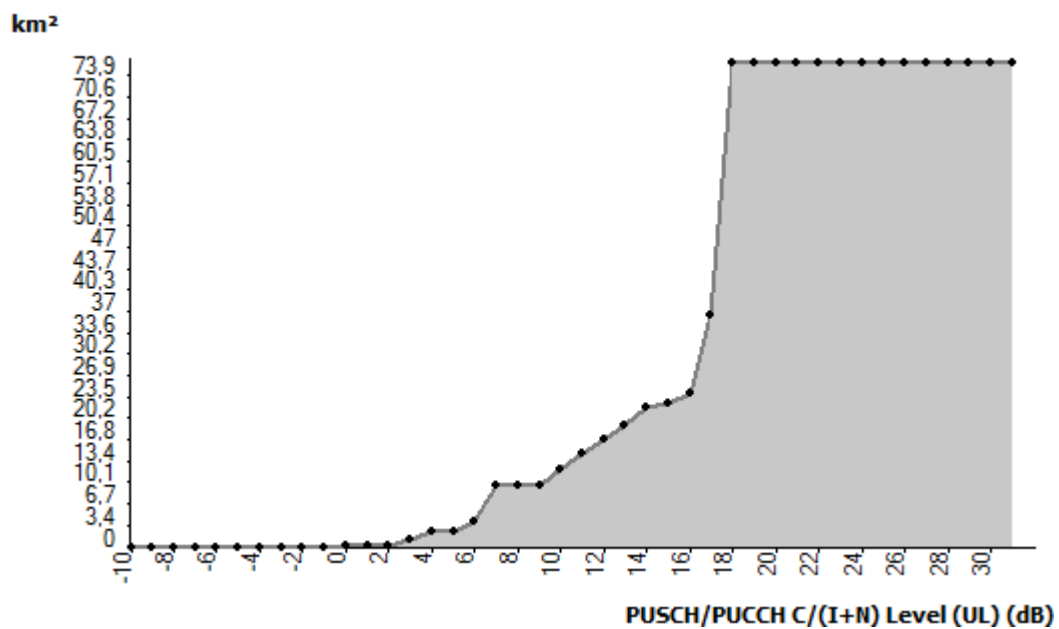


Fig4.20. PUSCH/PUCCH C/(I+N) Level UL LTE 1800 20 MHz con radio de 550 metros

Las predicciones fueron hechas para el caso de un ancho de banda 20 MHz, que es la que tenemos menos canales, concretamente 3, si hacemos estas mismas predicciones con los mismos parámetros pero cambiando solamente el ancho de canal se obtienen unos resultados totalmente diferentes como muestras las siguientes figuras.

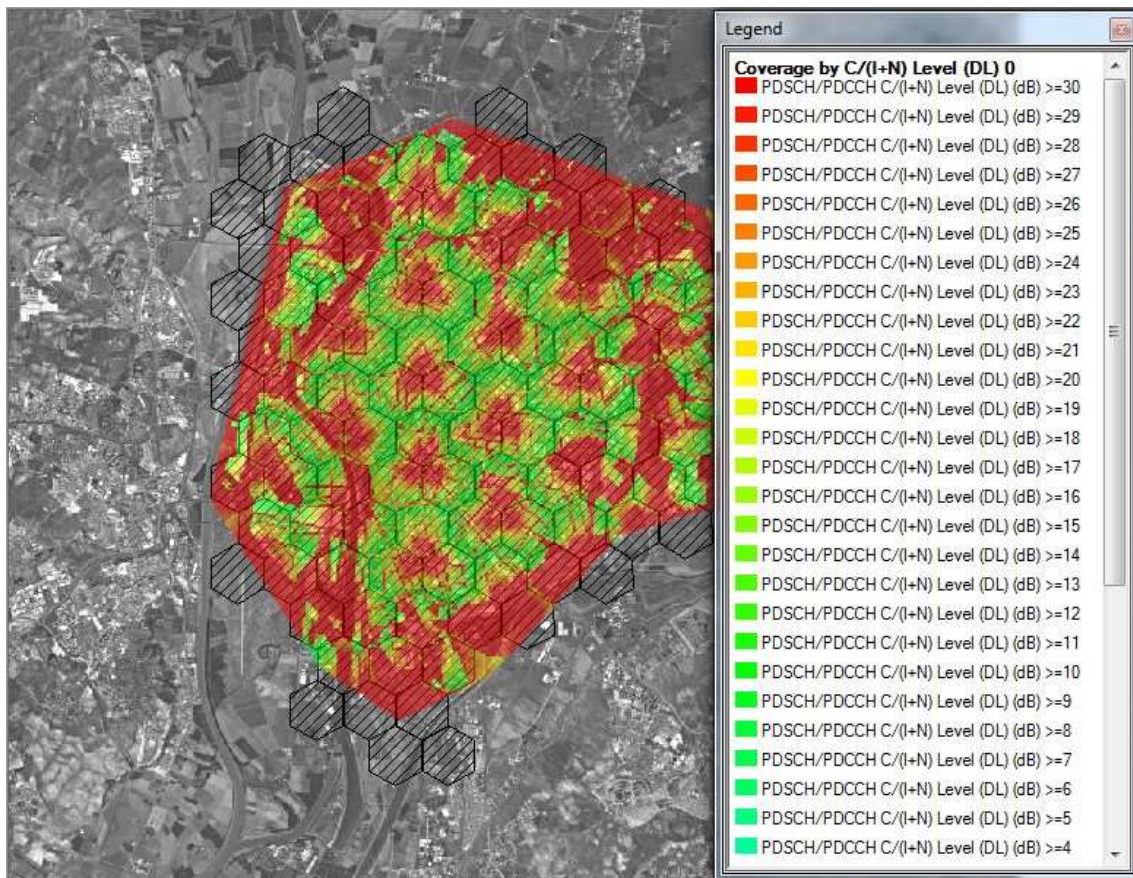


Fig4.21. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 5 MHz con radio de 550 metros

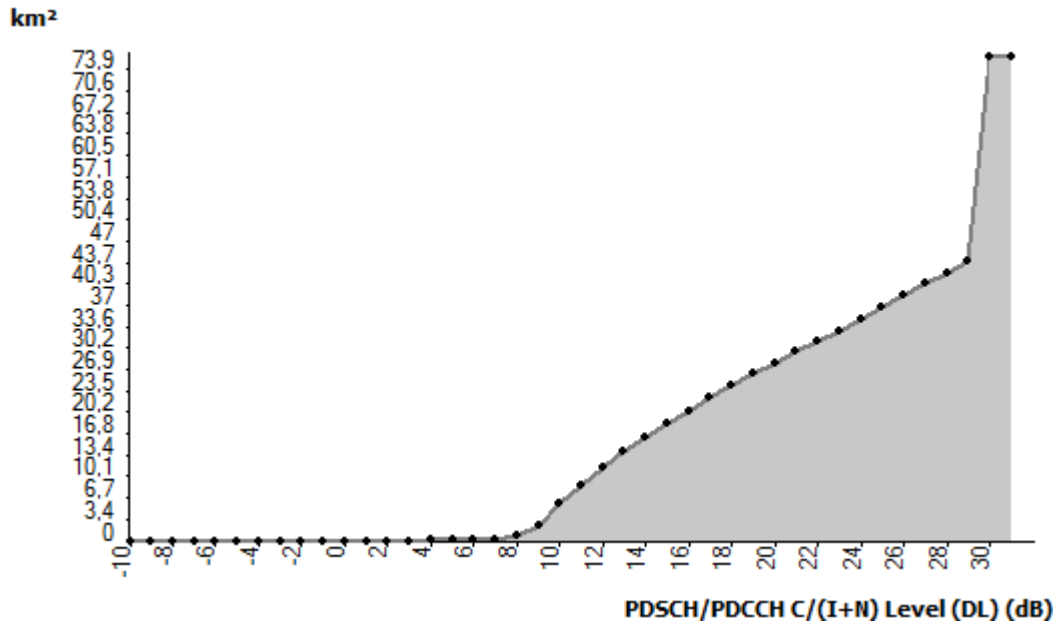


Fig4.22. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 5 MHz con radio de 550 metros

Para este caso tenemos dos configuraciones que cumplen con el criterio mínimo tanto de tamaño de radio de celda como de accesibilidad para Voz IP, los anchos de banda de 10 MHz para 300 metros de radio de celdas, y para el ancho de banda de 5 MHz de 450 metros de radio de celda.

A través de las simulaciones realizadas podemos observar el grado de utilización de cada celda. En la figura 4.23 se muestra el mallado antes y después de quitar las celdas con una utilización del 0%.

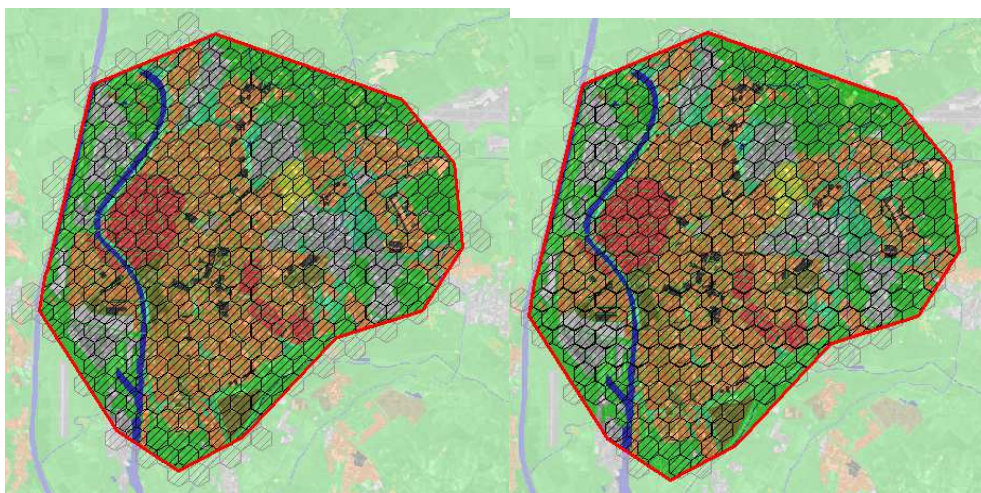


Fig4.23. Posición de las celdas antes y después la primera optimización para LTE 1800 10 MHz

Se han eliminado en su mayoría las celdas posicionadas en la frontera de la zona de cálculo. Ahora comprobaremos que el haber quitado estas celdas no ha afectado lo suficiente a la calidad de la red y lo comprobamos con el mallado original.

Optimización	Ninguna	Utilización =0%
Usuarios Conectados (%)	2420(98,3)	2.479(98,4)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	909,44	887,33
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,79	32,14
Usuarios FTP Download (%)	927(98)	896 (98,6)
Usuarios Video Conferencia (%)	30(99,7)	28(99,3)
Usuarios Voz IP (%)	536(98,7)	535 (98,2)
Usuarios Web Browsing (%)	976(98,3)	1.018(98,3)

Tabla 4.14. Resultados simulación LTE 1800 10 MHz primera optimización

Aún se siguen cumpliendo los criterios de la red a pesar de haber 33 celdas menos, pero existe una menor tasa de bits debido a que la distribución de los usuarios en el escenario propuesto no es siempre la misma entre simulación y simulación ni el tipo de servicio, habiendo en esta segunda menos usuarios intentando conectarse al servicio FTP que es el que más bits demanda. Para dar fe de este comportamiento tenemos las

Figuras 4.24 y 4.25 que muestran un comportamiento similar en lo que se refiere a $C/(I+N)$.

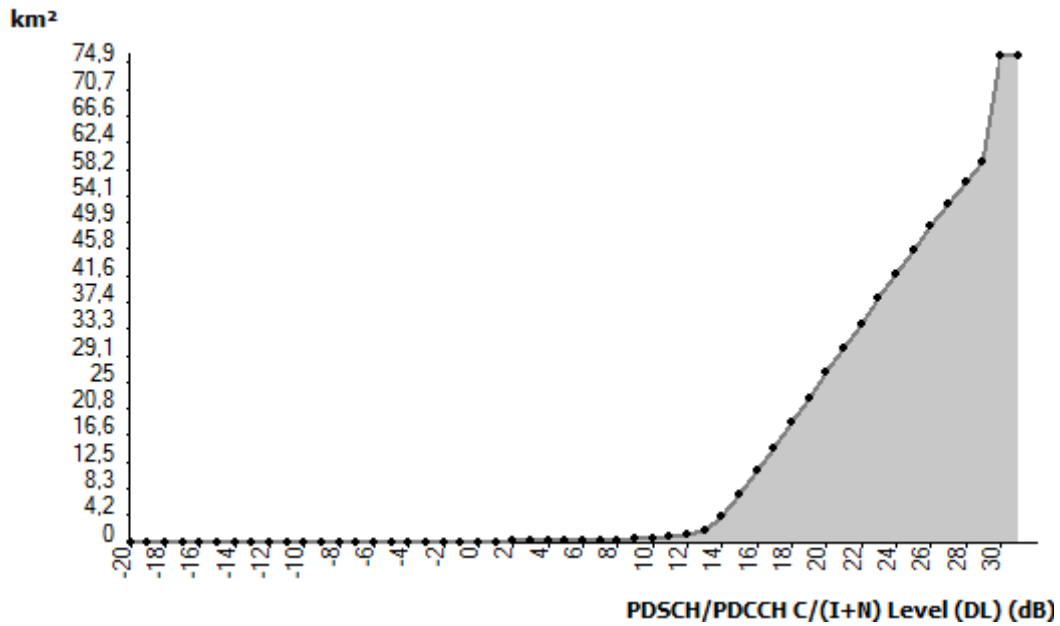


Fig4.24. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 10 MHz después la primera optimización

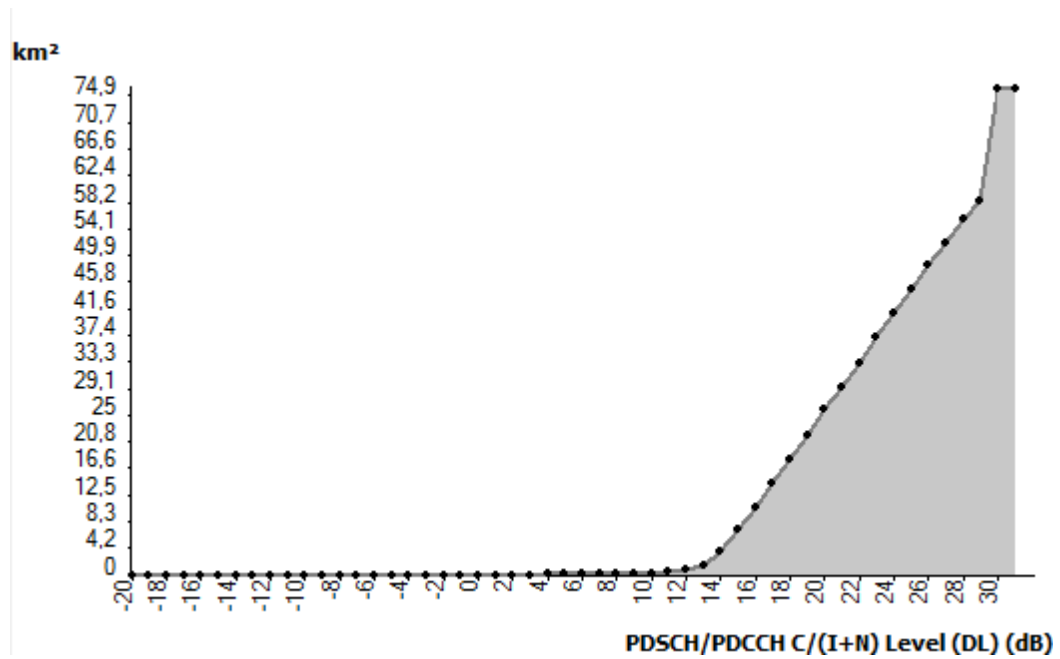


Fig4.25. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL LTE 1800 10 MHz antes de la primera optimización

Aún tenemos un pequeño margen de mejora así que eliminaremos las que tienen una utilización menor del 5%. En este caso las zonas definidas como parques,

rural y semejantes, que tienen una pequeña densidad de población, son las que se quedan sin celdas.

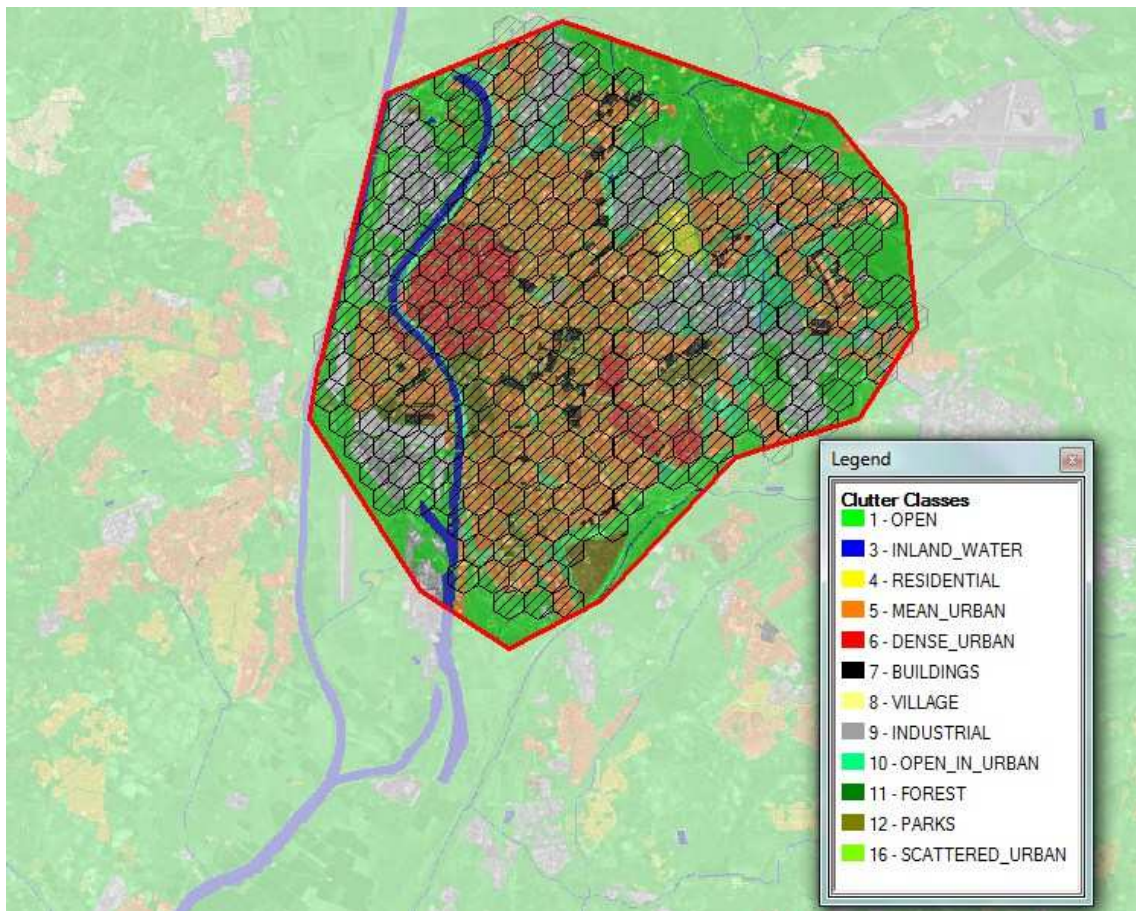


Fig4.26. Posición de las celdas después la segunda optimización para LTE 1800 10 MHz

Ahora comprobamos los datos de las simulaciones y vemos que aún cumplimos con el criterio de accesibilidad en la tabla 4.15.

El perfil de $C/(I+N)$ para este caso es el siguiente, igual que en el caso sin optimizar, además de pasar exactamente lo mismo en el primer caso con la bajada de los Mbps cursados por la red. Este comportamiento queda reflejado en las figuras 4.27 y 4.28.

Optimización	Ninguna	Utilización <5%
Usuarios Conectados (%)	2420(98,3)	2.448 (98,3)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	909,44	882,49
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,79	31,85
Usuarios FTP Download (%)	927(98)	897 (98,3)
Usuarios Video Conferencia (%)	30(99,7)	29 (98,3)
Usuarios Voz IP (%)	536(98,7)	526(98,1)
Usuarios Web Browsing (%)	976(98,3)	995(98,3)

Tabla 4.15. Resultados simulación LTE 1800 10 MHz segunda optimización

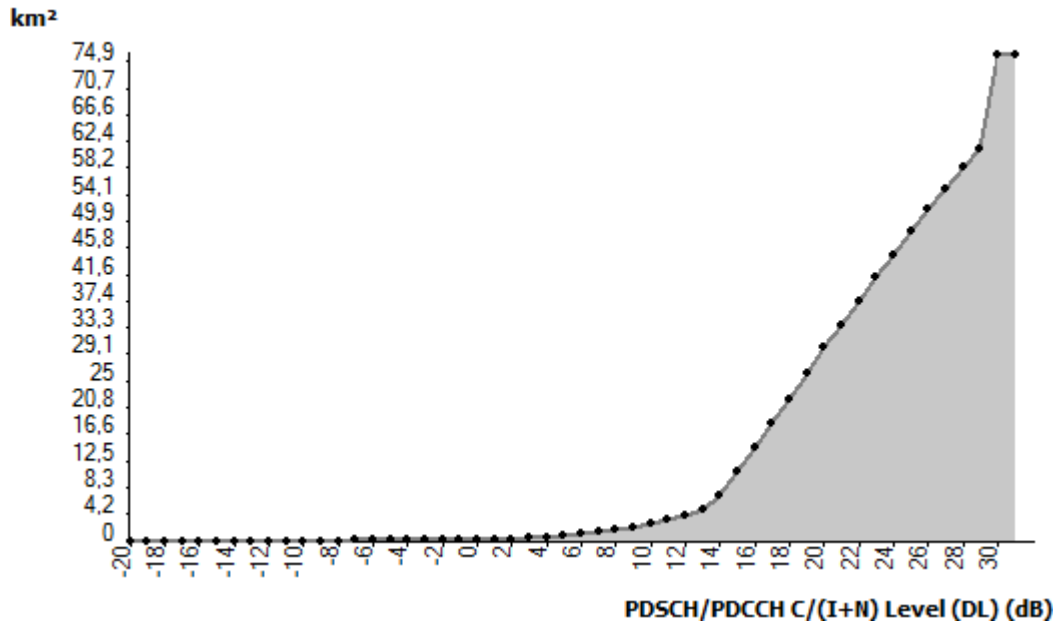


Fig4.27. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL después de la segunda optimización para LTE 1800 10 MHz

En cuanto a la utilización de las celdas, con cada optimización de los recursos que tenemos se produce una mejora. Esto se observa ya que el porcentaje de celdas con utilización menor reduce su número en cada simulación. De aquí en adelante las celdas con menos de un 5% de utilización serán eliminadas para así tener un menor número de celdas y por tanto de material que instalar para crear nuestra red. En este caso nos ahorraríamos 83 celdas, un 23% de las que teníamos en un principio.

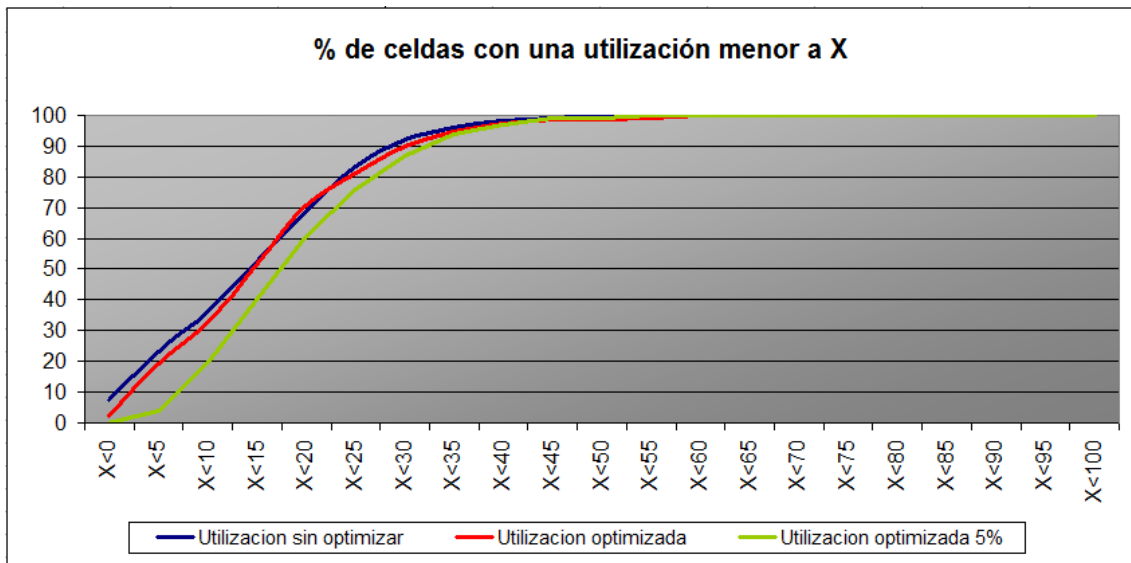


Fig4.28. Evolución de la utilización de las celdas LTE 1800 10 MHz

Para el caso LTE 1800 5 MHz si nos deshacemos de las celdas con un porcentaje menor de 5 % de utilización nos queda una foto tal y como se muestra en la siguiente figura.

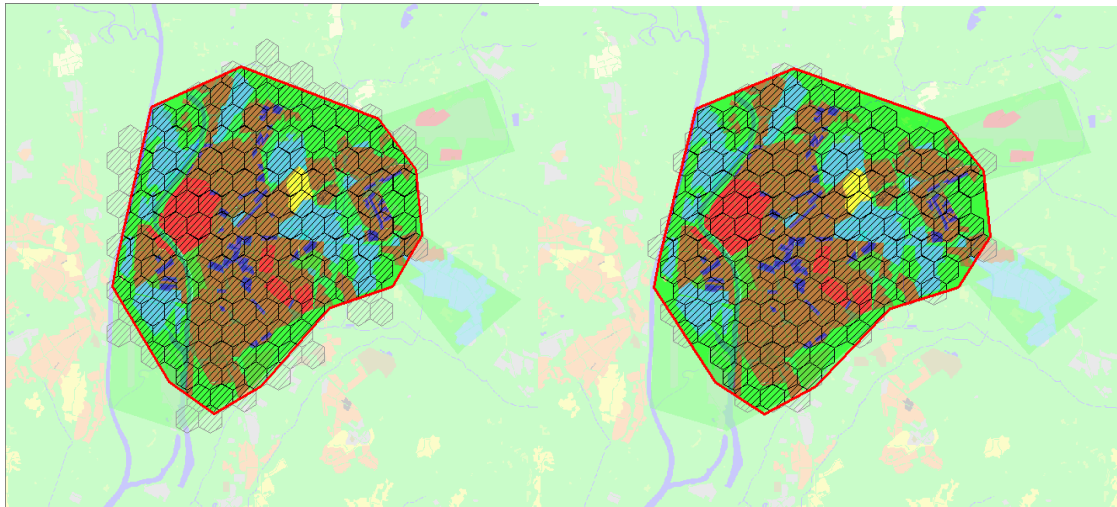


Fig4.29. Posición de las celdas antes y después de optimizar LTE 1800 5 MHz

Al igual que en el caso anterior muchas de estas celdas eliminadas están fuera de la zona de estudio o de las zonas de menos densidad de población. En lo que respecta al comportamiento de $C/(I+N)$ del canal descendente tenemos comportamientos similares.

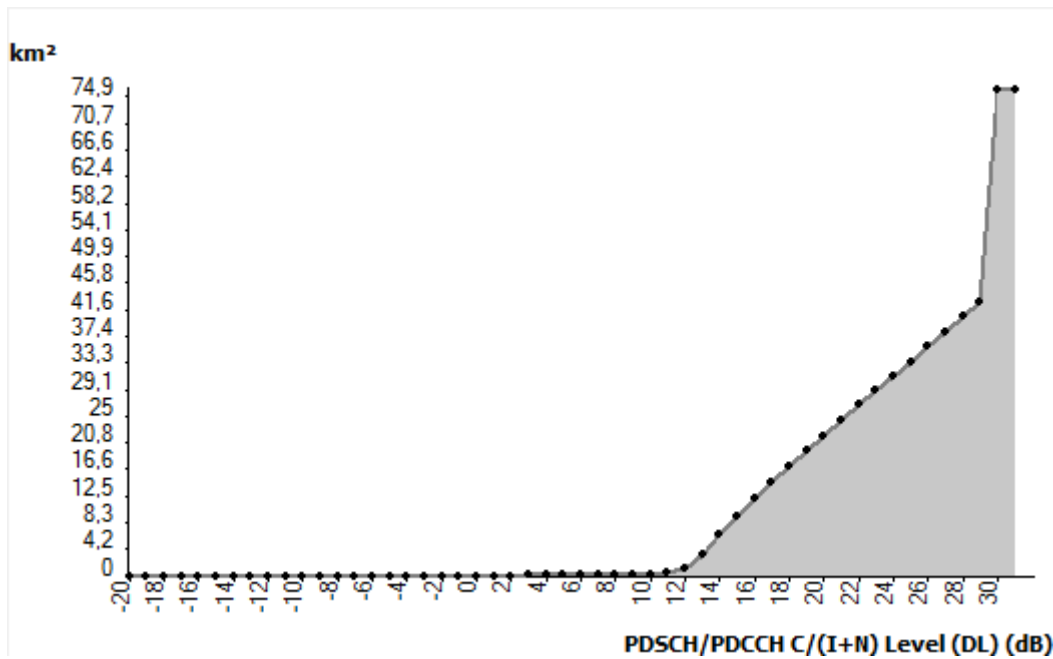


Fig4.30. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL después de la optimización para LTE 1800 5 MHz

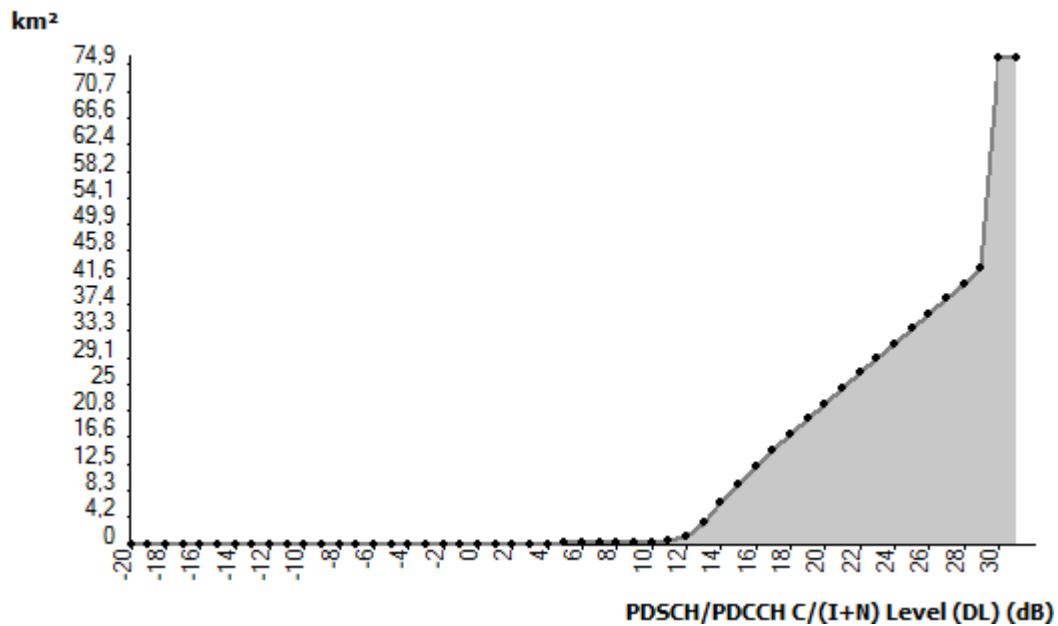


Fig4.31. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL antes de la optimización para LTE 1800 5 MHz

En cuanto a los resultados de las simulaciones cabe esperar que sean bastante semejantes, y es así como se muestra en la tabla 4.15, incluso tiene una mejor accesibilidad a pesar de que hemos reducido el número de celdas en 23. Esto es debido, como comentábamos anteriormente, a que la posición de los usuarios, al igual que los servicios demandados, no es determinista si no probabilística. Existe una bajada de los Mbps cursados, que es producida por la menor demanda de servicios FTP.

Optimización	Ninguna	Utilización <5%
Usuarios Conectados (%)	2467(98,8)	2.466(98,9)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	876,59	854,83
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,64	31,92
Usuarios FTP Download (%)	925(99)	902(99)
Usuarios Video Conferencia (%)	28(99,6)	29(99)
Usuarios Voz IP (%)	518(98,1)	535(98,2)
Usuarios Web Browsing (%)	995(98,9)	998(99,1)

Tabla 4.15. Resultados simulación LTE 1800 5 MHz optimizada

Se podría reducir aún más el número de celdas pero no sería aconsejable quitar las que tengan una utilización menor al 10% pues no tenemos margen suficiente para no perjudicar la accesibilidad.

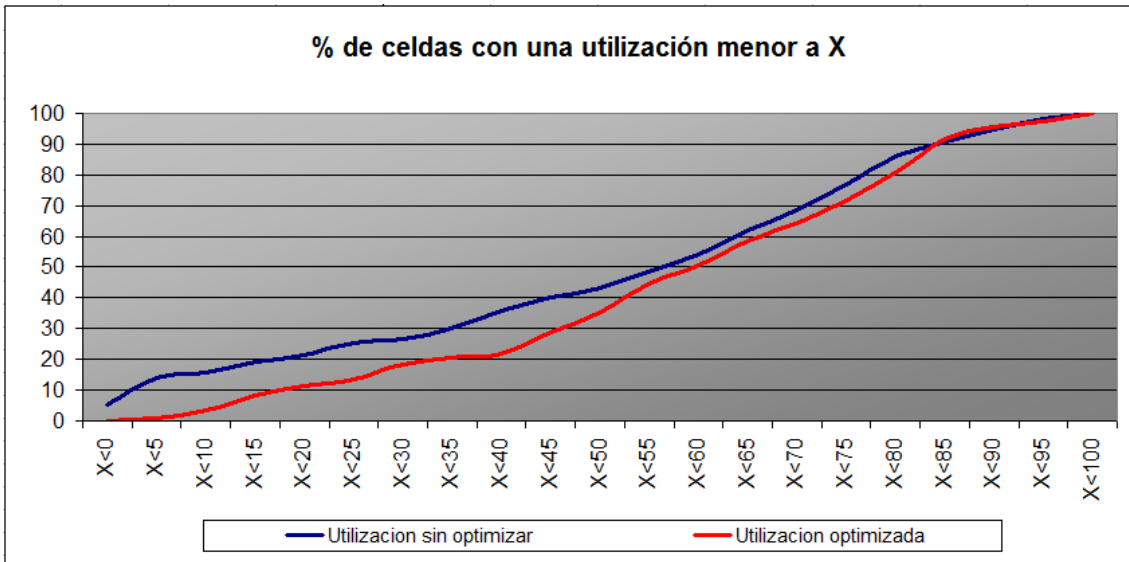


Fig4.32. Evolución de la utilización de las celdas para LTE 1800 5 MHz

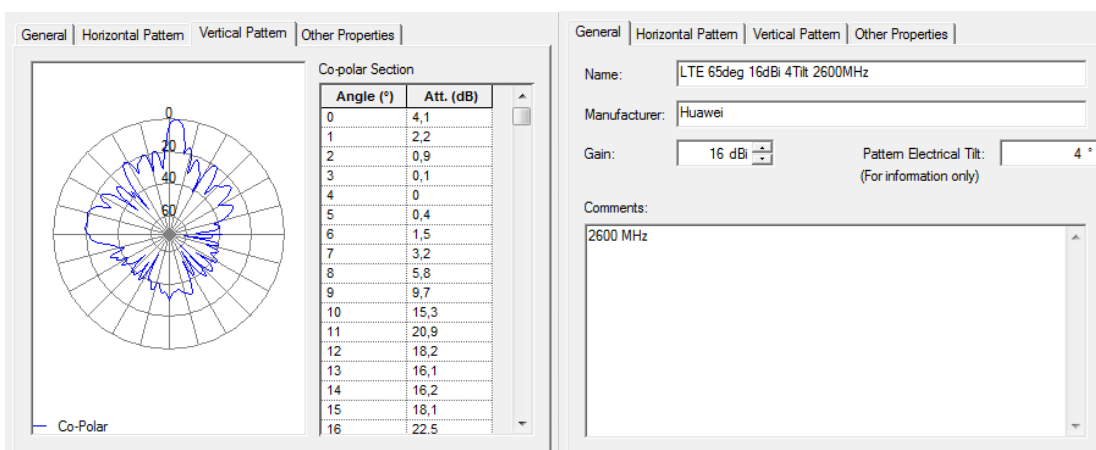
Han bajado las celdas con una utilización menor al 10% de una forma considerable, y se produce un uso más eficiente de los recursos de las celdas. Se podrían utilizar más celdas en las zonas donde la utilización es superior al 90% pero no es necesario debido a la gran cantidad de canales que tenemos disponibles ya que la celdas vecinas pueden absorber ese tráfico sin problema y seguir cumpliendo el criterio de accesibilidad para Voz IP.

4.4. Simulaciones con LTE 2600

Las características de las bandas y antenas utilizadas son:

Channel Width (MHz)	20	15	10	5
First channel	0	0	0	0
Last channel	8	12	18	38
FDD: DL Start Frequency (MHz)	2.496	2.496	2.496	2.496
FDD: UL Start Frequency (MHz)				
Adjacent Channel Suppression Factor (dB)	25,23	26,99	20,23	28,23
Sampling Frequency (MHz)	30,72	23,04	15,32	7,68
Duplexing Method	TDD	TDD	TDD	TDD
Number of Frequency Blocks (RB)	100	75	50	25

Tabla 4.16. Características de las bandas para LTE 2600



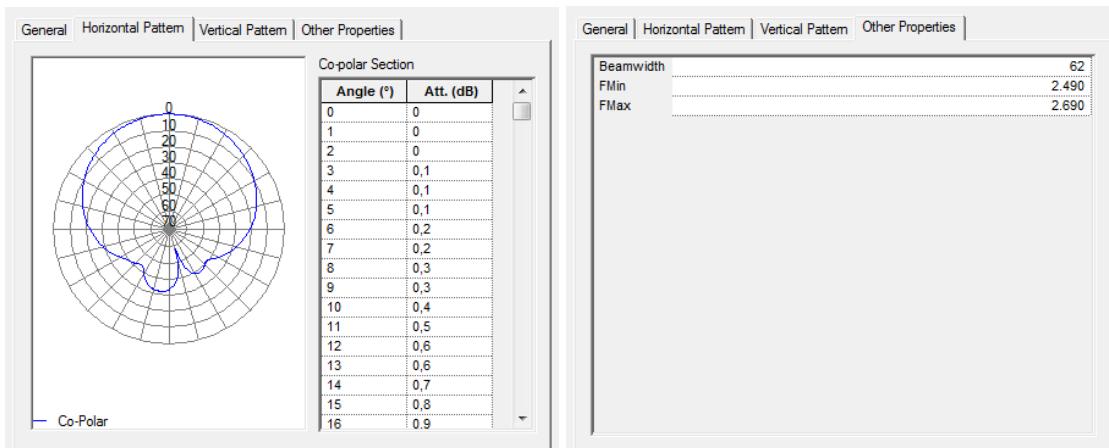


Fig4.33. Características de la antena para LTE 2600

El módulo de propagación es SPM siguiendo las recomendaciones del manual de atoll.

La distancia de reutilización para la asignación de frecuencias y de las Cell ID para los diferentes anchos de banda es:

Tamaño de celda(m)	Ancho de banda 5 MHz(m)	Ancho de banda 10 MHz(m)	Ancho de banda 15 MHz(m)	Ancho de banda 20 MHz(m)
550	5872	4042	3300	2695
500	5339	3674	3000	2449
450	4805	3306	2700	2205
400	4271	2939	2400	1960
300	3203	2205	1800	1470

Tabla 4.17. Distancia de reutilización para LTE 2600

A continuación se muestran los resultados de las simulaciones para los distintos tamaños de celda y las bandas de frecuencia utilizadas en esta sección.

4.4.1. Simulaciones e interpretación de resultados

Lo primero que comprobamos es que el nivel de señal en todas las celdas es suficiente para dar los servicios que se quieren simular. Como se puede apreciar el 99,9% de la zona de estudio está por encima de -105 dBm, con lo que tenemos

suficiente potencia de señal, teniendo en cuenta que dicho valor es la sensibilidad de un móvil.

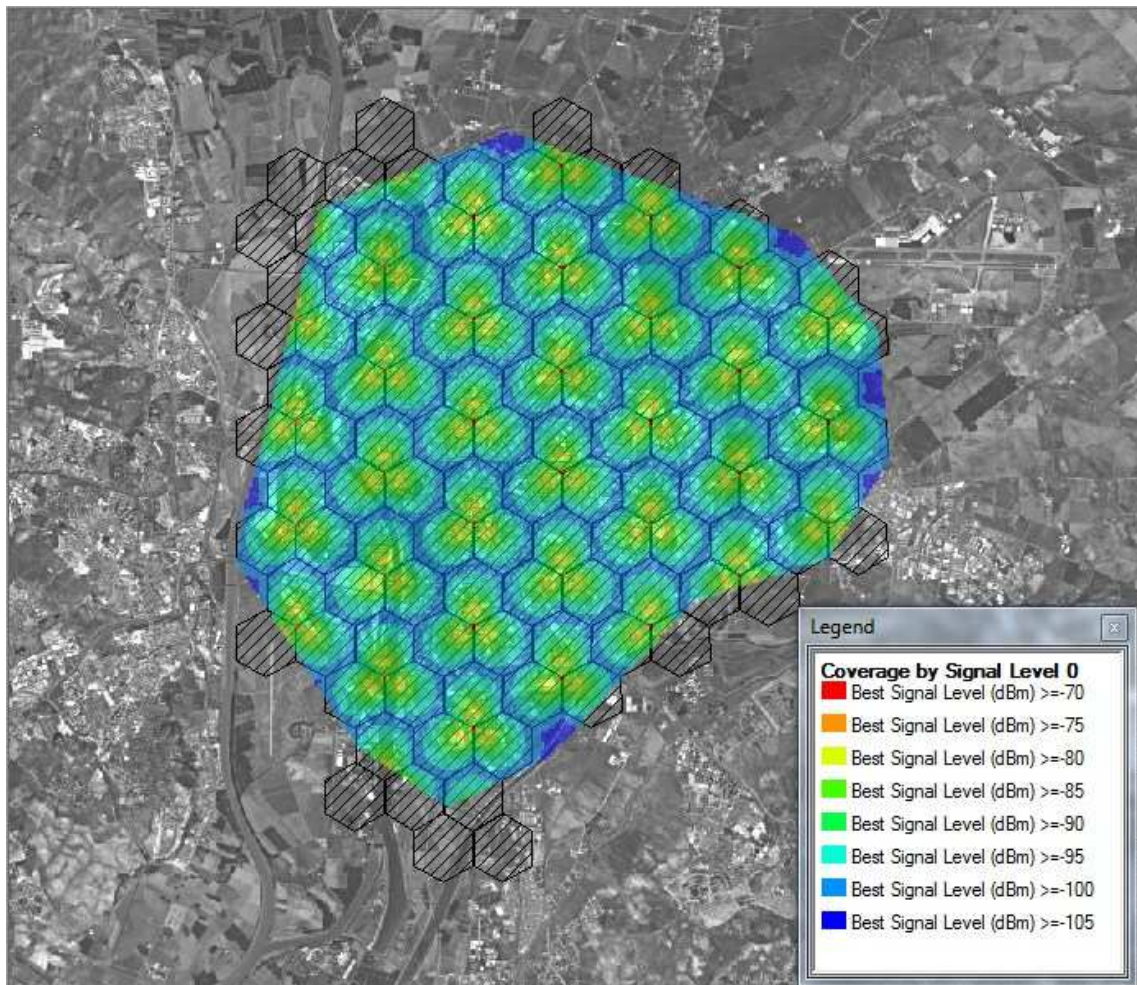


Fig.34. Best Signal Level para LTE 2600 con radio de celda de 550 metros

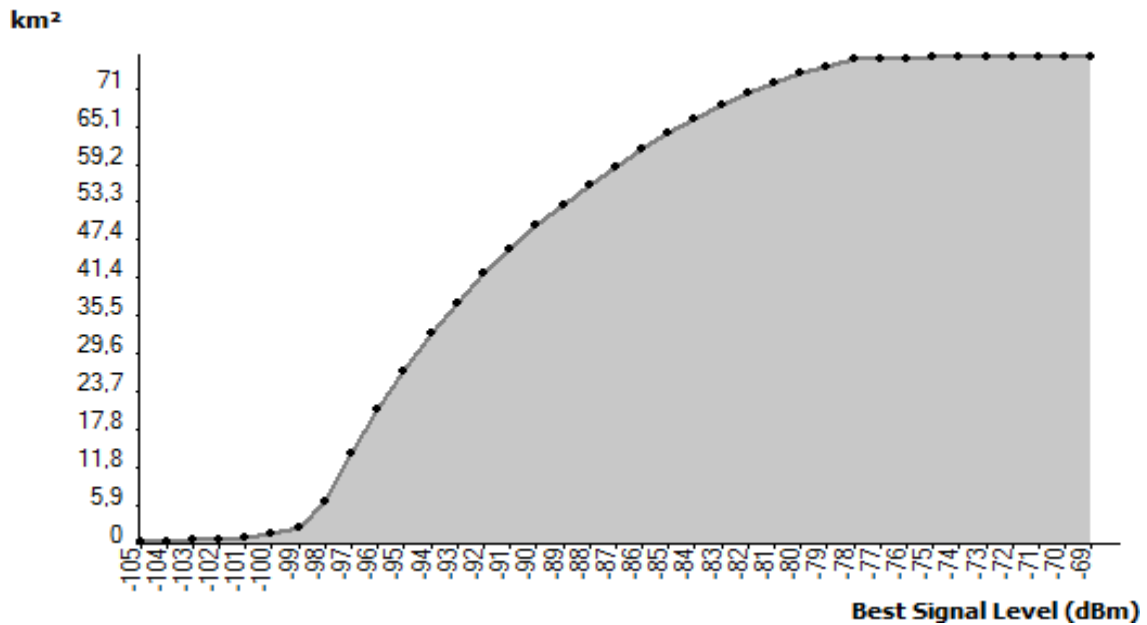


Fig4.35. Best Signal Level para LTE 2600 con radio de celda de 550 metros

Visto los resultados de la anterior predicción sabemos con total seguridad que no tendremos problemas con el resto de tamaños de celda para dar cobertura ya que estos son de un radio menor y la señal se verá menos atenuada al tener que recorrer menor distancia.

Los resultados de las simulaciones para la banda LTE 2600 20 MHz, LTE 2600 15 MHz, LTE 2600 10 MHz y LTE 2600 5 MHz están en las tablas 4.18, 4.19, 4.20 y 4.21 respectivamente.

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2.376(96,2)	2.388 (97,4)	2.399 (98,3)	2.449(98,1)	2.434(98,5)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	829,9	850,88	874,56	887,99	898,09
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,71	31,54	31,24	32,34	31,52
Usuarios FTP Download (%)	874(97)	878(97,9)	897(98,7)	906(98,5)	909(98,8)
Usuarios Video Conferencia (%)	30(96,1)	29(99)	28(99,6)	27(98,5)	28(98,6)
Usuarios Voz IP (%)	502(92,9)	514(95,6)	499(96,7)	523(96,5)	520(97,5)
Usuarios Web Browsing (%)	970(97,4)	967(97,9)	975(98,8)	993(98,5)	977(98,8)

Tabla 4.18. Resultados simulación para LTE 2600 20 MHz

Radio de hexágono (m)	550	500	450	400	300
Usuarios Conectados (%)	2.423 (97,1)	2.453 (97,8)	2.434(98,4)	2.436 (98,6)	2.436(99,2)
Saturación Scheduler	0	0	0	0	0
Saturación Recursos	0	0	0	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	842,82	878,51	873,63	886,4	889,03
RLC Efectivo UL (Mbps)	32,21	32,46	30,74	32,27	30,39
Usuarios FTP Download (%)	898 (97,8)	911(98,3)	888(98,7)	906(98,9)	889(99,4)
Usuarios Video Conferencia (%)	32(97,6)	29(98,6)	30(98,4)	31(99,4)	30 (100)
Usuarios Voz IP (%)	520(94,9)	519 (96)	529(97,2)	510 (97,5)	534(98,5)
Usuarios Web Browsing (%)	973(97,8)	994(98,3)	987(98,7)	989,5 (98,9)	984(99,3)

Tabla 4.18. Resultados simulación para LTE 2600 15 MHz

Radio de hexágono (m)	550	500
Usuarios Conectados (%)	2.435 (98,4)	2.419 (99,3)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	802,73	734,45
RLC Efectivo UL (Mbps)	31,54	30,73
Usuarios FTP Download (%)	895(98,8)	900(99,5)
Usuarios Video Conferencia (%)	27 (99,3)	31(98,7)
Usuarios Voz IP (%)	523(96,7)	516 (98,5)
Usuarios Web Browsing (%)	990(98,8)	971(99,6)

Tabla 4.19. Resultados simulación para LTE 2600 10 MHz.

Radio de hexágono (m)	550
Usuarios Conectados (%)	2.443(99)
Saturación Scheduler	0
Saturación Recursos	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	636,23
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,9
Usuarios FTP Download (%)	907(99,2)
Usuarios Video Conferencia (%)	29(99,7)
Usuarios Voz IP (%)	533(98)
Usuarios Web Browsing (%)	974(99,4)

Tabla 4.20. Resultados simulación para LTE 2600 5 MHz

Al igual que en el caso de LTE 800 y 1800 la limitación la encontramos en el canal descendente, donde se produce una interferencia cocanal que hace que los usuarios sean rechazados por la red por no cumplir unos mínimos aceptables de $C/(I+N)$, que como en el caso anterior están fijados para -6,5 dB.

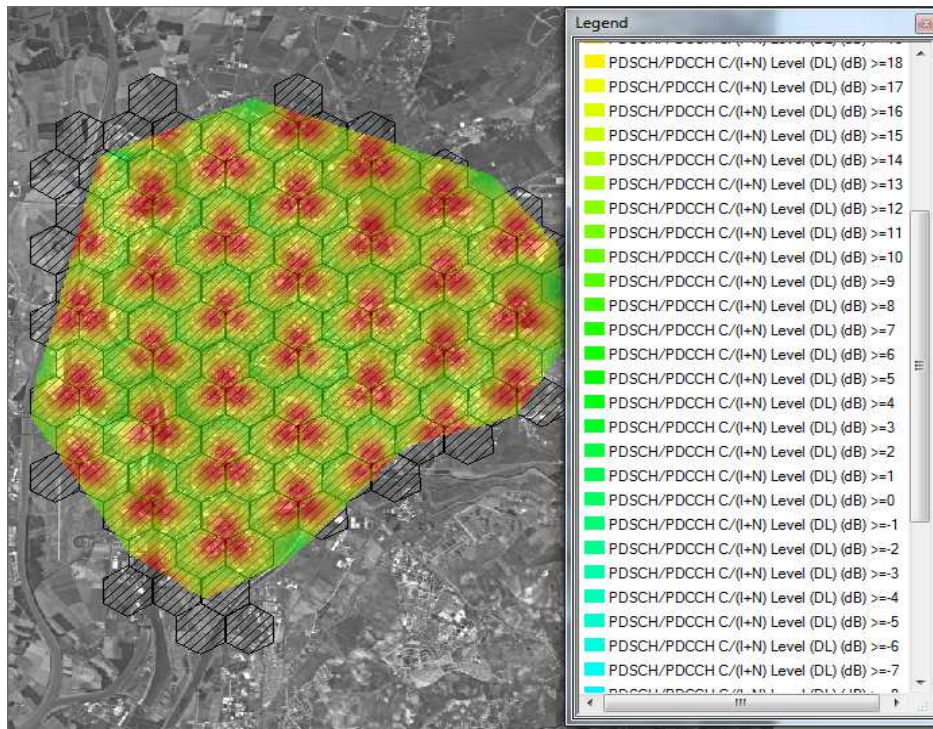


Fig4.36. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL para LTE 2600 20 MHz con radio de celda de 550 metros

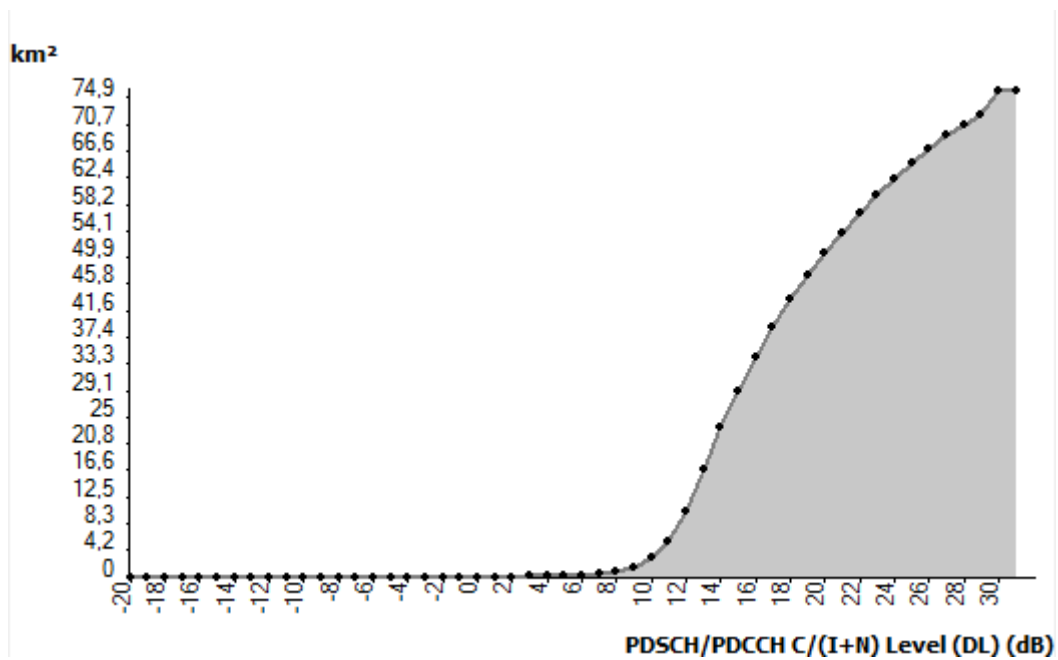


Fig4.37. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL para LTE 2600 20 MHz con radio de celda de 550 metros

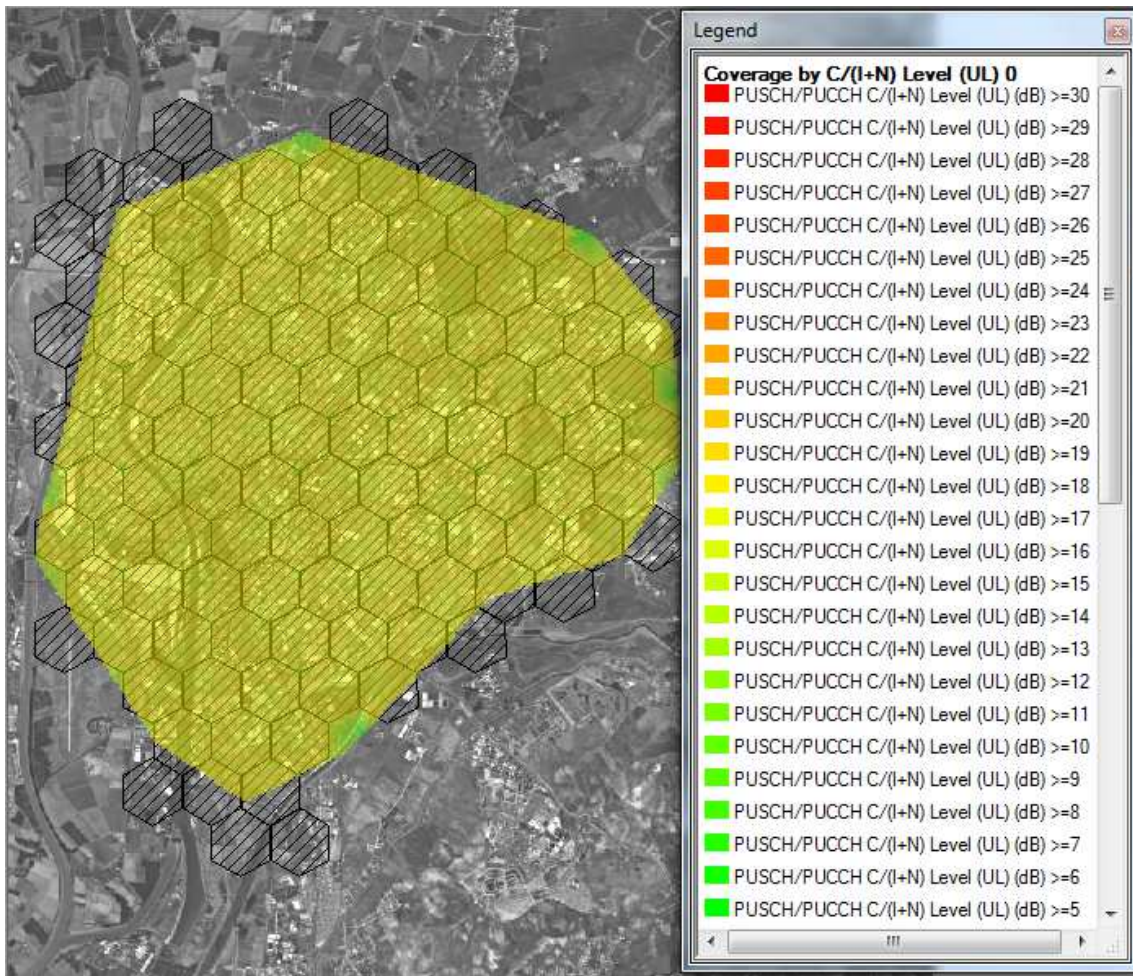


Fig4.38. PUSCH/PUCCH C/(I+N) Level UL para LTE 2600 20 MHz con radio de celda de 550 metros

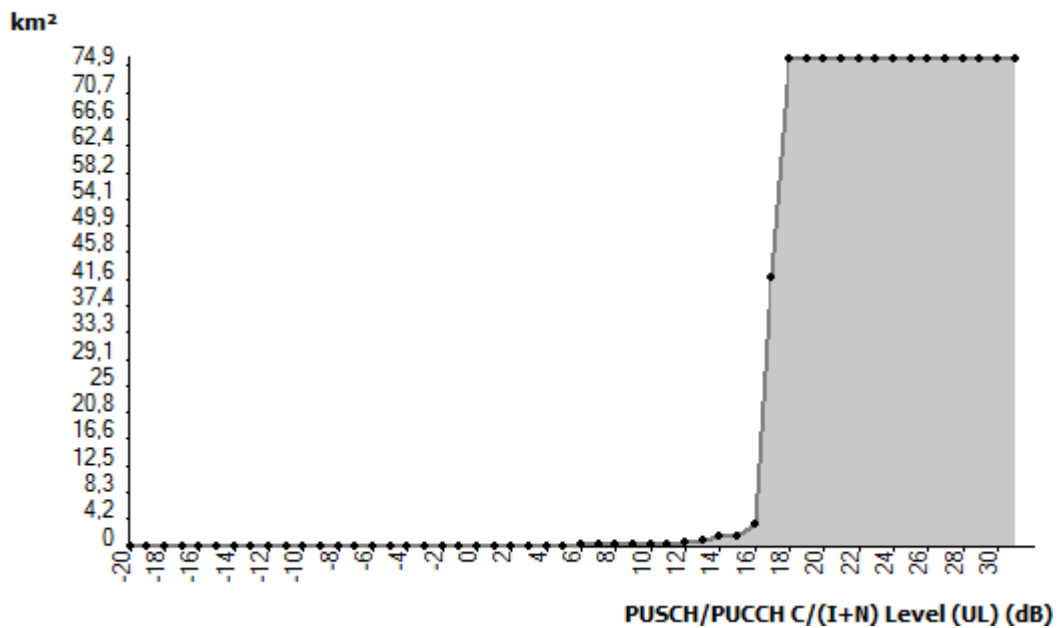


Fig4.39. PUSCH/PUCCH C/(I+N) Level UL para LTE 2600 20 MHz con radio de celda de 550 metros

Las predicciones fueron hechas para el caso de un ancho de banda 20 MHz, que es en el que tenemos menos canales, concretamente 12. Si hacemos estas mismas predicciones con los mismos parámetros pero cambiando solamente el ancho de canal se obtienen unos resultados totalmente diferentes como muestran las siguientes figuras.

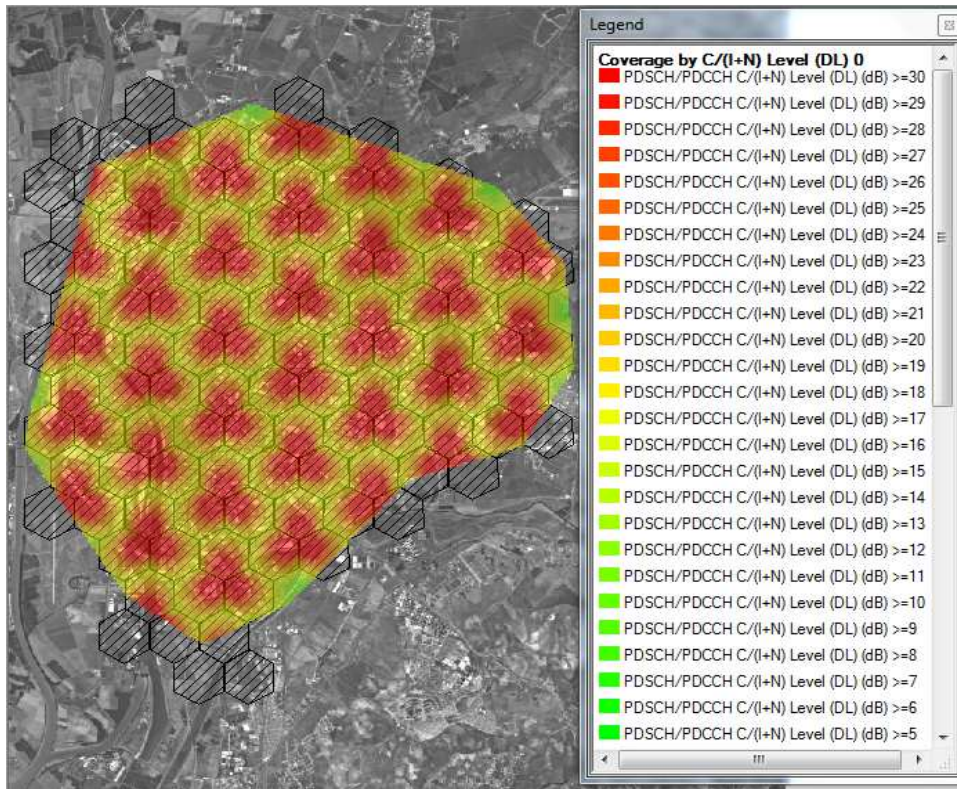


Fig4.40. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL para LTE 2600 5 MHz con radio de celda de 550 metros

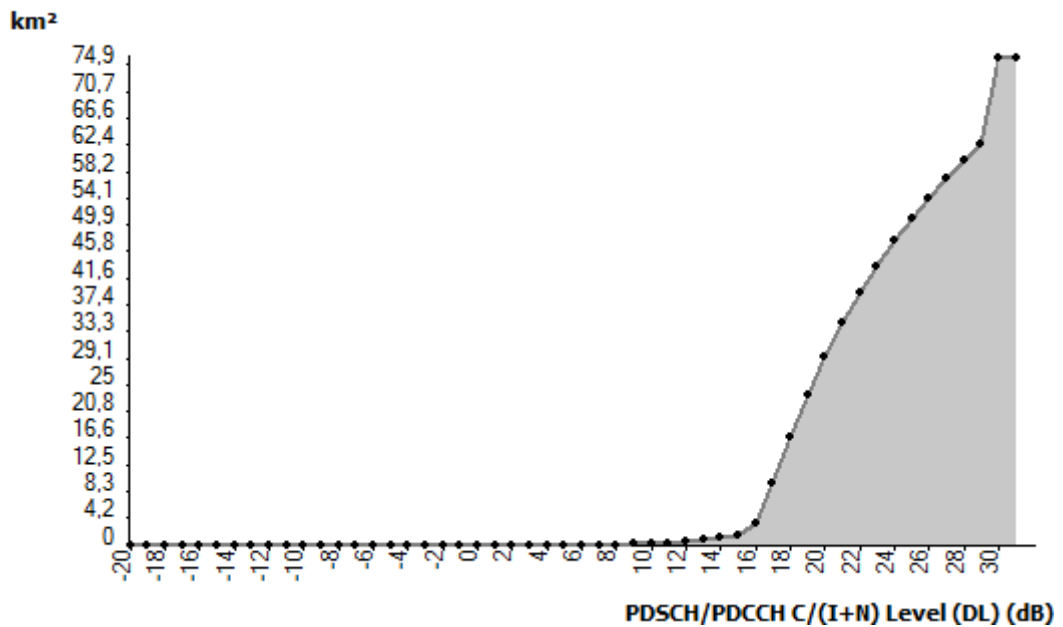


Fig4.41. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL para LTE 2600 5 MHz con radio de celda de 550 metros

Para este caso tenemos tres configuraciones que cumplen con el criterio mínimo tanto de tamaño de radio de celda como de accesibilidad para Voz IP: el ancho de banda de 15 MHz para 300 metros de radio de celda, ancho de banda de 10 MHz de 500 metros de radio de celda y ancho de banda de 5 MHz de 550 metros de radio de celda.

Con las simulaciones realizadas podemos observar el grado de utilización de cada celda. Algunas de ellas tienen un uso del 0%, casi todas ellas utilizadas en las zonas denominadas rurales o que están fuera del estudio, por lo que vamos a eliminarlas para tener un diseño con menos celdas y por tanto más optimizado, además quitaremos las celdas que tengan un uso menor del 10% ya que tenemos margen para ello.

A continuación se muestra cómo quedaría la malla de celdas después de esta optimización para el caso de ancho de banda de 15 MHz.

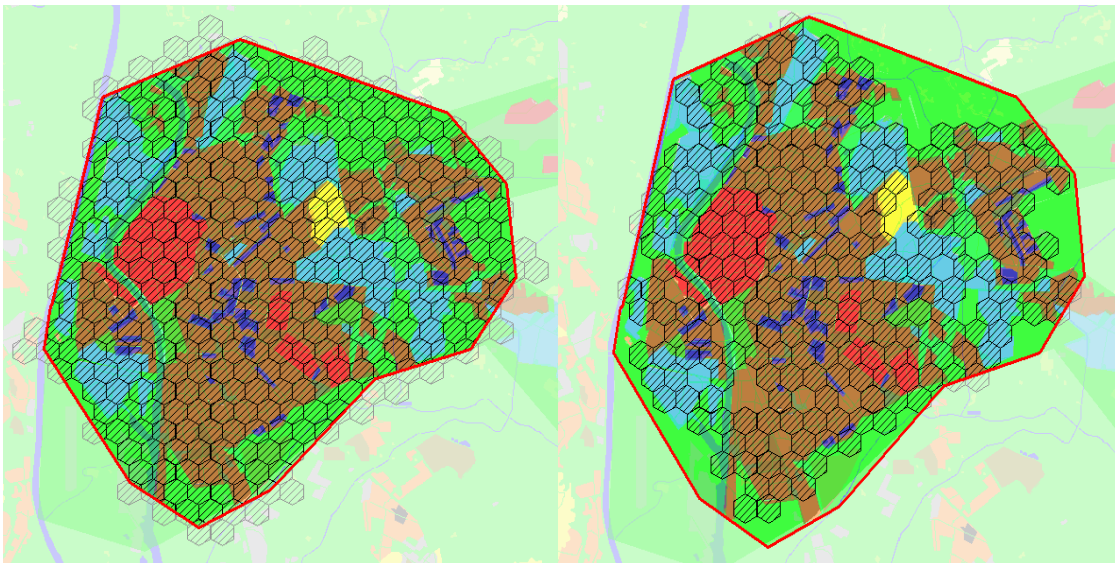


Fig4.42. Posición de las celdas antes y después de la optimización para LTE 2600 15 MHz

Como cabía esperar se han eliminado en su mayoría las celdas posicionadas en la frontera de la zona de cálculo y las menos pobladas. Ahora comprobaremos que el haber quitado estas celdas no ha afectado lo suficiente al rendimiento de la red y lo comprobamos con el mallado original.

Optimización	Ninguna	Utilización <10%
Usuarios Conectados (%)	2.436(99,2)	2.451 (98,3)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	889,03	900,54
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,39	32,41
Usuarios FTP Download (%)	889(99,4)	918 (98,5)
Usuarios Video Conferencia (%)	30 (100)	31(98,4)
Usuarios Voz IP (%)	534(98,5)	517(97)
Usuarios Web Browsing (%)	984(99,3)	984,8 (98,8)

Tabla 4.21. Resultados simulación para LTE 2600 15 MHz optimizada I

Vemos que no cumplimos el criterio de accesibilidad, aunque estamos cerca de él. Analizando dónde tenemos los usuarios no conectados vemos que con añadir 6 celdas más podemos hacer que los usuarios que estén en esas zonas tengan acceso a la red, estas celdas añadidas aparecen en rojo.

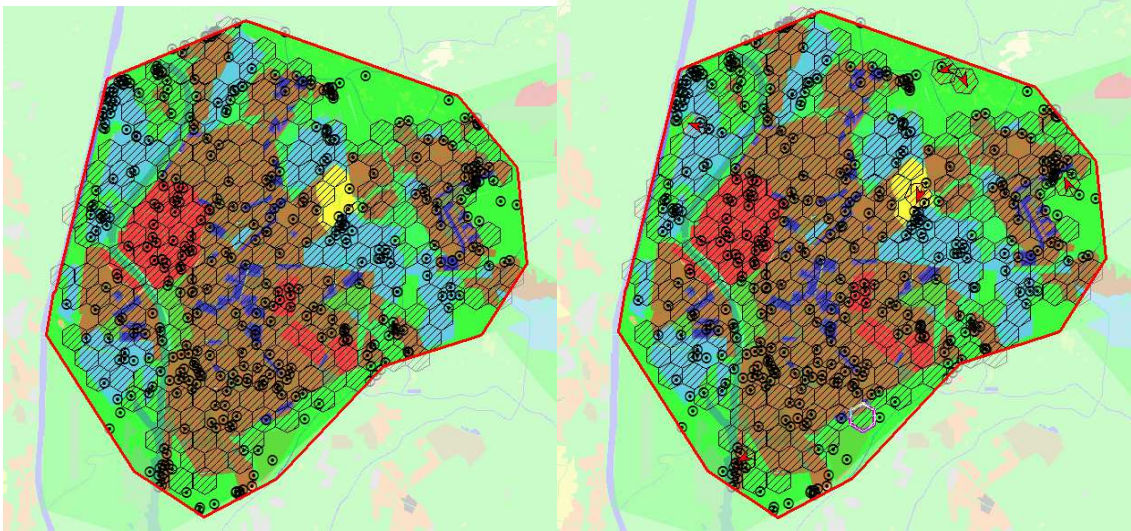


Fig4.43. Posición de las celdas antes y después de la optimización para LTE 2600 15 MHz II

Optimización	Ninguna	Utilización <10%
Usuarios Conectados (%)	2.436(99,2)	2.458(98,8)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	889,03	890,54
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,39	31,69
Usuarios FTP Download (%)	889(99,4)	907 (98,9)
Usuarios Video Conferencia (%)	30 (100)	29 (99,7)
Usuarios Voz IP (%)	534(98,5)	541(97,9)
Usuarios Web Browsing (%)	984(99,3)	981 (99,1)

Tabla 4.22. Resultados simulación para LTE 2600 15 MHz optimizada II

Aún se siguen cumpliendo los criterios de la red a pesar de haber 143 celdas menos, en cuanto a las predicciones de $C/(I+N)$ tenemos una peor curva tras la optimización.

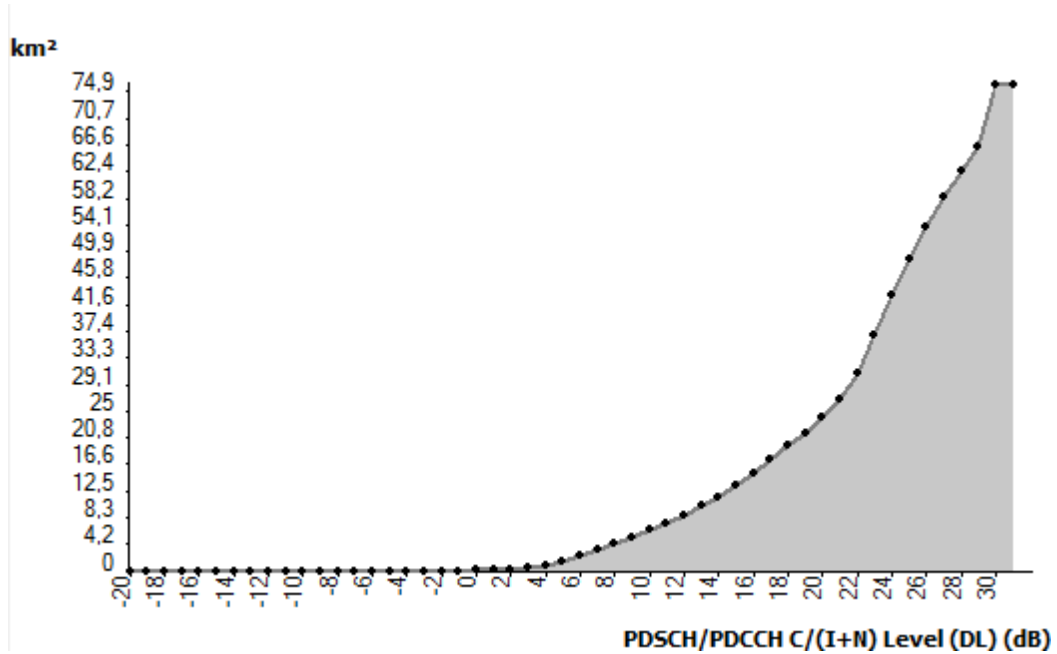


Fig4.44. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL después de la segunda optimización LTE 2600 15 MHz

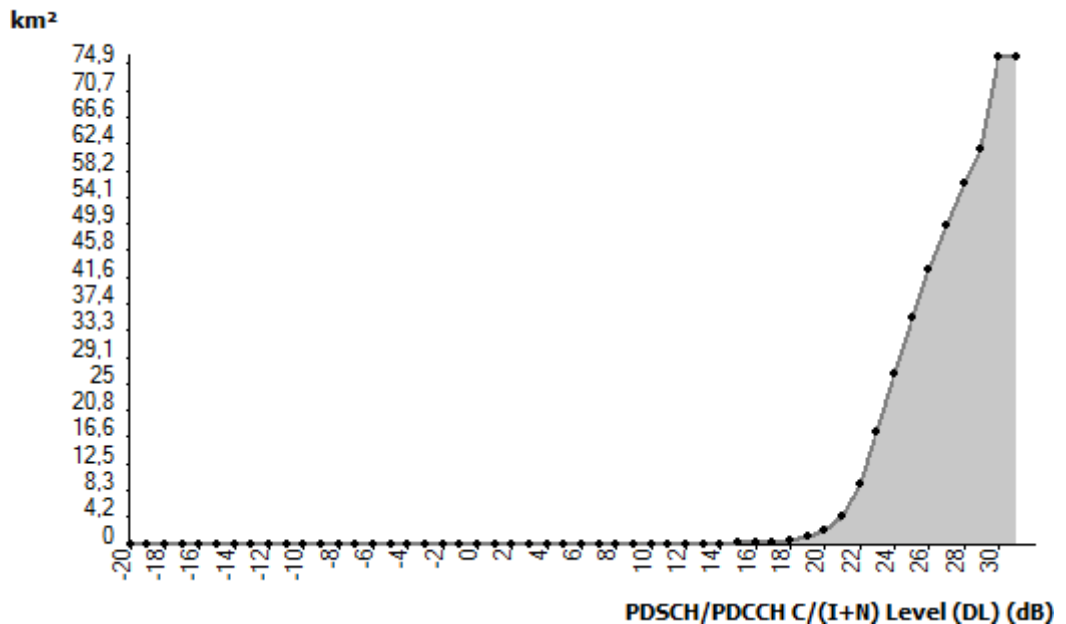


Fig4.45. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL antes de la optimización LTE 2600 15 MHz

En cuanto a la utilización de las celdas, vemos que con la optimización de los recursos que tenemos se produce una mejora, esto se observa ya que el número del porcentaje de celdas con utilización menor reducen su número.

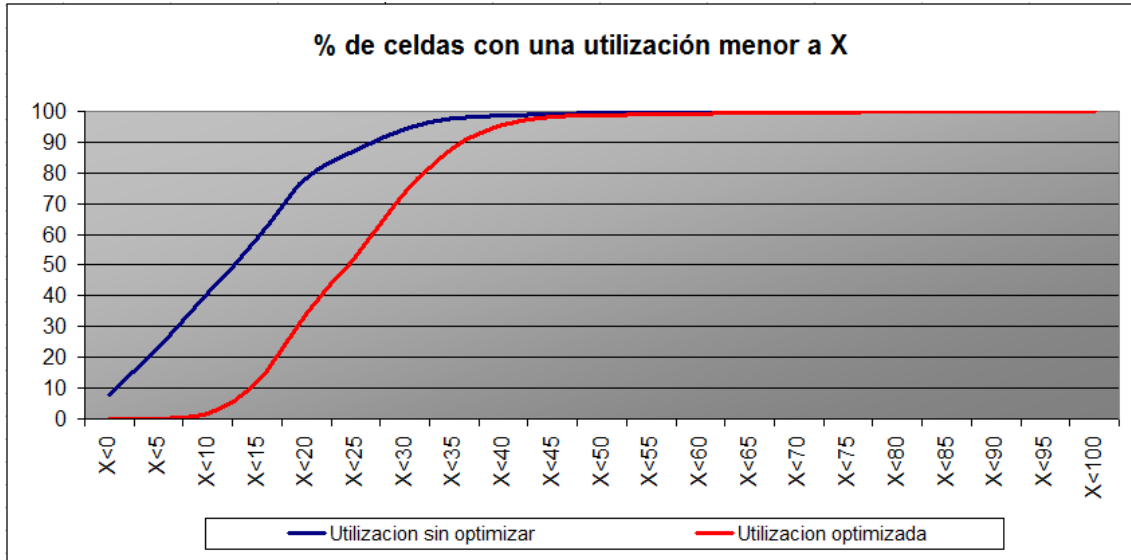


Fig4.46. Evolución de la utilización de las celdas para LTE 2600 15 MHz

Para la optimización de la red para la banda LTE 2600 10 MHz al igual que en el caso anterior quitaremos las celdas que tengan una utilización menor al 10 %.

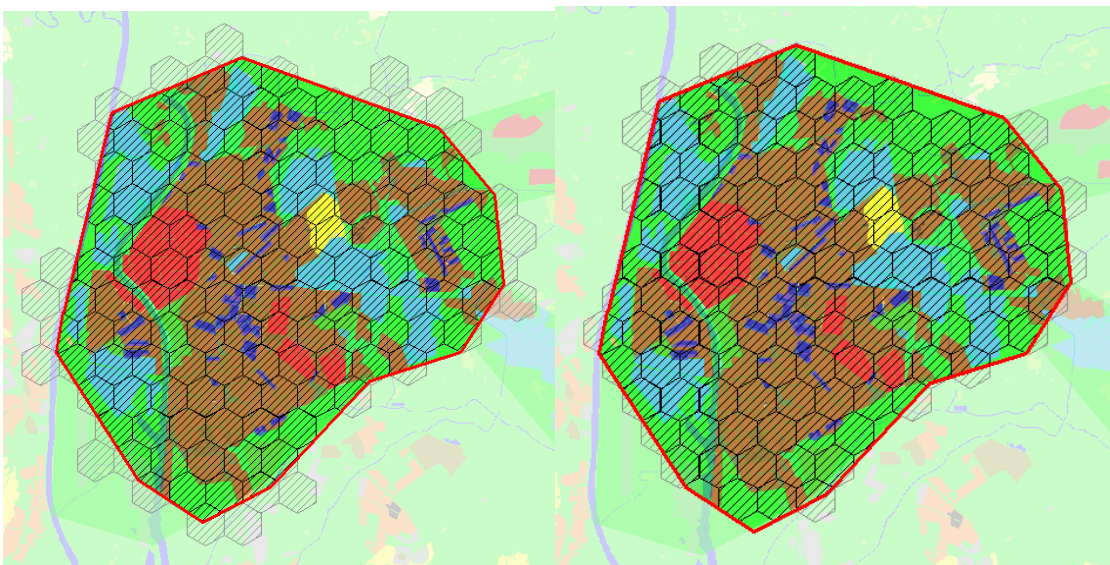


Fig4.47. Posición de las celdas antes y después de la optimización para LTE 2600 10 MHz

Los resultados de las simulaciones y de las predicciones de C/(I+N) son las siguientes:

Optimización	Ninguna	Utilización <10%
Usuarios Conectados (%)	2.419 (99,3)	2.465(99,4)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	734,45	727,87
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,73	31,93
Usuarios FTP Download (%)	900(99,5)	909(99,6)
Usuarios Video Conferencia (%)	31(98,7)	29(99,7)
Usuarios Voz IP (%)	516 (98,5)	528(98,5)
Usuarios Web Browsing (%)	971(99,6)	998(99,6)

Tabla 4.23. Resultados simulación para LTE 2600 10 MHz optimizada

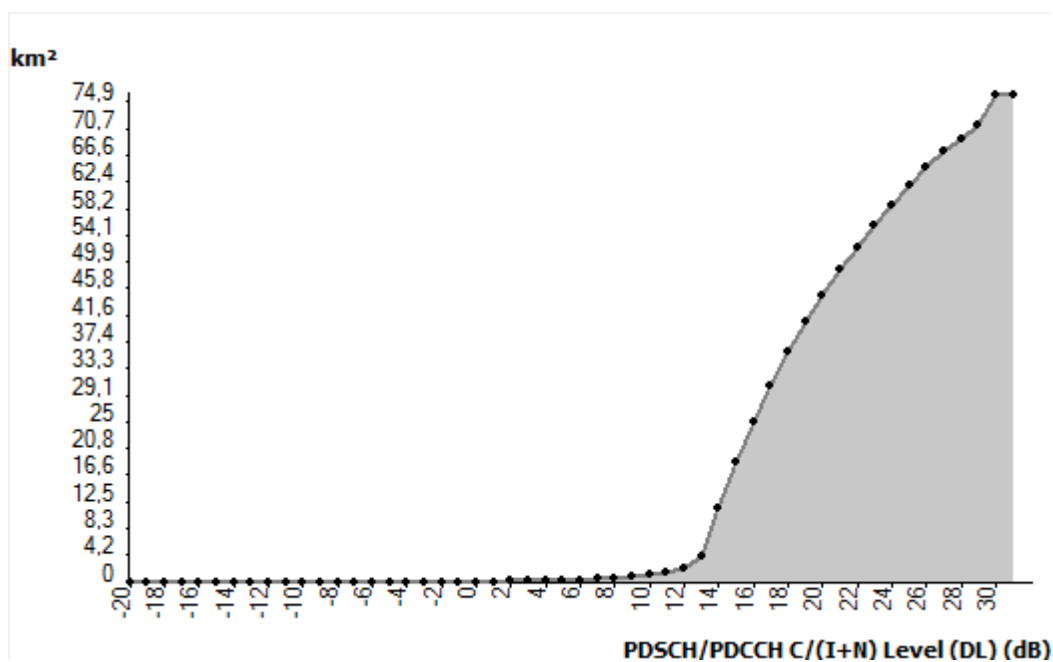


Fig.4.48. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL después de la optimización para LTE 2600 10 MHz

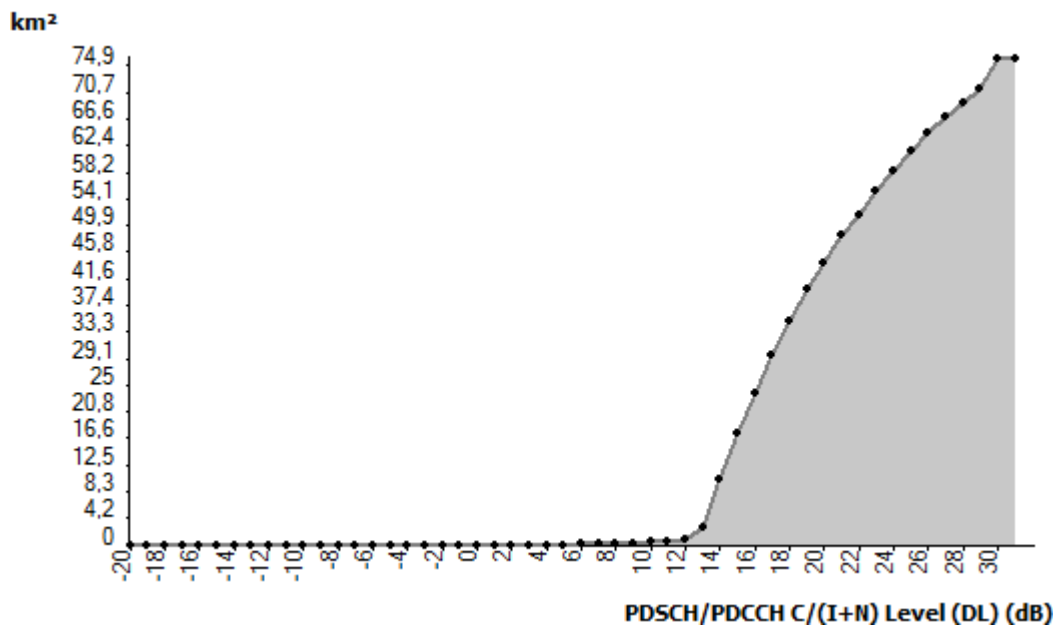


Fig4.49. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL antes de la optimización para LTE 2600 10 MHz

Las condiciones de accesibilidad se cumplen sin problemas, pero en cuanto a lo que se refiere a la cantidad de bps que cursa la red vemos una disminución importante debido a que se produce una pequeña degradación del C/(I+N) al hacer la optimización de la utilización lo que provoca que la elección de las bearer por parte de los usuarios sea peor.

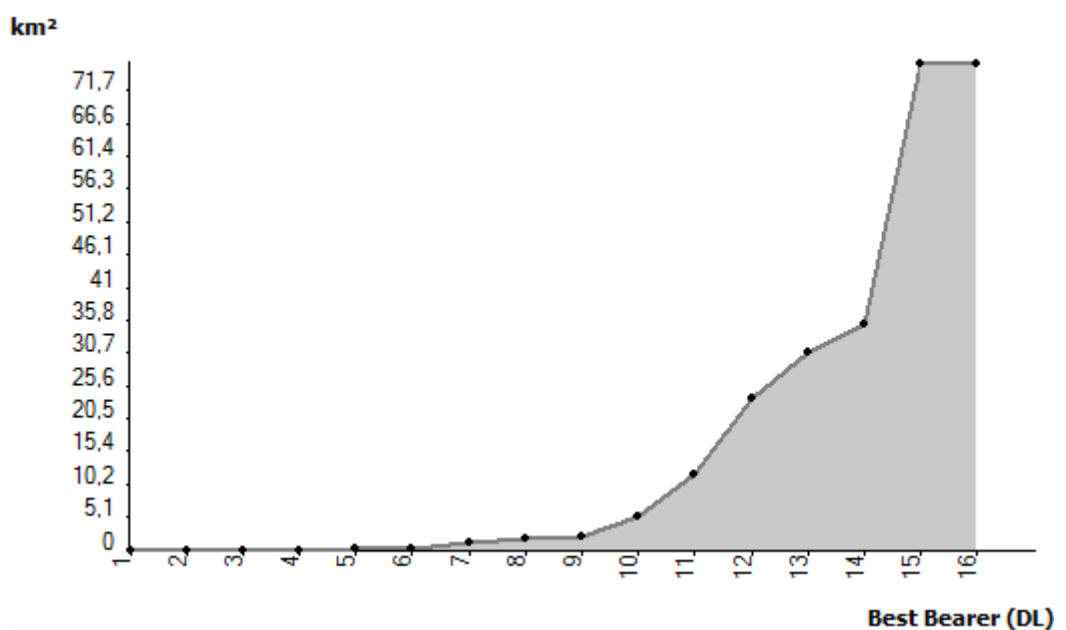


Fig4.50. Best Bearer después de la optimización para LTE 2600 10 MHz

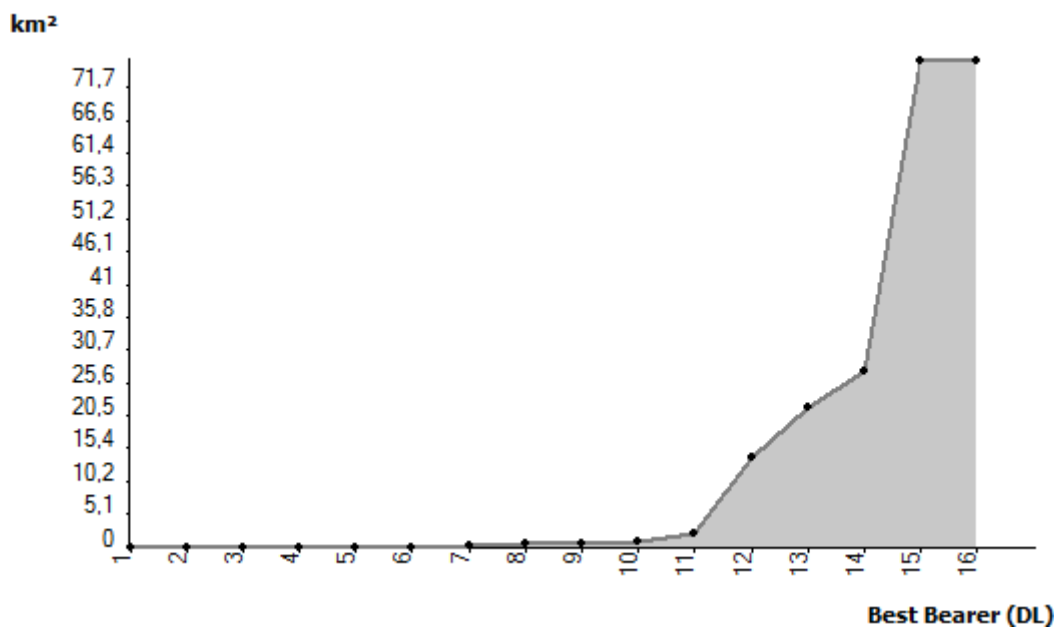


Fig4.51. Best Bearer antes de la optimización para LTE 2600 10 MHz

En cuanto a la utilización de las celdas la mejora es evidente.

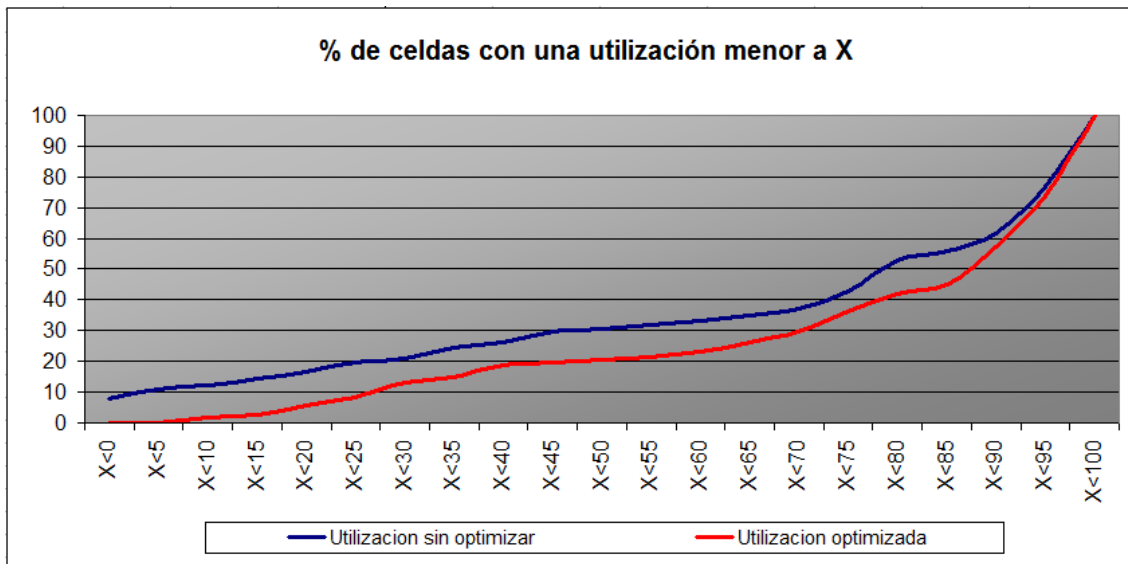


Fig4.52. Evolución de la utilización de las celdas para LTE 2600 10 MHz

Para el caso de LTE 2600 5 MHz seguimos el mismo procedimiento.

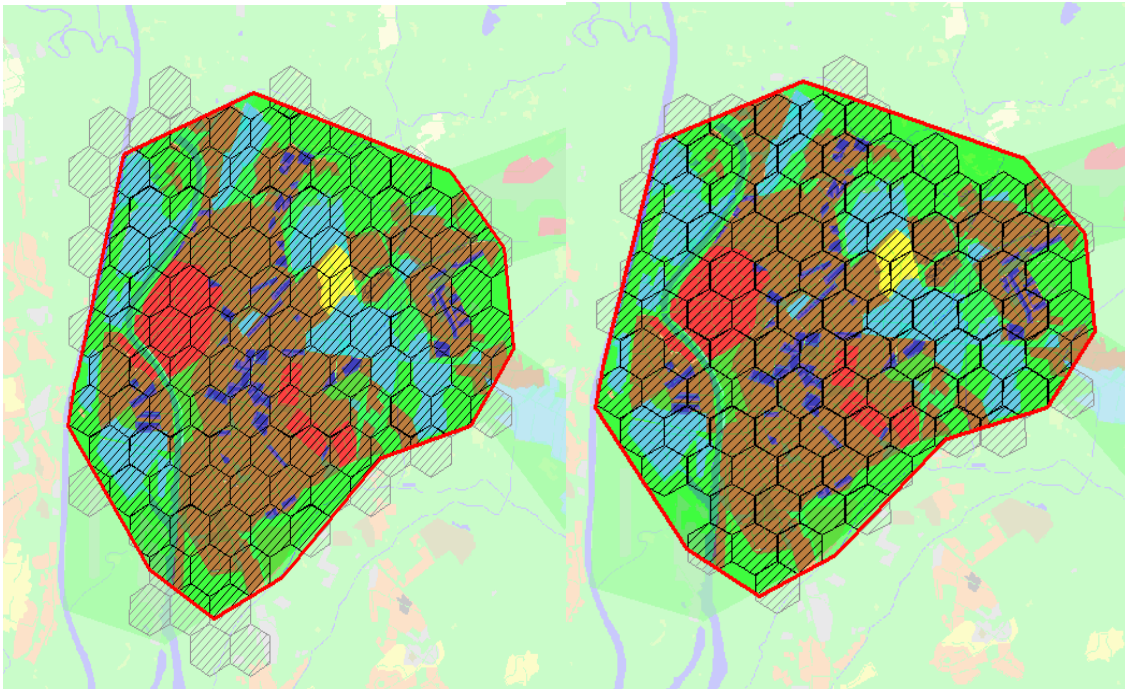


Fig4.53. Posición de las celdas antes y después de la optimización para LTE 2600 5 MHz

Los resultados de las simulaciones después de quitar las celdas con una utilización menor al 10% son los mostrados en la tabla 4.24.

Hay una pequeña reducción de los bps cursados debido a la degradación del $C/(I+N)$ lo que conlleva un peor acceso a las portadoras como queda patente en las figuras 4.54, 4.55, 4.56 y 4.57.

Optimización	Ninguna	Utilización <10%
Usuarios Conectados (%)	2.443(99)	2.468(99,1)
Saturación Scheduler	0	0
Saturación Recursos	0	0
RLC Efectivo DL (Mbps)	636,23	631,65
RLC Efectivo UL (Mbps)	30,9	32,41
Usuarios FTP Download (%)	907(99,2)	915(99,3)
Usuarios Video Conferencia (%)	29(99,7)	30(98,9)
Usuarios Voz IP (%)	533(98)	520(98)
Usuarios Web Browsing (%)	974(99,4)	1.002(99,5)

Tabla 4.24. Resultados simulación para LTE 2600 5 MHz optimizada

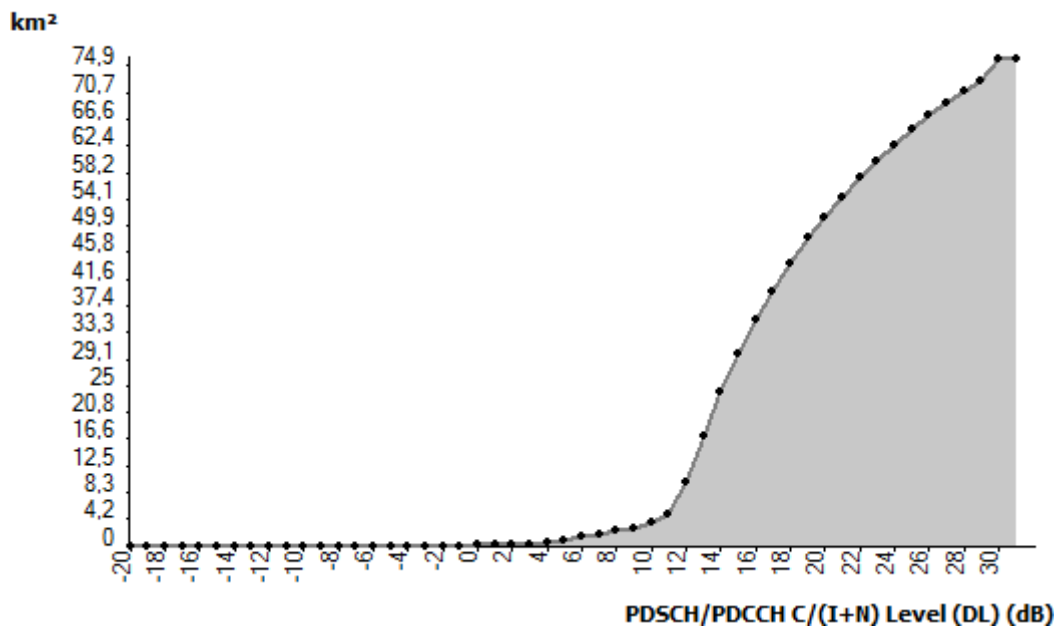


Fig4.54. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL después de la optimización para LTE 2600 5 MHz

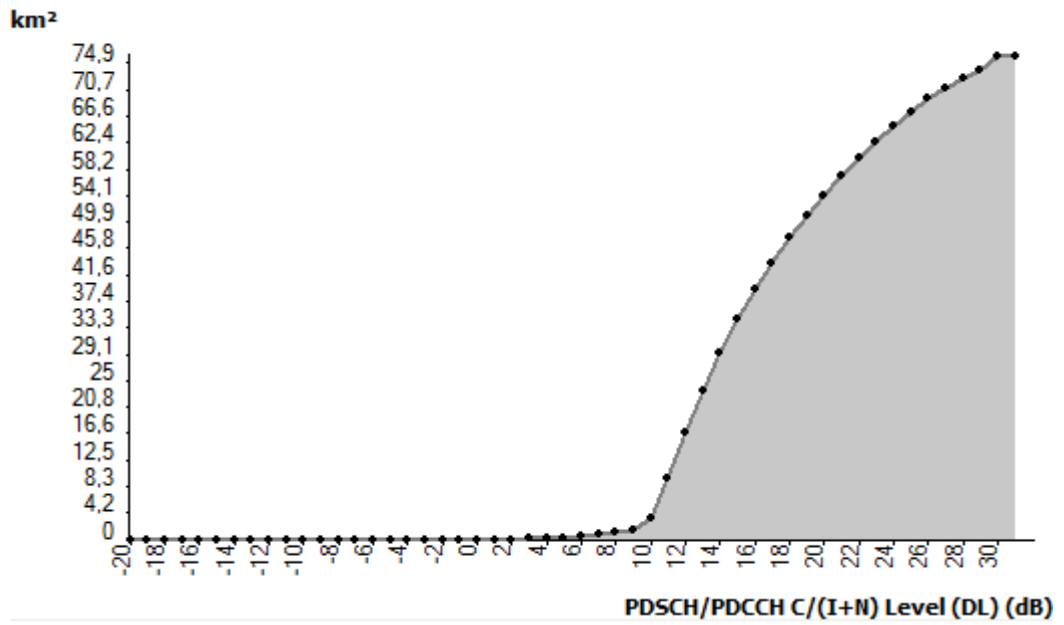


Fig4.55. PDSCH/PDCCH C/(I+N) Level DL antes de la optimización para LTE 2600 5 MHz

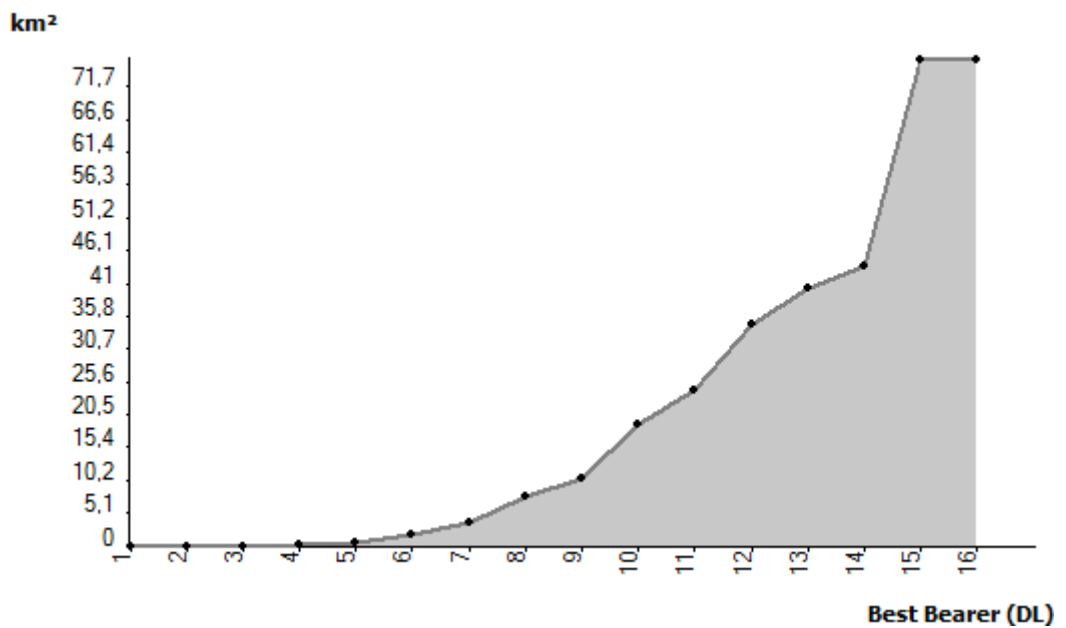


Fig4.56. Best Bearer después de la optimización para LTE 2600 5 MHz

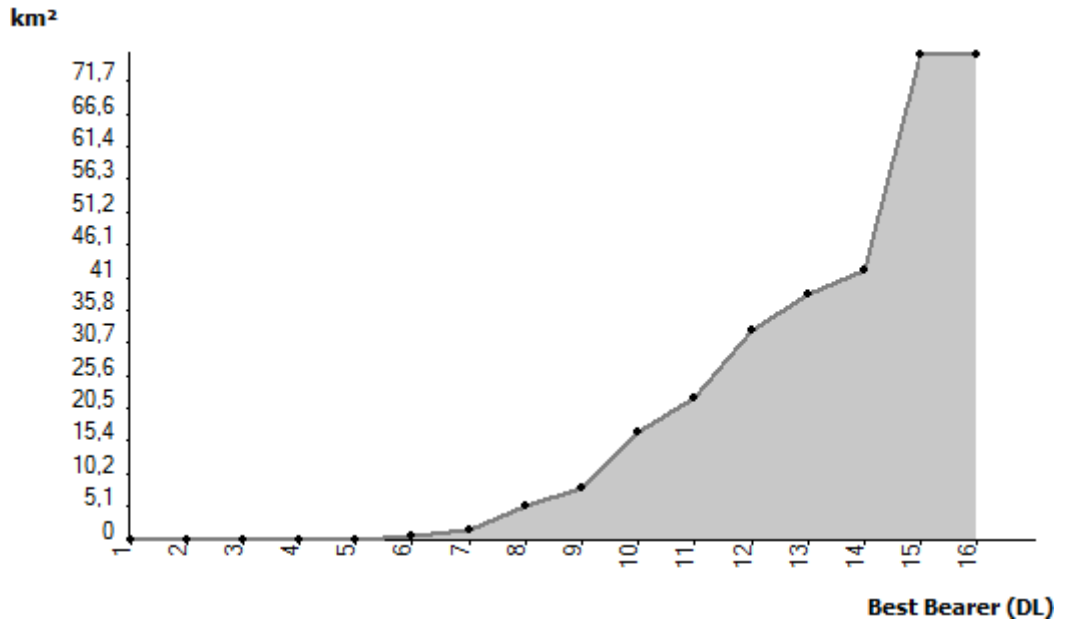


Fig4.57. Best Bearer antes de la optimización para LTE 2600 5 MHz

En cuanto a la mejora de la utilización de las celdas:

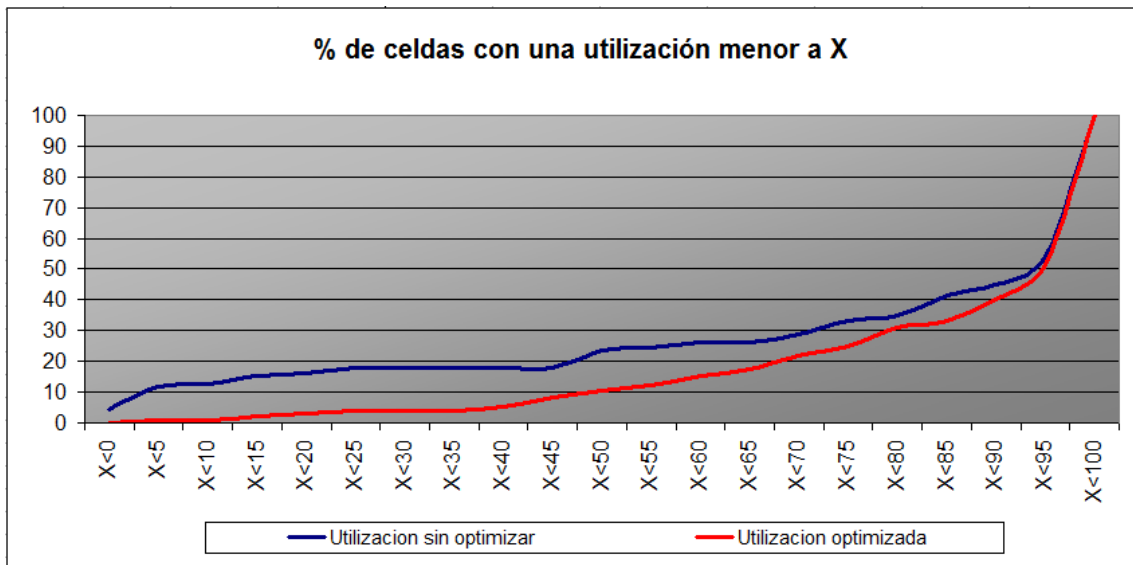


Fig4.58. Evolución de la utilización para LTE 2600 5 MHz

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

5.1 Conclusiones

Finalmente tenemos 5 configuraciones que cumplen con los criterios de diseño impuestos en un principio, mínimo de un 98 % de accesibilidad para Voz IP y radio de celda menor a 300 metros. Para llegar a ello se han realizado simulaciones en la frecuencias de 800, 1800 y 2600 con radio de celda de 550, 500, 450, 400 y 300 metros.

Con las configuraciones que cumplían los requisitos se ha realizado una optimización de la utilización de la red eliminando celdas, sin dejar de lado el criterio de accesibilidad, que tuvieran una utilización menor al 10 %, con ello se ha conseguido un mejor uso de la utilización de los recursos de la red.

El siguiente paso que daremos será elegir uno de estas 5 configuraciones. Para ello, ya cumplidos los requisitos mínimos de red, analizaremos su comportamiento en lo que se refiere al throughput que experimentan los usuarios FTP de la red, el buen uso de los recursos de la red y el número de celdas necesario para la realización de la configuración elegida.

A continuación se muestran los estudios hechos para la velocidad máxima de bps que puede experimentar un usuario FTP con un terminal MIMO si dispusiera para él solo la red. En la figura se muestra la cantidad de km² que pueden brindar cierta cantidad de bps por segundo.

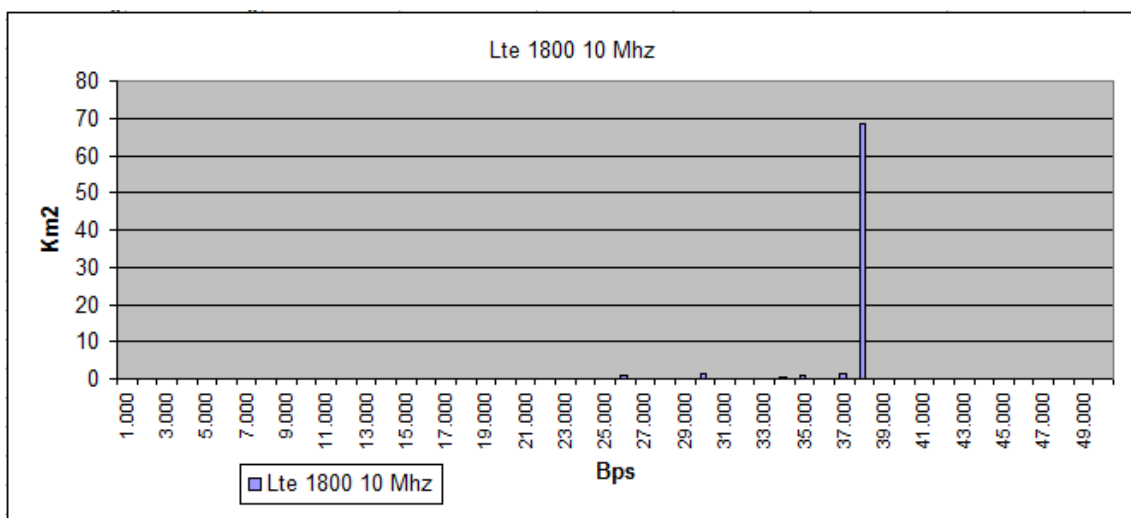


Fig5.1. Effective RLC User Throughput para LTE 1800 10 MHz.

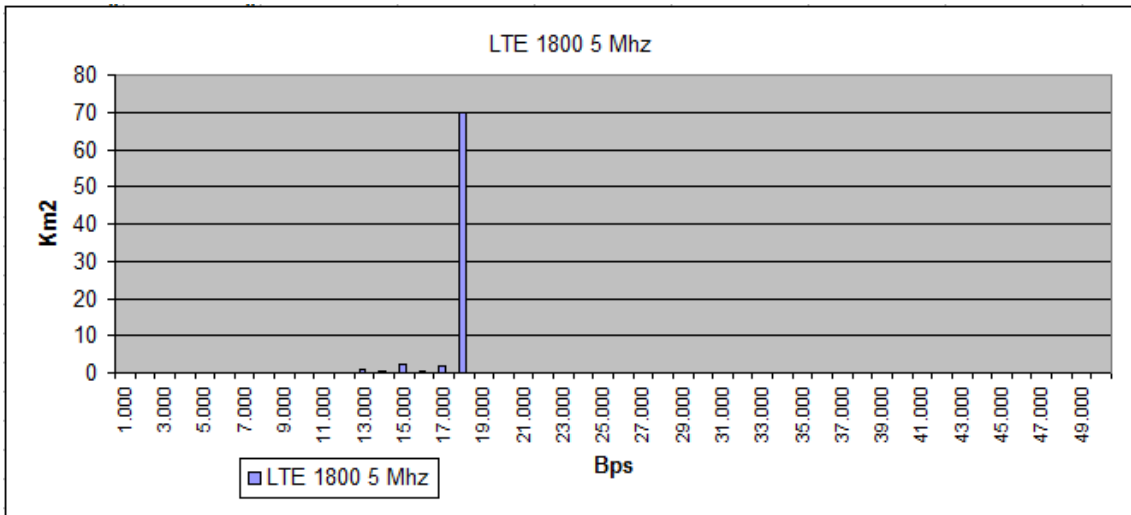


Fig5.2. Effective RLC User Throughput para LTE 1800 5 MHz

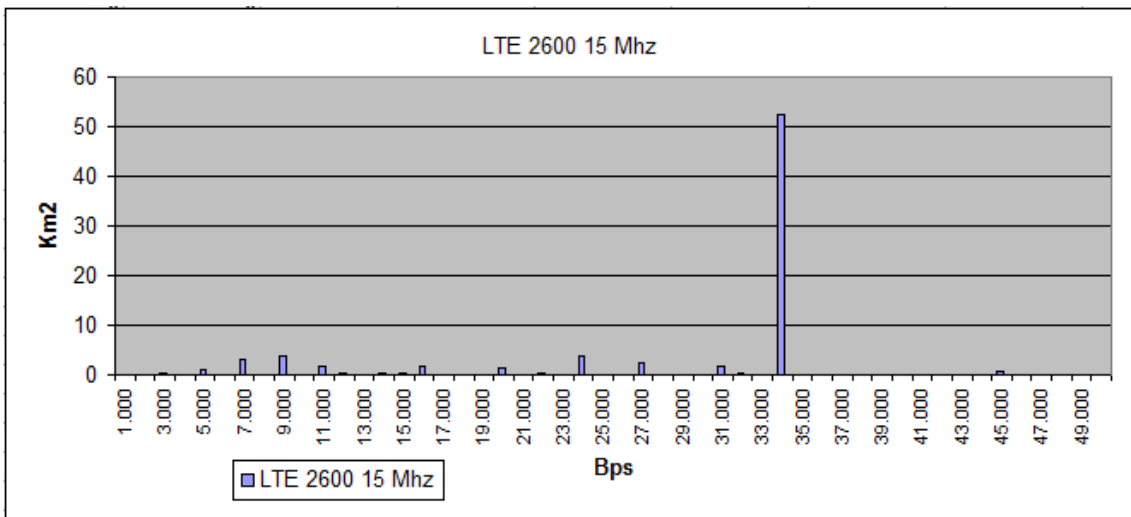


Fig5.3. Effective RLC User Throughput para LTE 2600 15 MHz

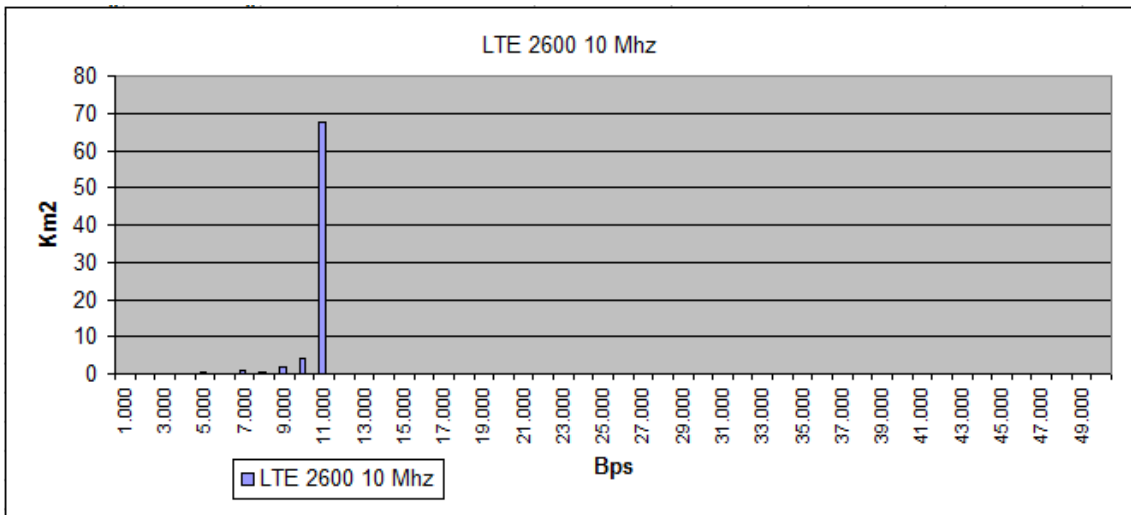


Fig5.4. Effective RLC User Throughput para LTE 2600 10 MHz

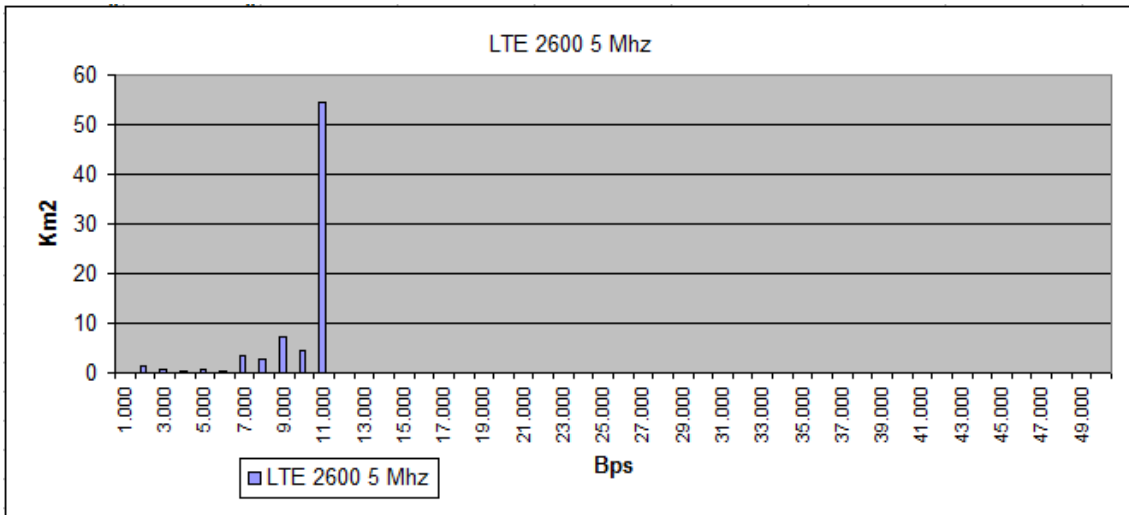


Fig5.5. Effective RLC User Throughput para LTE 2600 5 MHz

Vemos que el caso de LTE 1800 10 MHz es el caso más favorable, si nos centráramos solo en el throughput del usuario como único criterio de elección.

Ahora vamos a fijarnos en la utilización de la red.

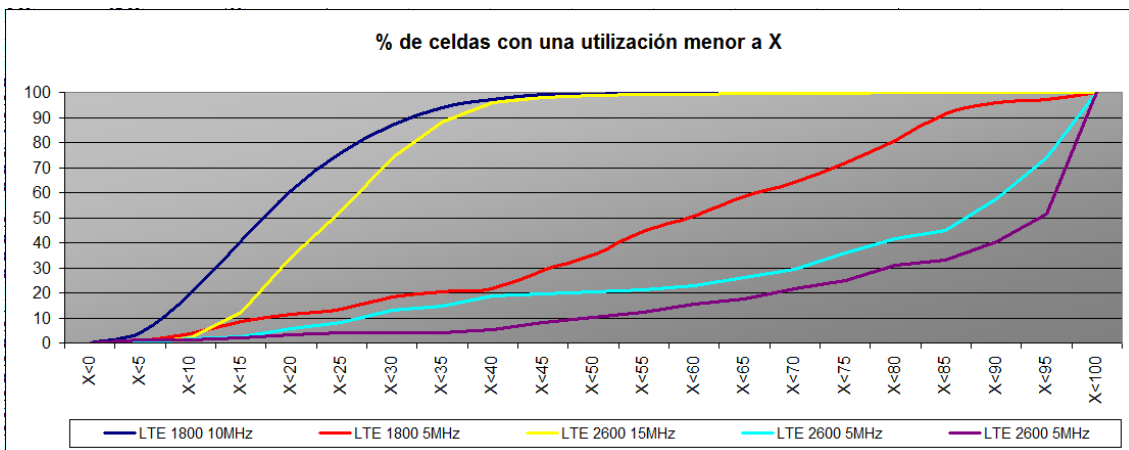


Fig 5.6. Utilización de las celdas

Vemos que el caso que antes nos era más favorable, en el caso de la utilización de la red, es el que peor perfil nos muestra, esto es debido a que en la configuración de LTE 1800 10 MHz los radios de nuestras celdas son de 300 metros y por lo cual tenemos más repartido el tráfico demandado por los usuarios.

Otro indicador para ver la calidad de nuestra red es ver cómo están repartidas las portadoras por el terreno de estudio. Como se explicó en apartados anteriores, estas son elegidas según el $C/(I+N)$ existente, siendo una portadora más alta cuanto mejor sea la relación de $C/(I+N)$.

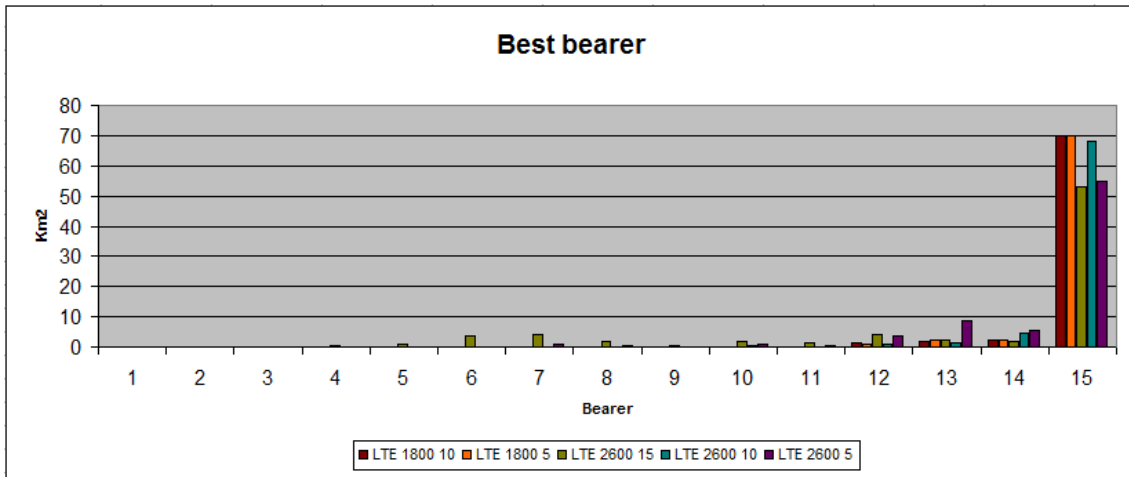


Fig 5.7. Comparativa de la distribución de Best Bearer

En este caso vemos que las configuraciones de LTE 1800 y LTE 2600 10 MHz están a la par, dejando patente que tienen una mejor calidad de señal que las otras configuraciones.

En cuanto al número de celdas necesarias para cada configuración:

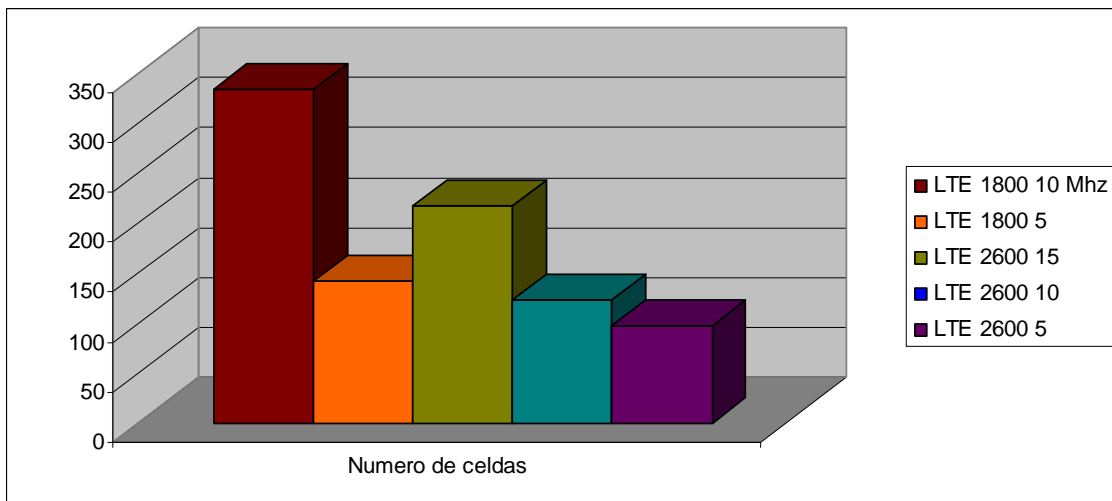


Fig5.8. Número de celdas necesarias para cada diseño

Este es el criterio que más pesa para la elección de una configuración ya que cuanto más celdas más necesidad de inversión de capital para comprar los equipos y sobre todo para alquiler de emplazamientos. Teniendo en cuenta esto nos tendríamos que decantar por una de las tres configuraciones siguientes: LTE 1800 5 MHz, LTE 2600 10 MHz y LTE 2600 5 MHz.

Observando el throughput, la utilización, número de celdas y calidad de señal la opción más correcta sería LTE 1800 5 MHz ya que tiene una utilización moderada de la red pudiendo absorber más tráfico en un futuro, las otras dos están más saturadas, aparte es también la que mejor throughput presenta. Esta sería de todas ellas la que mantendría un equilibrio entre inversión, calidad de red y durabilidad de diseño.

5.2 Futuras líneas de investigación

Unos posibles estudios que se podrían hacer a partir de lo ya hecho podrían ser los siguientes:

- Estudios de Scheduler: En este proyecto solo se ha utilizado un tipo de Scheduler para todas las simulaciones, un posible estudio sería analizar como afectaría el uso de los diferentes Scheduler existentes a las características de la red.
- Compatibilidad con otros sistemas con LTE: Estudiar cómo afectaría el despliegue de una red LTE a las otras tecnologías ya existentes como por ejemplo UMTS tanto 2100 como 900.
- Estrategia ICIC: En este proyecto se ha utilizado la asignación de frecuencia FRF3 pero existen mas pero debido a limitaciones técnicas del programa no pudieron ser realizadas . Las técnicas se muestran en la siguiente figura 5.9. Estas técnicas son Partial Reuse y Soft Reuse ambas se basan en la comunicación intercelular para crear umbrales dentro de las mismas celdas y así evitar mejor la interferencia cocanal.

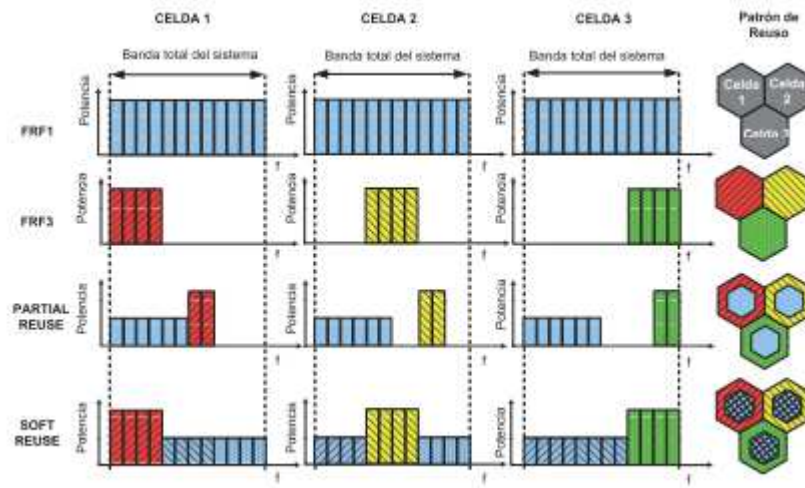


Figura 5.9 Posibles esquemas de reuso de frecuencia

6. Bibliografía

- [1] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband*, Cambridge University Press, 2009.
- [2] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, P. Beming, *3G Evolution. HSPA and LTE for Mobile Broadband*, Academic Press, Elsevier, 1a edición, 2007.
- [3] H. Sari, G. Karam, I. Jeanclaude, “Frequency-Domain Equalization of Mobile Radio and Terrestrial Broadcast Channels”, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), San Francisco, USA, 1994.
- [4] D. Falconer, S.L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar, B. Eidson “Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems”, IEEE Communications Magazine, Vol. 40, No. 4, April, 2002, pp.58-66.
- [5] A. Pokhariyal, T.E. Kolding, P.E. Mogensen “Performance of Downlink Frequency Domain Packet Scheduling for the UTRAN Long Term Evolution”, 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Helsinki, septiembre, 2006.
- [6] H.G. Myung, J. Lim, D.J. Goodman, “Single Carrier FDMA for Uplink Wireless Transmission”, IEEE Vehicular Technology Magazine, septiembre, 2006, pp. 30-38.
- [7] O. Mauritz, B. M. Popovic, “Optimum Family of Spectrum-Shaping Functions for PAPR Reduction of DFT-Spread OFDM Signals”, IEEE 64th Vehicular Technology Conference, VTC-2006 Fall, Montreal, Canada, Sept. 2006.
- [8] W.C.Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, Ed, McGraw Hill, 1982.
- [9] T.Lo, “Maximal Ratio Transmission”, IEEE Transactions On Communications, October 1999.
- [10] W.C.Y. Lee, “Mobile Communications Design Fundamentals” Ed, Wiley Interscience, 1993.
- [11] Tarokh, V. Seshadri, N, Calderbank, A.R. “Space Time codes for High Data Rate Wireless Communications”: Performance Criteria and Code Construction”, IEEE Trans. On Information Theory, 1998.
- [12] S. Alamouti, “A Simple Transmit Diversity technique for wireless communication, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1998.
- [13] G. Foschini, M. Gans, “On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas”, IEEE Wireless Personal Communications, March 1998.

- [14] A. Paulraj, R. Nabar, D. Gore “Introduction to Space-Time Wireless Communications” Cambridge University Press, 2003.
- [15] G. Golub , C.Van Loan, *Matrix Computation*, John Hopkins University press, 1989.
- [16] I. Talatar “Capacity of Multiple Antenna Gaussian Channels” European Trans. Tel., Nov/Dec 1999.
- [17] Robert W. Heath, Jr. and Arogyaswami J. Paulraj, “Switching Between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems” IEEE Transactions on Communications, June 2005.
- [18] C. B. Peel, B. M. Hochwald, and A. L. Swindlehurst, “A Vector-Perturbation Technique for Near-Capacity Multi-Antenna Multi-User Communication – Part I: Channel Inversion and Regularization” IEEE Transactions on Communications, Vol. 53, No.1, January, 2005, pp. 195-202.
- [19] D. Gesbert, M. Kountouris, R. W. Heath, Jr., C.-B. Chae, and T. Salzer, “Shifting de MIMO Paradigm: From Single User to Multiuser Communications”, IEEE Signal Processing Magazine, vol. 24, no. 5, pp. 36-46, Oct., 2007.
- [20] 3GPP TS 36.211 V8.1.0 “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation”, noviembre, 2007.
- [21]Atoll_2.8.3_RF_Technical_Reference_Guide_E2
- [22]Atoll_2.8.3_User_Manual_Radio_E2
- [23]LTE y nuevas tendencias en comunicaciones móviles