Universidad Nacional de Ingeniería

Área de Conocimiento de Tecnología de la Información y Comunicación

Modelo Automatizado en Power BI Aplicado a la Detección de Conflictos PCI y Colisión de RS en una Red LTE del Municipio de Masatepe

Trabajo Monográfico para optar al título de Ingeniero en Electrónica

Elaborado por:

Br. Robin José Tercero Centeno
Carnet: 2011-37228

Br. Emerson Elias Gutierrez Mendez
Carnet: 2013-61189

Br. Aniel Ernesto Artola Manzanares
Carnet: 2010-32726

Tutor:

Ing. Julio Ronaldo Gaitán Pavón

23 de abril de 2026
Managua, Nicaragua

Managua, 23 de abril del 2026

Msc. Claudia Benavidez Rugama.
Director DACTIC
Sus manos.

Estimada Msc. Claudia Benavidez

Reciba cordiales saludos de mi parte y los mejores deseos de éxitos en el desempeño de sus funciones. El motivo de la presente es para comunicarle que, en mi calidad de Tutor del protocolo monográfico presentado por los bachilleres, para optar al título de Ingeniero Electrónico

Br. Robin José Tercero Centeno Carnet: 2011-37228
Br. Emerson Elias Gutierrez Mendez Carnet: 2013-61189
Br. Aniel Ernesto Artola Manzanares Carnet: 2010-32726

Con el tema titulado como: **"Modelo Automatizado en Power BI para la Prevención de Interferencias Mod-3 en la Planificación de PCI's de una Red LTE en el Municipio de Masatepe",** considero que dicho protocolo reúne los requisitos según la normativa de culminación de estudios de la UNI, para ser sometido a revisión y aprobación ante el docente evaluador que designe.

Sin más a que hacer referencia le reiteramos nuestros saludos.

Atentamente,

Ing. Julio Ronaldo Gaitán Pavón
Tutor

C/C: Archivo Personal.

Dirección de Área de
Conocimiento de Tecnología
de la Información y Comunicación

Managua, 26 de enero 2026

Br. Robin José Tercero Centeno ***2011-37228***
Br. Emerson Elias Gutierrez Mendez ***2013-61189***
Br. Aniel Ernesto Artola Manzanares ***2010-32726***
Egresados Programa académico Ingeniería Electrónica
Sus manos.-

Estimados Egresados:

Reciban cordiales saludos y éxito en sus actividades.

*Por medio de la presente, les comunico la aprobación del trabajo monográfico titulado: "**Modelo automatizado en Power BI aplicado a la detección de conflictos PCI y colisión de RS en una red LTE del Municipio de Masatepe**", el cual cumple con los requisitos establecidos en el capítulo II de la normativa de trabajos monográficos de la UNI como forma de culminación de estudios, por lo que queda oficialmente aprobado por esta Dirección.*

El docente responsable de acompañarle en el proceso de desarrollo de su tema monográfico es el Ing. Julio Ronaldo Gaitán Pavón.

A partir de la fecha de aprobación, tienen como máximo seis meses para realizar el trabajo monográfico incluyendo la defensa.

Atentamente,

MSc. Claudia Lucía Benavidez Rugama
Directora Área de Conocimiento de
Tecnología de la Información y Comunicación

Cc. Ing. Julio Ronaldo Gaitán Pavón – Tutor
MSc. Luisa Massiel Mercado Gutiérrez - Secretaria Académica.
Archivo DACTIC.

Móvil: (505) 8889 0903

Recinto Universitario Simón Bolivar
Avenida Universitaria.
Managua, Nicaragua.
Apdo: 5595

claudia.benavidez@dactic.uni.edu.ni-
www.uni.edu.ni

DEDICATORIA

A mi familia, por ser el sostén que me ha impulsado en cada etapa de este camino. A mis padres, por su ejemplo de constancia y por enseñarme que los objetivos se alcanzan con esfuerzo y fe; su apoyo incondicional ha sido el motor que me ha permitido superar cada desafío.

A mi pareja, por acompañarme con amor y paciencia en esta etapa decisiva, y a mi hija, mi mayor inspiración desde su llegada a mi vida, razón y energía de cada paso dado. Este logro es también reflejo del amor, la confianza y el apoyo que me han brindado quienes siempre han creído en mí.

Robin José Tercero Centeno

Dedico este trabajo a mi familia, quienes han sido mi motor y apoyo incondicional en cada etapa de este camino. Su confianza, paciencia y aliento constante me han dado la fortaleza necesaria para superar los desafíos y mantenerme firme en la búsqueda de mis objetivos.

Este logro es también suyo, porque refleja el esfuerzo compartido y el amor que me ha acompañado siempre. A ellos debo la inspiración y la convicción de que con dedicación y perseverancia es posible alcanzar cada meta.

Aniel Ernesto Artola Manzanares

A Dios, fuente de fortaleza y guía en cada paso de este camino, elevo este esfuerzo como testimonio de fe y gratitud. A mi madre, cuyo amor incondicional y ejemplo de entrega han sido la base sobre la cual se sostiene este logro, dedico con profundo respeto y reconocimiento el fruto de esta etapa académica.

Emerson Elias Gutierrez Mendez

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi gratitud a Dios, cuya guía y fortaleza me acompañaron en cada etapa de este camino. A mis amigos, por estar presentes cuando más los necesité y ofrecerme apoyo sincero en los momentos de mayor exigencia. A mis compañeros de profesión, por su disposición y colaboración constante, que enriquecieron este proceso y lo hicieron más llevadero.

De manera especial, agradezco a mi familia por creer siempre en mí y sostenerme con paciencia. A mi pareja, por su amor y comprensión en los instantes más críticos, cuando el trabajo exigía toda mi dedicación. Y a mis padres, por su confianza inquebrantable y por enseñarme con su ejemplo que la perseverancia y la fe son la base de todo logro. Este trabajo es fruto de todos ellos, pues su apoyo y aliento fueron la energía que me impulsó a alcanzar esta meta.

Robin José Tercero Centeno

A la Universidad Nacional de Ingeniería por el espacio brindado para mi formación y el acompañamiento recibido en este proceso académico, a mi tutor cuya guía fue esencial para el desarrollo de este trabajo y a mi familia, fuente constante de motivación y fortaleza, cuyo apoyo y confianza hicieron posible alcanzar esta meta, reflejo de un esfuerzo compartido.

Aniel Ernesto Artola Manzanares

Expreso mi sincero agradecimiento a quienes han acompañado este proceso, a Dios por su luz y dirección constante, a mi madre por su apoyo incansable y su confianza en mis capacidades, y a cada persona que con su consejo, paciencia y estímulo contribuyó a que este proyecto se hiciera realidad.

Emerson Elias Gutierrez Mendez

RESUMEN

Este proyecto de graduación aborda la problemática de los conflictos de PCI y colisiones de RS en redes LTE, proponiendo un modelo automatizado en Microsoft Power BI para su detección en el municipio de Masatepe. La investigación se enmarca en la necesidad de optimizar la planificación y operación de redes móviles, integrando fundamentos normativos y herramientas de inteligencia de negocios.

El trabajo se estructura en tres objetivos: analizarlas causas técnicas que originan estas interferencias, caracterizar la red LTE de Masatepe mediante auditorías técnicas y análisis geoespacial con QGIS y ASSET Radio, y diseñar un modelo automatizado en Power BI que, mediante funciones personalizadas en Power Query, permita detectar reutilización indebida de PCI, colisiones de RS y casos de sobrepropagación.

El modelo será complementado con pruebas de estrés para evaluar su eficiencia y escalabilidad, y con el uso de VIAVI Nitro Geo como fuente secundaria de información, destinada a recopilar parámetros de los equipos de usuario y contrastar tendencias de desempeño en indicadores LTE (CQI, Throughput, RSRP y RSRQ).

Se espera que este aporte académico consolide una herramienta práctica para operadores y equipos técnicos, fortaleciendo la detección temprana de conflictos y ofreciendo un enfoque innovador y replicable para el análisis y optimización de redes LTE en el contexto nacional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN 1
II. ANTECEDENTES 2
III. OBJETIVOS 4
3.1 Objetivo General 4
3.2 Objetivos Específicos 4
IV. MARCO TEÓRICO 5
4.1 Redes LTE 5
4.1.1 Descripción General 5
4.1.2 Arquitectura 6
4.1.3 Estructura de la Señal 6
4.1.4 Prefijo Cíclico 7
4.1.5 Elemento de Recurso 8
4.1.6 Bloque de recursos 8
4.1.7 Rejilla de Recursos 9
4.2 Identidad de Celda de la Capa Física LTE 10
4.2.1 Physical-Layer Cell Identity 10
4.2.2 Señales de Sincronización Primaria y Secundaria 10
4.2.3 Reutilización de PCI 11
4.2.4 Dependencias del PCI 12
4.3 Señales de Referencia en LTE 13
4.3.1 Cell-Specific Reference Signal 13
4.3.2 Positioning Reference Signal 14
4.3.3 Demodulation Reference Signal 15
4.3.4 Sounding Reference Signal 15
4.4. Conflictos Técnicos Relacionados a la Identidad Física de Celdas 16
4.4.1 Colisión de PCI 16
4.4.2 Confusión de PCI 16
4.4.3 Colisión RS por Identidad de Secuencia Pseudoaleatoria 17
4.4.4 Colisión RS por Solapamiento en la Rejilla de Recursos 18

4.5. Inteligencia de Negocios y Modelos de Visualización de Datos 19
4.5.1 Concepto de modelo automatizado 19
4.5.2 Visualización de datos 20
4.5.3 Power BI como herramienta de análisis 21
V. METODOLOGÍA DE TRABAJO 23
5.1 Etapa I 23
5.2 Etapa II 23
5.3 Etapa III 24
VI. DESARROLLO DEL PROYECTO 25
6.1 Análisis de las causas técnicas asociadas a conflictos PCI y colisión de RS en redes LTE 25
6.1.1 Limitaciones intrínsecas del PCI 25
6.1.2 Factores asociados a la operatividad y planificación de la red ... 27
6.1.3 Factores físicos y de propagación radioeléctrica 29
6.1.4 Criterios técnicos para la detección de conflictos PCI y colisiones de RS 30
6.2 Red LTE de Masatepe 32
6.2.1 Generalidades del Municipio de Masatepe 32
6.2.2 Sitios Desplegados 33
6.2.3 Sistema Radiante 34
6.2.4 Distribución de PCI 35
6.2.5 Cobertura LTE 37
6.3 Diseño del modelo automatizado en Power Bi 40
6.3.1 Fuentes de Datos 40
6.3.2 Construcción de la Tabla Base 41
6.3.3 Parámetros 42
6.3.4 Funciones 42
6.3.5 Consultas 43
6.3.6 Relaciones 45
6.3.7 Objetos Visuales 45
6.3.8 Pruebas de Estrés 46

6.3.9 Mitigación de Conflictos RS en Ciudad de Masatepe 47
VII. CONCLUSIONES 49
VIII. RECOMENDACIONES 50
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 51
X. ANEXOS 52
Anexo A: Contador Ericsson pmTaInit2Distr 52
Anexo B: Procedimiento Cálculo de Intersección de Líneas 53
Anexo C: Procedimiento Cálculo de Distancia con Haversine 54
Anexo D: Resultados Redistribución de PCI en Ciudad de Masatepe 55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1, Arquitectura LTE 6
Figura 2, Estructura en el dominio de la frecuencia 7
Figura 3, Bloque de Recursos CP Normal 8
Figura 4, Identidades y grupos PCI para LTE 10
Figura 5, Mapeo PSS y SSS 11
Figura 6, Reutilización de PCI cada 4 intersitios de distancia 12
Figura 7, Posición de CRS en un bloque de programación 13
Figura 8, Transmisión de subtramas PRS 14
Figura 9, Mapeo de canales de enlace ascendente 15
Figura 10, Conflicto PCI 16
Figura 11, Confusión PCI 17
Figura 12, Fases en el desarrollo de modelos para la toma de decisiones 19
Figura 13, Ejemplo de Dashboard para visualización de datos 20
Figura 14, Integración de varias fuentes de datos en Power BI 21
Figura 15, Posición de CRS en Antena de 4 Puertos para PCI 0 y 3 27
Figura 16, Distribución Política Administrativa de Masatepe 32
Figura 17, Red LTE Municipio de Masatepe y Ciudad de Masatepe 34
Figura 18, Antena KRE 101 2452/1 y Radio 4499 B2/B4 35
Figura 19, Distribución de PCI en la red LTE de Masatepe 36

Figura 20, Conflictos de CRS PCI mod 3 en Ciudad de Masatepe 36
Figura 21, Cobertura LTE municipio de Masatepe a corte de -105dBm RSRP..... 37
Figura 22, Cobertura LTE Ciudad de Masatepe a corte de -105dBm RSRP 38
Figura 23, Superposición de cobertura entre MAS-000049 y MAS-000045..... 38
Figura 24, Plot de cobertura sitio CAR-000052 con sobrepropagación..... 39
Figura 25, Transformaciones de la Tabla Base..... 41
Figura 26, Parámetros del Modelo Power Bi..... 42
Figura 27, Relaciones entre consultas del Proyecto 45
Figura 28, Vista de Informe del Modelo en Power Bi 46
Figura 29, Redistribución de PCI Previo vs Posterior en Ciudad de Masatepe..... 47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1, Características de LTE..... 5
Tabla 2, Estructura de la señal en el dominio del tiempo..... 7
Tabla 3, Tipos de Prefijo Cíclico..... 8
Tabla 4, Relación entre ancho de banda y bloques de recursos..... 9
Tabla 5, Clasificación de causas de conflictos PCI y RS 25
Tabla 6, Dependencia entre PCI y señales físicas LTE 26
Tabla 7, Relación entre residuos del PCI y patrones de RS..... 26
Tabla 8, Factores asociados a la operatividad y planificación de la red..... 28
Tabla 9, Factores Físicos y de Propagación Radioeléctrica..... 29
Tabla 10, Criterios técnicos para la detección de conflictos PCI y colisión RS 30
Tabla 11, Sitios que brindan cobertura al municipio de Masatepe 33
Tabla 12, Fuentes de datos utilizadas en el modelo de Power BI..... 40
Tabla 13, Formato de Tabla Base del Modelo en Power Bi 42
Tabla 14, Funciones personalizadas utilizadas en el modelo de detección 43
Tabla 15, Consultas principales del modelo de detección..... 44
Tabla 16, Resultados de la Prueba de Estrés 46
Tabla 17, Impacto de la redistribución de PCI en indicadores LTE..... 48

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

3GPP	3rd Generation Partnership Project
BI	Business Intelligence
CRS	Cell Reference Signal
DMRS	Demodulation Reference Signal
ENM	Ericsson Network Manager
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network
GIS	Geographic Information System
KPI	Key Performance Indicator
LTE	Long Term Evolution
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PCI	Physical Cell Identity
PRS	Positioning Reference Signal
PSS	Primary Synchronization Signal
RS	Reference Signal
SRS	Sounding Reference Signal
SQL	Structured Query Language
SSS	Secondary Synchronization Signal
TA	Timing Advance
UE	User Equipment
WKT	Well Known Text

I. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de graduación propone un Modelo Automatizado en Microsoft Power BI aplicado a la detección de conflictos de PCI y colisión de RS en una red LTE del municipio de Masatepe. Esta problemática técnica constituye un factor crítico en la planificación y optimización de redes móviles, ya que los conflictos PCI y las colisiones de RS pueden generar degradación en la estimación del canal, fallas en los procesos de handover y disminución en los indicadores clave de desempeño.

El estudio analiza las causas técnicas de los conflictos PCI y la colisión de RS en redes LTE, define criterios para su identificación y caracteriza la red de Masatepe mediante el análisis de celdas, parámetros y cobertura. Tras el procesamiento y validación de los datos, se diseña un modelo automatizado en Microsoft Power BI que permite detectar y visualizar estos conflictos de forma interactiva, facilitando el análisis y la toma de decisiones técnicas.

Los principales beneficiarios del proyecto son los operadores y equipos técnicos encargados de la planificación y optimización de la red LTE, quienes contarán con una herramienta automatizada que mejora la eficiencia en la identificación de problemas. De manera indirecta, se benefician los usuarios del servicio móvil en el municipio de Masatepe, al obtener una mejor calidad de cobertura, mayor estabilidad en las conexiones y una experiencia de comunicación más confiable. Asimismo, el ámbito académico y profesional se verá favorecido al integrar conocimientos de telecomunicaciones con herramientas de inteligencia de negocios aplicadas a la gestión de redes.

II. ANTECEDENTES

La gestión eficiente de identificadores físicos y la mitigación de interferencias intercelulares en redes LTE han sido ampliamente abordadas en investigaciones recientes debido al crecimiento del tráfico de datos y la densificación de estaciones base.

Diversas investigaciones han abordado esta problemática mediante mecanismos automatizados y esquemas de evaluación técnica orientados a reducir interferencias y mejorar el desempeño de la red. En este contexto, Cortesão et al. (2021) desarrollaron un sistema basado en arquitecturas SON para la asignación y reasignación automática de PCI; Rao et al. (2019) analizaron el impacto de la interferencia sobre las señales de referencia en redes LTE y 5G; y Romer Valor et al. (2018) propusieron un modelo metodológico para identificar relaciones conflictivas entre celdas previo a realizar modificaciones en la infraestructura. Asimismo, estudios aplicados como The Optimization of PCI Interference in the 4G LTE Network in Padang (2021) evidencian que la detección temprana de configuraciones conflictivas permite optimizar indicadores de rendimiento y preservar la calidad del servicio.

A pesar de estos avances, muchas de las soluciones documentadas se implementan mediante algoritmos internos o plataformas propietarias de fabricantes, lo que limita su adaptabilidad y visualización analítica en contextos específicos. En consecuencia, en diversos entornos operativos la identificación de conflictos PCI y colisión de RS continúa realizándose mediante análisis manuales o reportes aislados, dificultando la detección oportuna de escenarios críticos.

En el contexto nacional, no se identifican investigaciones que integren modelos automatizados basados en herramientas de inteligencia de negocios para la detección sistemática de estos conflictos en redes LTE. Aunque la planificación radioeléctrica se ejecuta conforme a lineamientos técnicos establecidos, persiste una brecha en la incorporación de plataformas analíticas que consoliden datos de configuración,

parámetros físicos y relaciones de vecindad en entornos interactivos que faciliten el análisis integral de la red.

Desde el punto de vista ingenieril, la adecuada gestión de identificadores físicos y señales de referencia se fundamenta en principios orientados a minimizar interferencias y optimizar el uso del espectro radioeléctrico, conforme a las especificaciones del 3GPP. Estas normativas constituyen la base técnica para establecer criterios de validación aplicables en modelos automatizados.

En este escenario, herramientas de inteligencia de negocios como Microsoft Power BI permiten integrar grandes volúmenes de datos, aplicar reglas lógicas y representar visualmente relaciones entre celdas mediante paneles interactivos. La limitada integración de este tipo de soluciones analíticas en el contexto local sustenta la necesidad de proponer un modelo automatizado que combine fundamentos normativos, principios ingenieriles y análisis de datos para fortalecer la detección sistemática de conflictos PCI y colisión de RS en la red LTE del municipio de Masatepe.

III. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

- Proponer un Modelo Automatizado en Power BI Aplicado a la Detección de Conflictos PCI y Colisión de RS en una Red LTE del Municipio de Masatepe.

3.2 Objetivos Específicos

- Analizar las causas técnicas que originan conflictos PCI y colisión de RS en redes LTE, con el propósito de establecer los criterios que serán integrados en el modelo automatizado.

- Caracterizar la red LTE en Masatepe mediante la identificación de celdas, parámetros físicos, vecindarios y patrones de cobertura, a fin de determinar condiciones que puedan generar conflictos PCI y colisión de RS.

- Diseñar un modelo automatizado en Power BI que permita la detección y visualización interactiva de conflictos PCI y colisión de RS en la red LTE del municipio de Masatepe, a partir de los criterios técnicos previamente analizados.

IV. MARCO TEÓRICO

4.1 Redes LTE

4.1.1 Descripción General

LTE es un estándar de comunicaciones móviles desarrollado por 3GPP para ofrecer mayores velocidades de datos, mejor eficiencia espectral y menor latencia en redes móviles. Esta tecnología emplea diferentes técnicas de acceso múltiple según el sentido de la transmisión. En el dowlink utiliza OFDMA, mientras que en el uplink utiliza SC-FDMA. Estas técnicas permiten un uso eficiente del espectro y reducen la interferencia entre usuarios. *[2]*

Tabla 1, Características de LTE. *[2]*

Característica	**Descripción**
Uso flexible del ancho de banda	LTE no está limitado por un ancho de banda fijo. El estándar LTE permite un ancho de banda de 1,4 MHz a 20 MHz, lo que proporciona flexibilidad al operador al utilizar el espectro.
Ortogonalidad en el enlace ascendente y descendente	Todos los usuarios de una celda utilizan transmisiones ortogonales entre sí, tanto en el enlace ascendente como en el descendente. No hay interferencia intra-celda (excepto la interferencia por canales adyacentes).
Esquemas avanzados de modulación y codificación	Dependiendo de las condiciones de la señal, puede emplear QPSK, 16-QAM, 64-QAM o 256-QAM. A mayor orden de modulación, mayor velocidad de transmisión, aunque se requiere mejor calidad de señal.
FDD y TDD	LTE soporta FDD y TDD.
Tecnología de antenas avanzadas	La tecnología MIMO se utiliza en el enlace descendente para permitir altas velocidades pico y mejorar la cobertura.

4.1.2 Arquitectura

LTE se organiza en dos grandes componentes: el E-UTRAN, formado por los eNodeB que se comunican directamente con los usuarios, y el EPC, encargado de la gestión, el control y la conexión con redes externas. El eNodeB administra los recursos radio, controla la potencia, programa a los usuarios y participa en la movilidad. En el plano de control, se comunica con la MME, responsable de la señalización de acceso y movilidad. En el plano de usuario, el tráfico se enruta hacia el SGW, que actúa como punto de anclaje durante la movilidad, y desde allí al PDN-GW, que conecta con redes externas como Internet. Esta arquitectura separa de manera clara el plano de control y el plano de usuario, lo que mejora la eficiencia y el desempeño del sistema. *[7]*

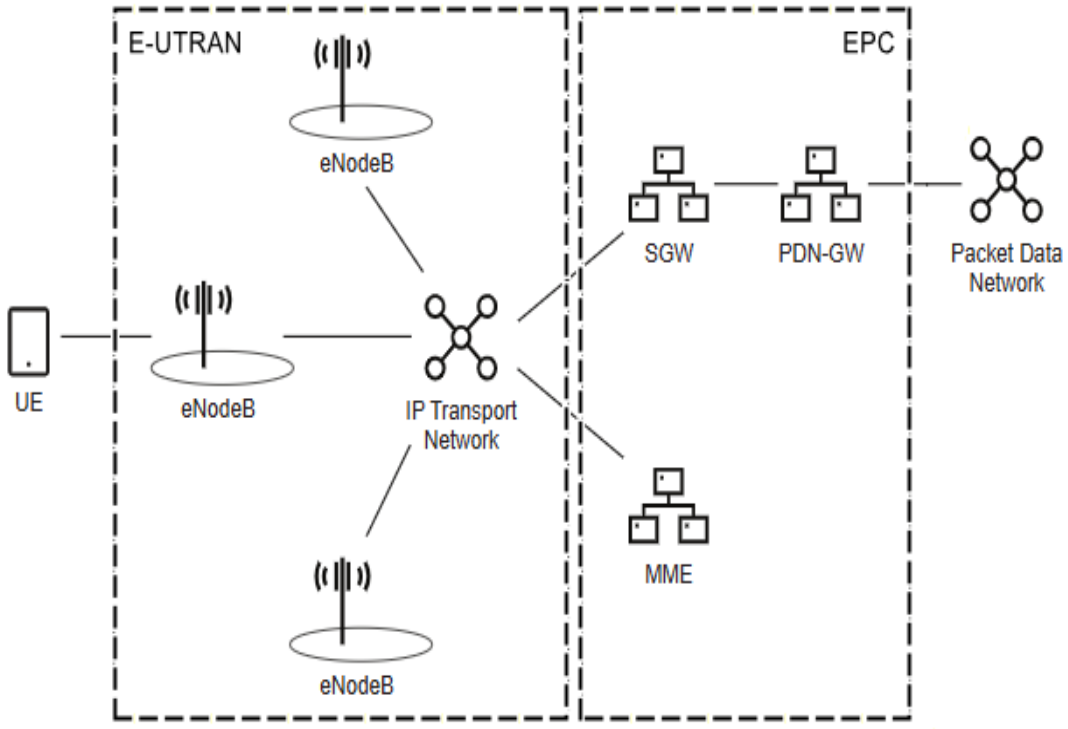


Figura 1, *Arquitectura LTE. [7]*

4.1.3 Estructura de la Señal

En el dominio del tiempo, la señal se organiza jerárquicamente en tramas de radio, subtramas, slot y símbolos ODFM. Ver tabla 2.

Tabla 2, Estructura de la señal en el dominio del tiempo. *[3]*

Elemento	**Descripción**
Tramas de Radio	10 ms de duración.
Subtramas	Duración de 1 ms. Una trama consta de 10 subtramas.
Slot	Duración de 0,5 ms. Una subtrama consta de dos slots.
Símbolo OFDM	Aproximadamente 71,4 µs de duración. Cada slot consta de 7 símbolos OFDM.

En el dominio de la frecuencia, LTE utiliza OFDM, que divide el ancho de banda disponible en un gran número de subportadoras. Cada subportadora es ortogonal a las demás, lo que significa que no interfieren entre sí, aunque estén muy próximas en frecuencia. La separación entre subportadoras es de 15 kHz, que coincide con el ancho de banda de cada subportadora. *[3]*

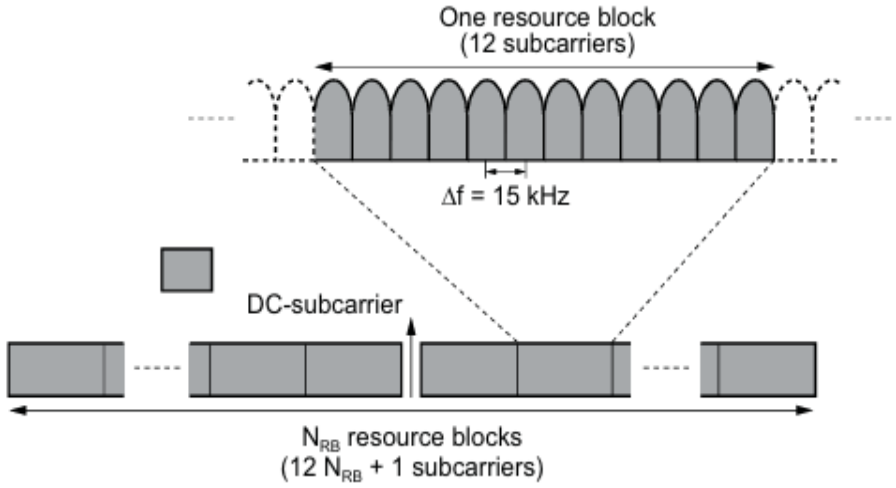


Figura 2, *Estructura en el dominio de la frecuencia. [3]*

4.1.4 Prefijo Cíclico

El CP es un intervalo de guarda que se añade al inicio de cada símbolo OFDM en LTE. Su función principal es proteger la señal frente a los efectos de dispersión por trayectos múltiples, evitar la interferencia entre símbolos consecutivos y mantener la ortogonalidad entre subportadoras. *[9]*

Tabla 3, Tipos de Prefijo Cíclico. *[9]*

Tipo	Posición	Duración	Distancia	Símbolos	Aplicación
Normal	1er Símbolo	5.2 µs	1.6 Km	7	Celdas urbanas y áreas con poco retardo.
	Demás Símbolos	4.7 µs	1.4 km		
Extendido	1er Símbolo	16.7 µs	5.0 Km	6	Celdas rurales grandes o MBSFN.
	Demás Símbolos	33.3 µs	10.0 Km		

4.1.5 Elemento de Recurso

La unidad de recurso más pequeña que se maneja en LTE es la combinación de un símbolo OFDM y una subportadora. La combinación de un símbolo OFDM y una subportadora se denomina RE. *[3]*

4.1.6 Bloque de recursos

En LTE, varios RE's se agrupan para formar un RB físico. Un RB consta de 7 símbolos OFDM con CP normal y 12 subportadoras consecutivas. Un RB contiene 84 RE. Cubre 0,5 ms en el dominio del tiempo y 180 kHz en el dominio de la frecuencia. *[3]*

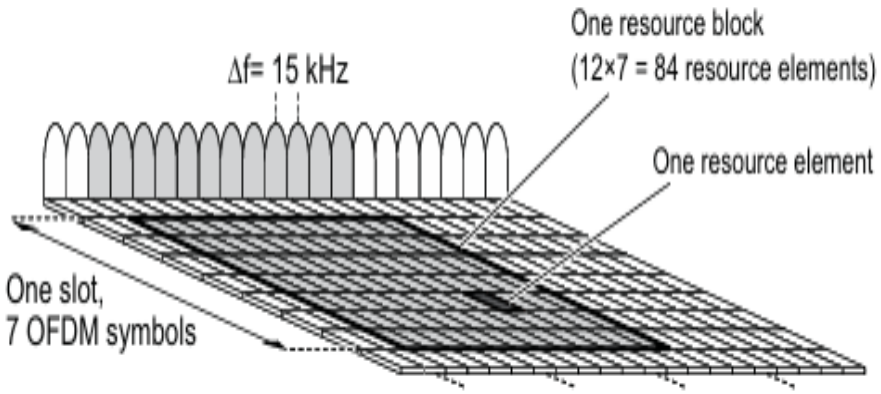


Figura 3, *Bloque de Recursos CP Normal. [3]*

En LTE, la programación de usuarios se realiza cada un TTI de 1 ms. Un bloque de programación consta de dos RB adyacentes en el tiempo y con las mismas subportadoras. Un bloque de programación es la unidad de enlace descendente más pequeña que se puede programar para un UE. *[3]*

4.1.7 Rejilla de Recursos

La rejilla de recursos es una representación en el plano tiempo-frecuencia donde se ubican todos los elementos transmitidos tales como datos, señales de control y señales de referencia. *[3]*

El tamaño de la rejilla de recursos se define por una trama de radio completa y el ancho de banda total del sistema. El ancho de banda del sistema expresado como el número total de RB en el dominio de la frecuencia, está dado en la Tabla 4.

Tabla 4, Relación entre ancho de banda y bloques de recursos. *[3]*

Ancho de Banda	**Número de Bloques de Recursos n_{RB}**
1.4 Mhz	6
3.0 Mhz	15
5.0 Mhz	25
10.0 Mhz	50
15.0 Mhz	75
20.0 Mhz	100

4.2 Identidad de Celda de la Capa Física LTE

4.2.1 Physical-Layer Cell Identity

En LTE, cada celda se identifica a nivel físico mediante un PCI. Existen 504 valores posibles, numerados del 0 al 503. El PCI se define según la expresión:

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{\mathrm{ID}}^{(1)} + N_{\mathrm{ID}}^{(2)}$$

Donde $N_{\mathrm{ID}}^{(1)}$ corresponde al grupo de identidad física de celda y puede tomar valores entre 0 y 167. Mientras que $N_{\mathrm{ID}}^{(2)}$ corresponde a la subidentidad física de celda y puede tomar valores 0, 1 o 2. *[1]*

La estructura del PCI está directamente relacionada con las señales de sincronización. El UE detecta primero la PSS, lo que le permite identificar el valor de $N_{\mathrm{ID}}^{(2)}$. Posteriormente, mediante la detección de la SSS, determina el valor de $N_{\mathrm{ID}}^{(1)}$. Con ambos parámetros, el UE calcula de manera única el PCI de la celda.

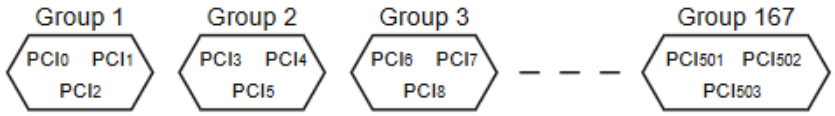


Figura 4, *Identidades y grupos PCI para LTE. [4]*

4.2.2 Señales de Sincronización Primaria y Secundaria

En redes LTE, cada celda transmite dos señales de sincronización cada 5 ms, denominadas PSS y SSS. Estas señales permiten al equipo UE realizar los procedimientos de búsqueda, sincronización temporal y detección de celda. Ambas señales se transmiten en las subtramas 0 y 5 de la trama de radio, y se mapean sobre 72 subportadoras ubicadas en la parte central del ancho de banda del sistema. *[3]*

La PSS se transmite en el símbolo OFDM número 6 del slot correspondiente, mientras que la SSS se transmite en el símbolo OFDM número 5. La PSS dispone de tres secuencias posibles, mientras que la SSS dispone de 168 secuencias diferentes. La combinación de ambas señales permite determinar de forma única la identidad física de la celda. *[3]*

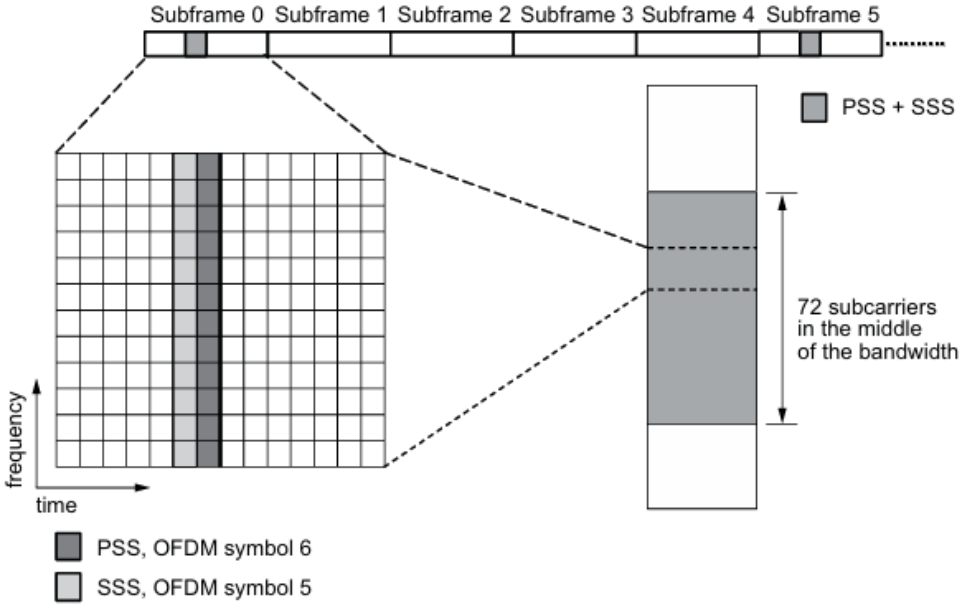


Figura 5, *Mapeo PSS y SSS. [3]*

4.2.3 Reutilización de PCI

La reutilización es un principio inherente al diseño de las redes LTE, debido a que el número de identificadores disponibles está limitado a un total de 504 valores posibles. En despliegues de mediana y gran escala, esta cantidad resulta insuficiente para garantizar unicidad absoluta, por lo que se hace necesario reutilizar los valores de PCI en diferentes ubicaciones geográficas.

El concepto de reutilización implica que un mismo identificador puede ser asignado a distintas celdas siempre que exista una separación geográfica o radioeléctrica suficiente que evite interferencias o ambigüedades en los procesos de identificación por parte del UE.

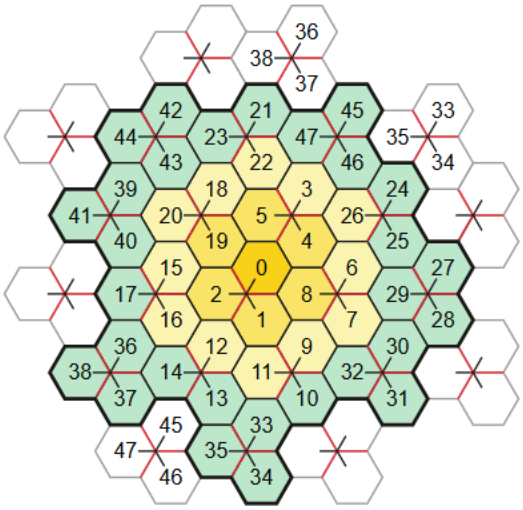


Figura 6, *Reutilización de PCI cada 4 intersitios de distancia. [5]*

4.2.4 Dependencias del PCI

En LTE, el PCI influye en diversas señales físicas tanto en la construcción de sus secuencias como en su posicionamiento dentro de la rejilla de recursos.

Las señales de sincronización PSS y SSS están directamente relacionadas con la definición del PCI ya que su combinación determina el valor completo de la identidad física de celda (ver subcapítulo 4.2.2).

El CRS y el PRS presentan una dependencia estructural del PCI que determina su desplazamiento en la rejilla de recursos. *[1]*

Por su parte, el CSI-RS, así como las señales de referencia del enlace ascendente DMRS y SRS, utilizan secuencias cuya generación puede incorporar el PCI como parámetro, aunque sin modificar su patrón de mapeo en tiempo-frecuencia. *[1]*

Esta diferenciación entre dependencia estructural y dependencia de secuencia resulta fundamental para el análisis de interferencia, planificación de PCI y estudio de colisiones de señales de referencia en redes multicelda.

4.3 Señales de Referencia en LTE

4.3.1 Cell-Specific Reference Signal

Para demodular coherentemente los canales físicos de dowlink, el UE necesita estimaciones de canal en cada subportadora. Para ello se insertan símbolos de referencia conocidos dentro de la rejilla de recursos, distribuidos uniformemente en cada bloque de recursos, lo que permite al UE estimar el canal en todo el ancho de banda asignado. Cuando se transmite con varias antenas, cada una debe usar una señal de referencia única y las demás permanecer en silencio. El mapeo del CRS en la cuadrícula depende de la configuración de antenas y puede variar en frecuencia. *[3]*

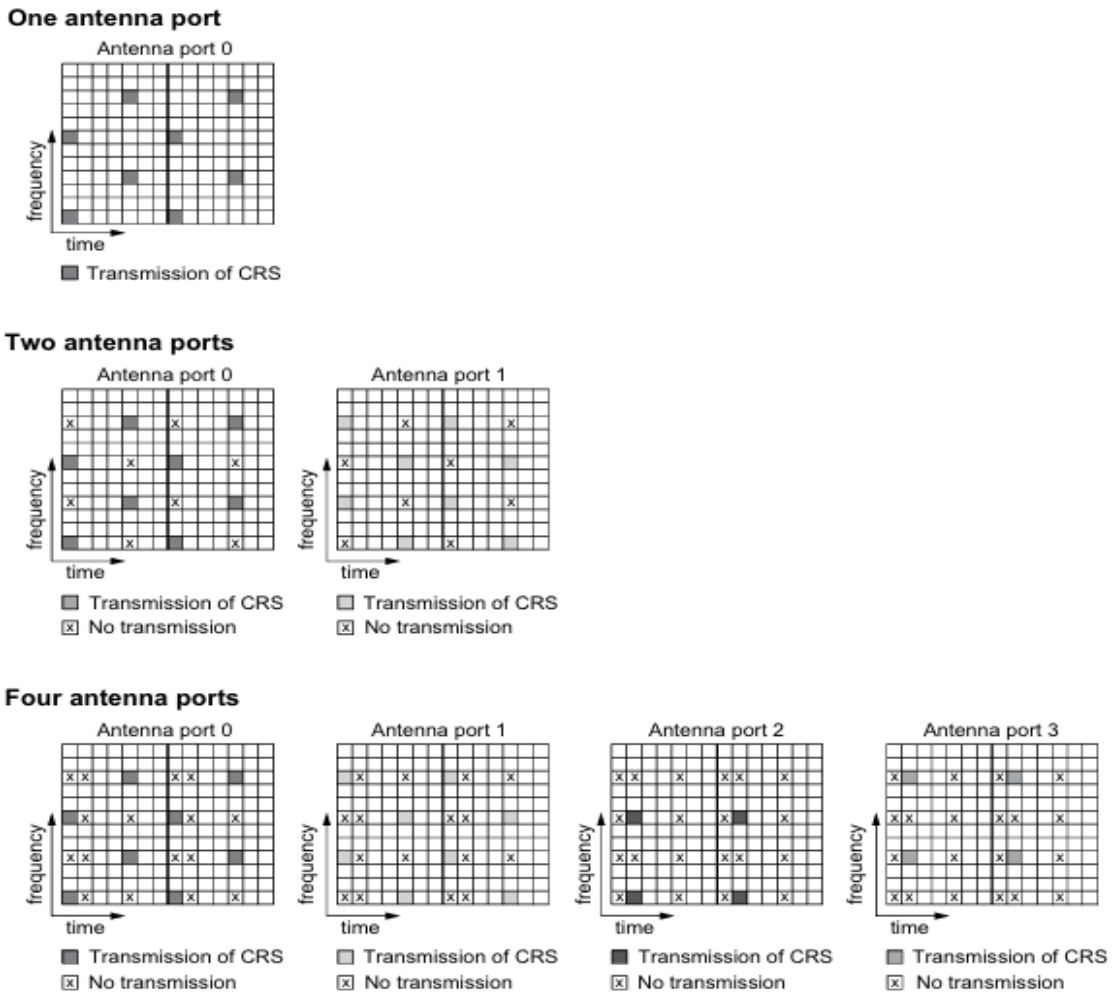


Figura 7, *Posición de CRS en un bloque de programación. [3]*

La CRS se transmite usando los puertos de antena 0, 1, 2 y 3. Con un puerto de antena, el número de RE en un bloque de programación ocupado por el CRS es 8. Con dos puertos de antena, el número es 16 y para cuatro puertos de antena, 24. Existen seis posibles desplazamientos de frecuencia, determinados por el PCI y el tipo de CP. *[9]*

4.3.2 Positioning Reference Signal

Las PRS son señales de referencia diseñadas para soportar el método de posicionamiento OTDOA. Su función principal es permitir que el UE estime con alta precisión la diferencia en el tiempo de llegada de las señales de enlace descendente provenientes de distintas celdas, mediante mediciones llamadas RSTD, mejorando así la exactitud en la determinación de la ubicación del usuario.

Las PRS's se transmiten con una periodicidad configurable T_{PRS}, expresada en milisegundos. En cada ocasión de transmisión, las PRS's se envían durante un número determinado de subtramas consecutivas de downlink $n_{subf,con}$. *[3]*

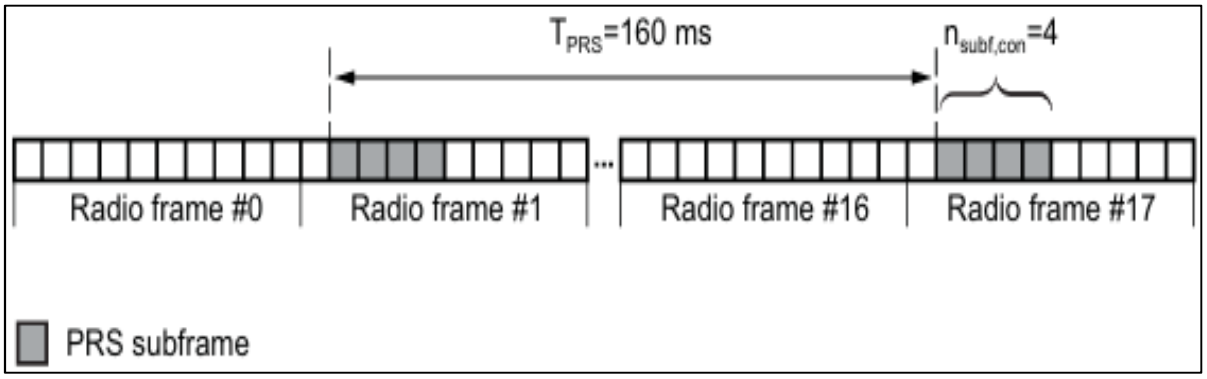


Figura 8, *Transmisión de subtramas PRS. [3]*

Las PRS's se transmiten usando el puerto de antena 6. No se mapean sobre los RE's usados por PBCH, PSS ni SSS. Pueden coexistir con las CRS, PCFICH, PHICH y PDCCH. Al igual que las CRS's, las PRS's presentan 6 posibles desplazamientos en frecuencia dependientes del PCI y del tipo de CP. *[3]*

4.3.3 Demodulation Reference Signal

En el enlace ascendente también se requieren señales de referencia para que el eNodeB pueda realizar una demodulación coherente de los canales físicos uplink, principalmente el PUSCH y el PUCCH. Esta señal de referencia se denomina DMRS. El DMRS está multiplexado en el tiempo con los canales PUSCH y PUCCH. Cuando se transmite junto con el PUSCH, el símbolo central de cada slot se reserva para el DMRS (véase la Figura 10). *[3]*

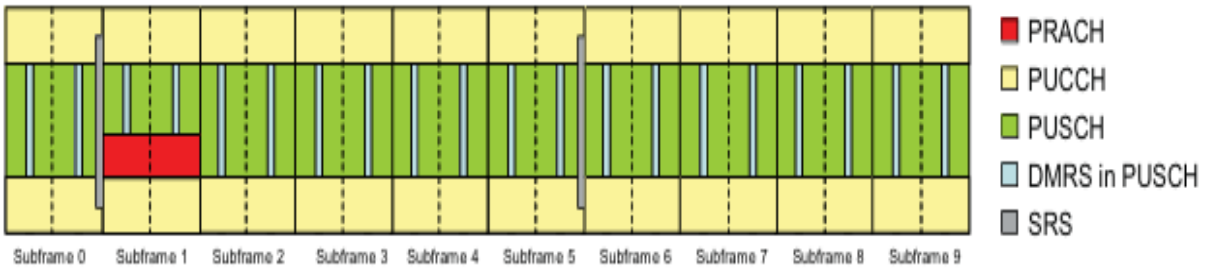


Figura 9, *Mapeo de canales de enlace ascendente. [3]*

4.3.4 Sounding Reference Signal

La SRS es una señal de referencia en el enlace ascendente que permite al eNodeB evaluar la calidad del canal en una parte del ancho de banda y, con ello, realizar programación selectiva en frecuencia y optimizar la adaptación de enlace. Se transmite en subtramas específicas, normalmente cada cinco, ocupando solo el último símbolo OFDM, lo que representa alrededor del 1.4% de los recursos de la rejilla. *[3]*

Puede ser enviada simultáneamente por varios equipos dentro del mismo bloque de recursos, utilizando patrones de separación en frecuencia y desplazamientos cíclicos para evitar interferencias. En celdas de cobertura extendida mayores a 100 km, la SRS no se configura para los usuarios más alejados debido a limitaciones de propagación y temporización. En anchos de banda menores a 10 MHz se emplea transmisión sin salto en frecuencia, mientras que en anchos superiores a 10 MHz se utiliza un esquema con salto en frecuencia.

4.4. Conflictos Técnicos Relacionados a la Identidad Física de Celdas

4.4.1 Colisión de PCI

La colisión de PCI ocurre cuando dos celdas que operan en la misma frecuencia comparten el mismo PCI y sus áreas de cobertura se superponen, de manera que un UE puede detectar simultáneamente ambas señales. Esto genera ambigüedad en las mediciones, porque el UE reporta valores asociados a un PCI, pero la red no puede saber con certeza a cuál de las dos celdas corresponden dichas mediciones. Como consecuencia, se producen errores en la identificación de vecinos, se degradan los procedimientos de handover, se incrementa la probabilidad de ping-pong y se afecta la optimización automática de la red. *[9]*

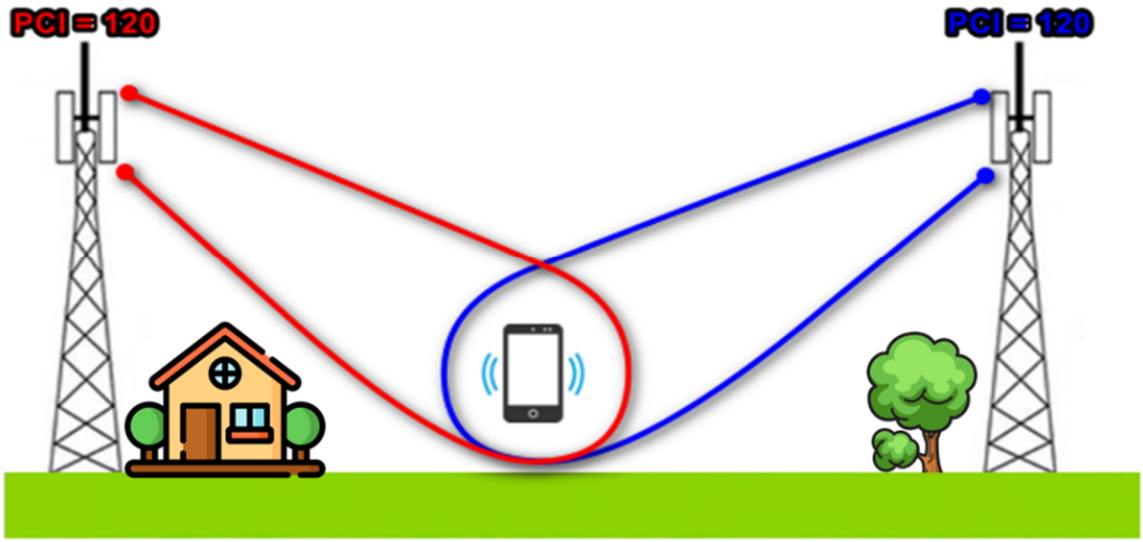


Figura 10, *Conflicto PCI.*

4.4.2 Confusión de PCI

La confusión de PCI ocurre cuando dos celdas que comparten el mismo PCI no son detectables entre sí directamente, pero sí son detectadas simultáneamente por una tercera celda o por un UE ubicado en una zona intermedia de la red. En este caso,

aunque no exista solapamiento directo entre las dos celdas que reutilizan el PCI, la presencia de una tercera celda que mantiene relaciones de vecindad con ambas genera ambigüedad en la gestión de movilidad. Desde el punto de vista operativo, la confusión de PCI puede provocar dificultades en la construcción coherente de la lista de vecinos, inconsistencias en los reportes de medición, selección incorrecta de celda objetivo durante handover e incremento en la tasa de fallas de traspaso. *[9]*

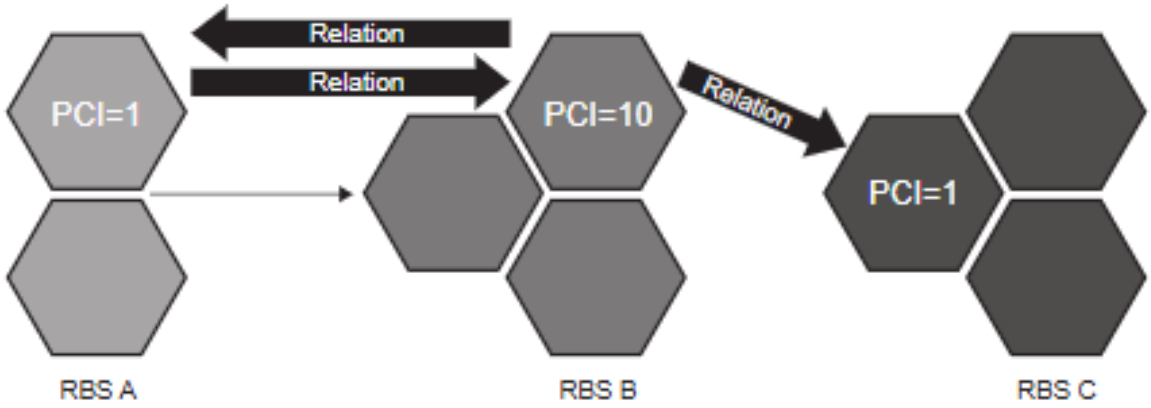


Figura 11, *Confusión PCI. [6]*

4.4.3 Colisión RS por Identidad de Secuencia Pseudoaleatoria

Las señales de referencia en LTE utilizan secuencias pseudoaleatorias tipo Gold. La generación de estas secuencias depende de un parámetro de inicialización C_{init}, el cual incorpora, en varios casos, la identidad física de la celda como parte del proceso de generación. *[1]*

Cuando dos o más celdas que operan en la misma frecuencia comparten el mismo PCI, y además coinciden los parámetros temporales de transmisión, el resultado es la generación de secuencias idénticas. En un escenario donde múltiples celdas convergen en una misma zona de cobertura con el mismo PCI, se produce una ambigüedad matemática de las señales de referencia. Desde el punto de vista del receptor, la correlación con la secuencia esperada no permite discriminar el origen de la señal recibida.

Las principales consecuencias técnicas son la degradación en la estimación del canal, contaminación de mediciones RSRP y RSRQ, errores en la selección de celda servidora, inestabilidad en los procedimientos de movilidad e incremento en fallas de handover.

Este tipo de colisión es estructural y no puede mitigarse únicamente mediante ajustes de potencia, ya que el problema radica en la identidad matemática de la secuencia transmitida.

4.4.4 Colisión RS por Solapamiento en la Rejilla de Recursos

De forma independiente a la secuencia generada, las señales de referencia ocupan posiciones específicas dentro de la rejilla tiempo-frecuencia. El patrón de mapeo depende de factores como el valor del PCI, el puerto de antena, prefijo cíclico y configuraciones especiales. *[1]*

En configuraciones multicelda, puede ocurrir que dos o más celdas transmitan señales de referencia en los mismos elementos de recurso, produciendo un solapamiento físico en la rejilla. Este escenario puede presentarse incluso cuando los PCI son diferentes, pero comparten determinadas relaciones estructurales. En estos casos, aunque las secuencias no sean idénticas, ambas señales compiten por el mismo recurso físico.

Las consecuencias incluyen iinterferencia directa sobre las señales de referencia, incremento en el error de estimación del canal, deterioro de los indicadores CQI, PMI y RI, pérdida de eficiencia en configuraciones MIMO y reducción del rendimiento espectral. *[9]*

A diferencia de la colisión por identidad de secuencia, este fenómeno se origina en el diseño del patrón de mapeo dentro de la rejilla y puede mitigarse mediante una adecuada planificación de PCI y configuración de señales de referencia.

4.5. Inteligencia de Negocios y Modelos de Visualización de Datos

4.5.1 Concepto de modelo automatizado

Un modelo automatizado puede definirse como una estructura lógica y funcional diseñada para procesar datos de manera sistemática, aplicando reglas, criterios o algoritmos previamente definidos, con mínima intervención manual. Su finalidad es garantizar consistencia, repetibilidad y eficiencia en el análisis de información. La figura 13 muestra las fases necesarias para el desarrollo de modelos automatizados:

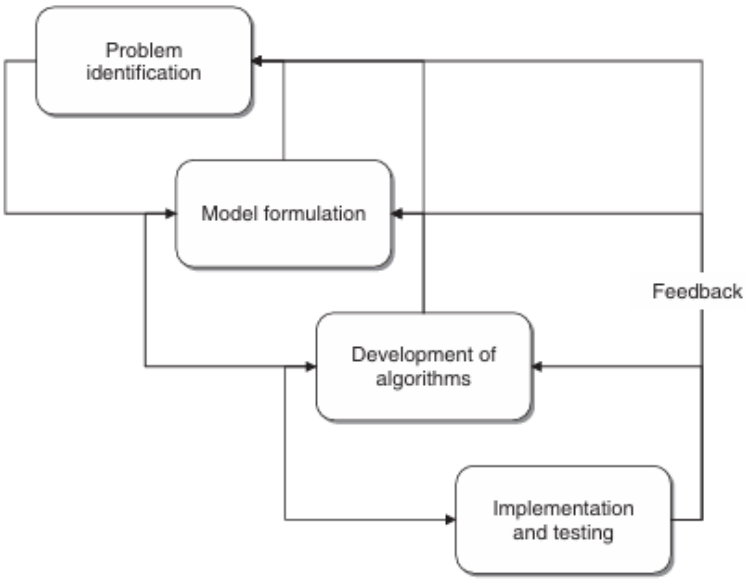


Figura 12, *Fases en el desarrollo de modelos para la toma de decisiones. [11]*

En ingeniería de telecomunicaciones, un modelo automatizado puede integrar bases de datos técnicas, aplicar validaciones de coherencia, ejecutar cálculos estructurados y generar resultados que permitan detectar condiciones específicas, como conflictos de configuración o inconsistencias en parámetros de red.

La automatización aporta ventajas significativas tales como la reducción de errores humanos en el procesamiento de datos, disminución del tiempo de análisis, capacidad de manejar grandes volúmenes de información y la estandarización de

criterios técnicos. De esta manera, el modelo deja de depender exclusivamente de análisis manuales y se convierte en una herramienta sistemática de apoyo a la gestión técnica.

4.5.2 Visualización de datos

La visualización de datos es el proceso de representar información mediante gráficos, diagramas, tablas dinámicas, mapas y otros recursos visuales que facilitan su interpretación. En el ámbito de las telecomunicaciones, la visualización permite comprender el comportamiento espacial, temporal y estructural de una red. *[11]*



Figura 13, *Ejemplo de Dashboard para visualización de datos. [10]*

Dado que las redes LTE involucran múltiples dimensiones como frecuencia, tiempo, cobertura geográfica, parámetros físicos y relaciones entre celdas, la representación visual se convierte en un elemento esencial para identificar patrones de reutilización de identificadores, distribución geográfica de celdas, relación entre vecinos, condiciones de interferencia potencial y anomalías en configuraciones técnicas.

Una adecuada visualización no solo mejora la comprensión de los datos, sino que también facilita la toma de decisiones técnicas fundamentadas, especialmente en procesos de planificación y optimización de red.

4.5.3 Power BI como herramienta de análisis

Power BI es una plataforma de análisis y visualización de datos desarrollada por Microsoft, diseñada para transformar datos provenientes de múltiples fuentes en informes interactivos y paneles dinámicos. La herramienta permite realizar procesos de modelado de datos, transformación, limpieza, creación de métricas personalizadas y generación de visualizaciones interactivas.

Entre sus principales características se encuentran la integración con diversas fuentes de datos estructurados, el modelado relacional entre tablas, la creación de indicadores mediante lenguaje DAX, el desarrollo de paneles interactivos con filtros dinámicos y la actualización automática de información. *[10]*

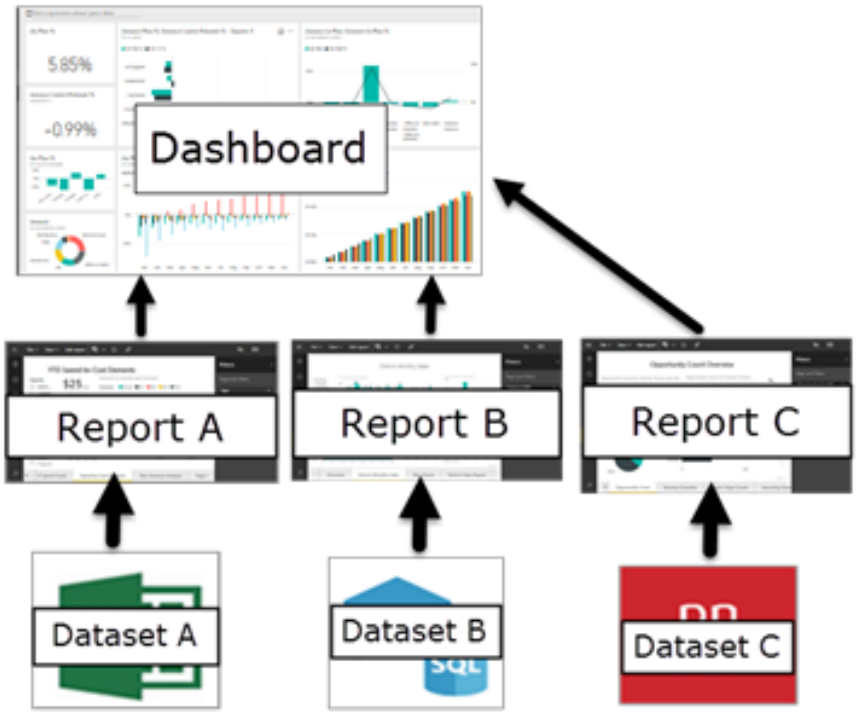


Figura 14, *Integración de varias fuentes de datos en Power BI. [10]*

En el ámbito de la ingeniería de telecomunicaciones, Power BI puede utilizarse para estructurar datos técnicos de red, aplicar reglas de validación y representar visualmente resultados asociados a configuraciones, relaciones entre celdas o posibles conflictos estructurales.

La incorporación de una herramienta de análisis como Power BI dentro de un enfoque metodológico automatizado permite consolidar datos técnicos complejos en entornos visuales interactivos, facilitando el análisis integral de la red y el soporte a la toma de decisiones basadas en evidencia.

V. METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología corresponde a un enfoque cuantitativo, con alcance descriptivo-correlacional y un diseño no experimental de tipo transversal, orientado al desarrollo de un modelo automatizado en Power BI para la detección de conflictos de PCI y colisiones de RS en una red LTE del municipio de Masatepe.

Para la recolección de datos se utilizan instrumentos primarios como contadores de rendimiento, dumps de configuración de celdas del gestor ENM y parámetros físicos obtenidos en auditorías del sistema radiante. Estos insumos aportan información directa sobre el desempeño y la infraestructura de la red, asegurando la validez de los datos empleados en el modelo.

El desarrollo metodológico se estructura en tres etapas principales, cada una vinculada a un objetivo específico del proyecto.

5.1 Etapa I

En esta etapa se realiza un análisis técnico orientado a identificar las causas que originan conflictos de PCI y colisiones de RS en redes LTE. El análisis se basa en la revisión de las normas 3GPP y en literatura especializada relacionada con la planificación y optimización de redes LTE. A partir de esta revisión se establecen los criterios técnicos que sirven como base para el diseño del modelo automatizado de detección.

5.2 Etapa II

En la segunda etapa se efectúa la caracterización técnica de la red LTE del municipio de Masatepe. La información recopilada mediante auditorías del sistema radiante, parámetros de configuración y documentación técnica se utiliza para identificar los sitios y sectores LTE presentes en el área de estudio.

Con apoyo de la herramienta de análisis geoespacial QGIS y el software de predicción radioeléctrica ASSET Radio, se representa espacialmente la red y se analiza la cobertura LTE, identificando la distribución geográfica de los PCI, zonas de superposición y posibles escenarios de riesgo asociados a conflictos de señales de referencia.

5.3 Etapa III

En esta etapa se diseñará un modelo automatizado en Power BI para la detección de conflictos de PCI y colisiones de RS. La información será procesada en Power Query mediante depuración, normalización y combinación de datos, construyendo una tabla base con los atributos necesarios.

Se implementarán funciones personalizadas en Power Query para el cálculo de distancias y la intersección geométrica de líneas. Estas permitirán la detección de condiciones de reutilización de PCI, coincidencia de patrones de RS y casos de sobrepropagación. Los resultados se presentarán en objetos visuales interactivos de Power BI, lo que facilitará el análisis de los conflictos.

Posteriormente, se aplicarán pruebas de estrés al modelo para evaluar su eficiencia y capacidad de procesamiento ante grandes volúmenes de datos, asegurando su escalabilidad y utilidad práctica en escenarios de planificación LTE

Finalmente, se aplicarán acciones de mitigación en los sectores con colisiones CRS detectadas por el modelo y se utilizará la herramienta VIAVI Nitro Geo como fuente secundaria de información, destinada a recopilar parámetros reportados por los equipos de usuario y contrastar tendencias de desempeño en indicadores LTE (CQI, Throughput, RSRP y RSRQ).

VI. DESARROLLO DEL PROYECTO

6.1 Análisis de las causas técnicas asociadas a conflictos PCI y colisión de RS en redes LTE

El PCI constituye un elemento fundamental en la operación de redes LTE, ya que permite la identificación de celdas por parte de los UE y participa en la generación de diversas señales de sincronización y referencia utilizadas durante los procesos de acceso y estimación de canal. El análisis técnico realizado permitió identificar que estos conflictos pueden originarse a partir de tres grupos principales de causas:

Tabla 5, Clasificación de causas de conflictos PCI y RS.

Categoría	**Descripción**	**Naturaleza**
Limitaciones intrínsecas del estándar LTE	Restricciones inherentes al diseño del sistema	Estructural / Invariable
Factores asociados a la planificación de red	Decisiones y procesos durante el diseño e implementación	Operacional / Variable
Factores físicos y de propagación radioeléctrica	Comportamiento real de las señales en el entorno	Ambiental / Dinámico

6.1.1 Limitaciones intrínsecas del PCI

El estándar LTE define únicamente 504 valores de PCI, lo que en escenarios de alta densidad de celdas o sitios con múltiples sectores reduce la distancia mínima de reutilización y favorece la aparición de conflictos y colisiones de RS. En redes con muchas estaciones base o con sectorización intensiva, la reutilización de identificadores físicos ocurre a distancias cortas, incrementando la probabilidad de interferencia. Además, el PCI está directamente ligado a señales de sincronización y referencia de la capa física, lo que introduce restricciones adicionales en la planificación de red debido a la disponibilidad limitada de secuencias y patrones en la rejilla de recursos (ver Tabla 6).

Tabla 6, Dependencia entre PCI y señales físicas LTE.

Señal LTE	**Relación con el PCI**	**Limitación técnica**
PSS	Solo existen 3 secuencias Zadoff-Chu posibles	Limita la diversidad de identificación primaria entre celdas.
CRS	El desplazamiento en frecuencia se determina mediante $v_{\text{shift}} = PCI \bmod 6$	Existen únicamente 6 patrones de posicionamiento.
PRS	También depende de $v_{\text{shift}} = PCI \bmod 6$	Solo existen 6 patrones posibles.
CSI-RS	Dependencia del fabricante y ciertos esquemas de Massive MIMO depende de $PCI \bmod 3$	Se limitan a 3 patrones de reutilización.
DMRS / SRS (UL)	La secuencia base depende de $f_{ss} = PCI \bmod 30$	Solo existen 30 secuencias base.

En configuraciones MIMO 2x2 y 4x4, el comportamiento de las señales CRS introduce restricciones adicionales. Aunque el desplazamiento en frecuencia se determina por $PCI \bmod 6$, los patrones de los puertos de antena 0–1 y 2–3 coinciden cada tres valores de PCI, reduciendo a tres los patrones diferenciables cuando se busca evitar solapamiento entre puertos de antena.

Tabla 7, Relación entre residuos del PCI y patrones de RS.

Residuo PCI	**Señales asociadas**	**Implicación técnica**
PCI mod 3	CRS (2x2 y 4x4), CSI-RS	Determina 3 patrones de reutilización.
PCI mod 6	CRS (1x1), PRS	Define 6 patrones de posicionamiento.
PCI mod 30	DMRS, SRS	Define 30 grupos de secuencias base.

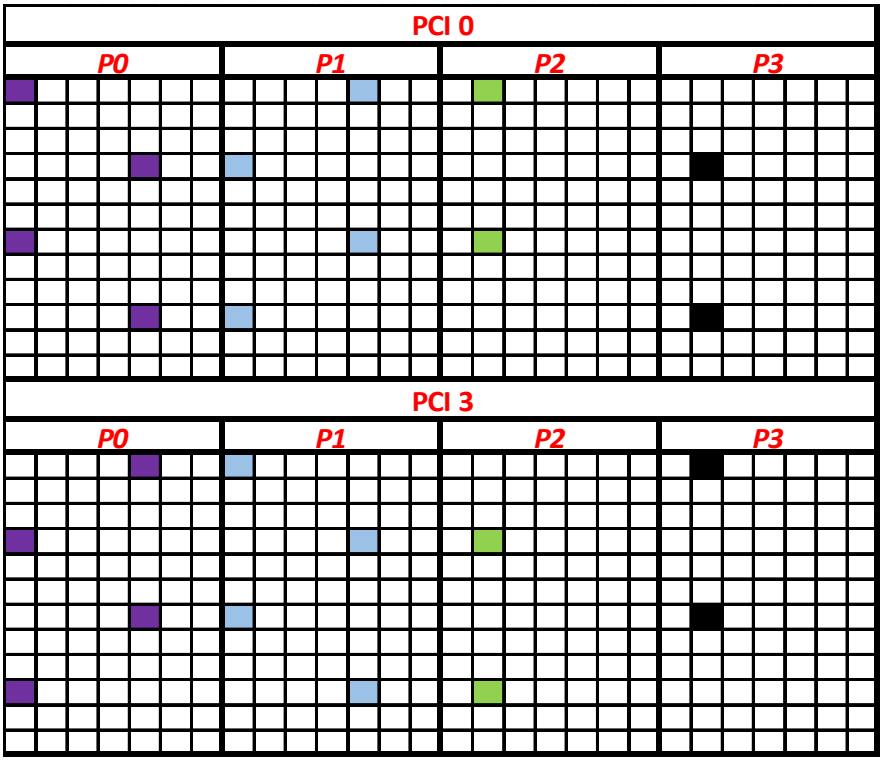


Figura 15, *Posición de CRS en Antena de 4 Puertos para PCI 0 y 3.*

6.1.2 Factores asociados a la operatividad y planificación de la red

Los conflictos de PCI y RS en redes LTE también se originan en factores asociados a la planificación y operación de la red. Las estrategias de densificación y capacidad, como la incorporación de sectores adicionales, portadoras o soluciones DAS y femtoceldas, reducen la distancia de reutilización y generan superposición de cobertura que incrementa la interferencia. A ello se suman las restricciones técnicas y de recursos, derivadas de limitaciones de software, tiempos de simulación insuficientes y escasez de personal especializado, que afectan directamente la supervisión y el recibimiento de instalaciones o proyectos, impidiendo predecir adecuadamente las zonas de conflicto y retrasando la aceptación de los sitios.

Los permisos y trámites legales, junto con la disponibilidad de sitios e infraestructura, condicionan el despliegue de estaciones base, obligando en ocasiones a cambios forzados del diseño inicial o a instalaciones en posiciones subóptimas que

modifican el patrón de cobertura y generan solapamientos. La ausencia de optimización post-despliegue perpetúa la invasión de zonas de cobertura y la interferencia, mientras que las deficiencias en infraestructura física, como errores en soportes o ubicación de hardware, limitan el ajuste de parámetros críticos como azimut y tilt, impidiendo la corrección de conflictos detectados. En la tabla 8 se sintetizan los principales factores de planificación y operación que generan conflictos de PC y RS, junto con sus consecuencias más relevantes.

Tabla 8, Factores asociados a la operatividad y planificación de la red.

Factor	**Descripción**	**Consecuencia**
Estrategias de densificación y capacidad	Implementación de más sectores, portadoras, DAS, femtoceldas y microceldas para cubrir alta demanda o atender usuarios VIP.	Menor distancia de reutilización, superposición de cobertura y mayor interferencia.
Restricciones técnicas y de recursos	Limitaciones de software, tiempos de simulación insuficientes y recursos técnicos reducidos que afectan la supervisión y el recibimiento de instalaciones o proyectos.	No se predicen adecuadamente las zonas de conflicto o no se detectan las suficientes; retrasos en la supervisión y aceptación de proyectos.
Permisos y trámites legales	Demoras en autorizaciones municipales, estatales o acuerdos con arrendatarios.	Cambios forzados en el diseño inicial; al implementarse el sitio puede entrar en conflicto con otra celda de lanzamiento reciente.
Disponibilidad de sitios e infraestructura	Condicionada por terrenos, acceso a energía y viabilidad de instalación de torres.	Instalación en posiciones subóptimas que modifican el patrón de cobertura y generan solapamiento.
Optimización post-despliegue	Falta de seguimiento y ajustes posteriores tras la implementación del sitio.	Invasión de otras zonas de cobertura, persistencia de interferencias y degradación del servicio.
Deficiencias en infraestructura física	Errores en soportes o ubicación de hardware que impiden el libre movimiento de antenas para ajustar azimut o tilt.	No permite optimizar el sitio para corregir conflictos detectados.

6.1.3 Factores físicos y de propagación radioeléctrica

Los conflictos PCI/RS también se originan en factores físicos y de propagación, vinculados al comportamiento real de la señal y las condiciones del entorno. La ubicación de sitios, especialmente en zonas altas como montañas o colinas, puede provocar que estaciones en posiciones elevadas invadan la cobertura de sectores más bajos. La potencia de transmisión, cuando se configura en niveles elevados, amplía la cobertura más allá de lo previsto y favorece la interacción con celdas lejanas. La altura estructural de las antenas, particularmente en torres superiores a 40 metros, facilita una propagación extensa y difícil de contener, generando interferencias persistentes. Finalmente, los ajustes de tilt eléctrico y mecánico, si son incorrectos, provocan superposición de cobertura con celdas vecinas.

Como consecuencia de estos factores, se produce la sobrepropagación de señal, que extiende la cobertura hacia áreas no previstas y constituye el principal problema derivado de las condiciones físicas, al generar solapamientos e interferencias entre celdas.

Tabla 9, Factores Físicos y de Propagación Radioeléctrica.

Factor	**Descripción**	**Consecuencia**
Condiciones de ubicación de sitios	Instalación en zonas altas como montañas o colinas y diferencias de altura entre poblaciones.	Sitios elevados invaden sectores más bajos y generan interferencia difícil de contener.
Potencia de transmisión	Configuración elevada de potencia en estaciones base.	Cobertura extensa que favorece la interacción con celdas lejanas y conflictos PCI y RS.
Altura estructural de antenas	Instalación en torres, postes o azoteas con alturas superiores a 40 metros.	Propagación amplia que invade sectores más bajos y genera interferencia persistente.
Ajustes de tilt eléctrico y mecánico	Control vertical del haz de radiación, errores en la configuración.	Superposición de cobertura que favorece conflictos PCI y RS.

6.1.4 Criterios técnicos para la detección de conflictos PCI y colisiones de RS

A partir del análisis de las limitaciones intrínsecas del estándar LTE, de los escenarios de planificación y de los factores físicos asociados a la propagación de radiofrecuencia, fue posible definir criterios objetivos que pueden ser utilizados posteriormente como base para el desarrollo de herramientas de análisis automatizado orientadas a la detección temprana de dichos problemas en la red.

Estos criterios se basan principalmente en la relación espacial entre celdas, la reutilización de identificadores y la coincidencia de residuos modulares del PCI asociados a las señales de referencia. Estos se sintetizan en la tabla 10.

Tabla 10, Criterios técnicos para la detección de conflictos PCI y colisión RS.

Criterio técnico	**Parámetro evaluado**	**Descripción del análisis**	**Relación con conflictos PCI o colisión de RS**
Reutilización de PCI	Valor de PCI	Identificación de celdas que comparten el mismo valor de PCI dentro de una distancia inferior a la distancia mínima de reutilización planificada.	Puede generar conflictos de PCI y ambigüedad en procesos de medición y movilidad.
Coincidencia de residuos PCI mod 3	PCI mod 3	Evaluación de coincidencias entre celdas que comparten el mismo residuo en PCI mod 3, asociado a los patrones de CRS en configuraciones MIMO 2x2 y 4x4.	Puede provocar colisiones de CRS en el enlace descendente cuando existe superposición de cobertura.
Coincidencia de residuos PCI mod 6	PCI mod 6	Identificación de celdas con el mismo residuo en PCI mod 6, asociado a patrones de referencia como CRS en 1x1, PRS y otras señales dependientes del desplazamiento en frecuencia.	Incrementa el riesgo de interferencia estructural entre señales de referencia en celdas cercanas.

Criterio técnico	Parámetro evaluado	Descripción del análisis	Relación con conflictos PCI o colisión de RS
Coincidencia de residuos PCI mod 30	PCI mod 30	Evaluación de coincidencias en el grupo de secuencia base utilizado para DMRS y SRS en el enlace ascendente.	Puede provocar interferencia entre señales de referencia uplink cuando las celdas comparten cobertura.
Distancia entre celdas	Coordenadas geográficas	Cálculo de la distancia entre sitios o sectores para evaluar el cumplimiento de la distancia mínima de reutilización del PCI.	Distancias reducidas incrementan la probabilidad de interacción entre celdas con PCI iguales o patrones equivalentes.
Orientación de sectores	Azimut de antena	Análisis de la dirección de transmisión del sector para determinar si dos celdas apuntan hacia una misma zona geográfica.	Sectores orientados hacia la misma zona pueden generar superposición de cobertura y aumentar la probabilidad de colisión de RS.
Proyección geométrica de cobertura	Azimut y apertura del sector	Generación de líneas de proyección que representan la dirección de cobertura del sector considerando la apertura horizontal.	Permite identificar posibles intersecciones entre áreas de cobertura de celdas vecinas.
Alcance estimado de cobertura	Timing Advance	Estimación del radio efectivo de cobertura a partir de registros de Timing Advance reportados por los usuarios.	Permite identificar solapamientos reales de cobertura entre celdas que comparten patrones de referencia.
Identificación de sobrepropagación	Comparación entre alcance estimado y orientación de sectores vecinos	Evaluación de casos donde el alcance de una celda supera significativamente el área esperada.	Puede provocar interferencia con celdas distantes que reutilizan el mismo PCI o residuos equivalentes.

6.2 Red LTE de Masatepe

Durante esta etapa se caracterizó la red LTE del municipio de Masatepe basado en datos de las ultimas auditorías realizadas a las BTS, parámetros configurados en gestor ENM de Ericsson y hojas de datos de antenas. Finalmente se representó la red en un mapa con QGIS para identificar zonas de riesgo de conflictos PCI.

6.2.1 Generalidades del Municipio de Masatepe

El municipio de Masatepe forma parte del departamento de Masaya, este limita al norte con los municipios de La Concepción y Nindirí, al sur con El Rosario, al este con la Laguna de Masaya, Niquinohomo y Nandasmo, al oeste con La Concepción, San Marcos y Jinotepe. Según datos oficiales del MINSA, el municipio Masatepe cuenta con una población estimada para el año 2024 de 42,963 habitantes, con una densidad poblacional de 723 habitantes por Km^2. Según el mapa DPA de INETER del año 2020, el municipio de Masatepe está conformado por 34 comunidades y una extensión territorial de 59.66 km².

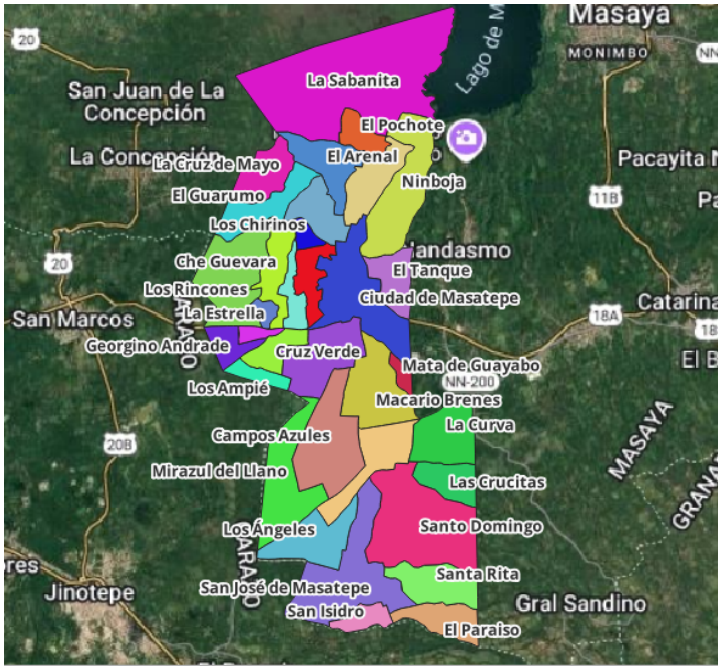


Figura 16, *Distribución Política Administrativa de Masatepe.*

6.2.2 Sitios Desplegados

Dentro de la extensión territorial del municipio de Masatepe, actualmente se tienen 7 ENodeB desplegados y operando. Para efectos prácticos de este proyecto, se consideraron otros 11 ENodeB pertenecientes a municipios vecinos y que al menos uno de sus sectores brinda cobertura al municipio de Masatepe. A continuación, se comparte la lista total de los ENodeB considerados en este proyecto:

Tabla 11, Sitios que brindan cobertura al municipio de Masatepe.

Id Sitio	Sectores	Tipo	Departamento	Municipio
MAS-000030	3	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000035	4	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000045	3	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000049	3	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000066	5	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000074	3	Macrocelda	Masaya	Masatepe
MAS-000094	1	Microcelda	Masaya	Masatepe
MAS-000046	3	Macrocelda	Masaya	Niquinohomo
MAS-000047	3	Macrocelda	Masaya	Niquinohomo
CAR-000030	6	Macrocelda	Carazo	San Marcos
CAR-000045	3	Macrocelda	Carazo	San Marcos
MAS-000019	3	Macrocelda	Masaya	Nandasmo
MAS-000033	3	Macrocelda	Masaya	Nandasmo
MAS-000076	1	Microcelda	Masaya	Nandasmo
CAR-000017	7	Macrocelda	Masaya	La Concepción
CAR-000052	3	Macrocelda	Carazo	Jinotepe
CAR-000022	6	Macrocelda	Carazo	El Rosario
CAR-000021	6	Macrocelda	Carazo	La Paz Carazo

Ciudad de Masatepe, es la comunidad que presenta la mayor población del municipio. Por tal razón, dispone de 4 ENodeB con un total de 12 de sectores para cubrir la población.

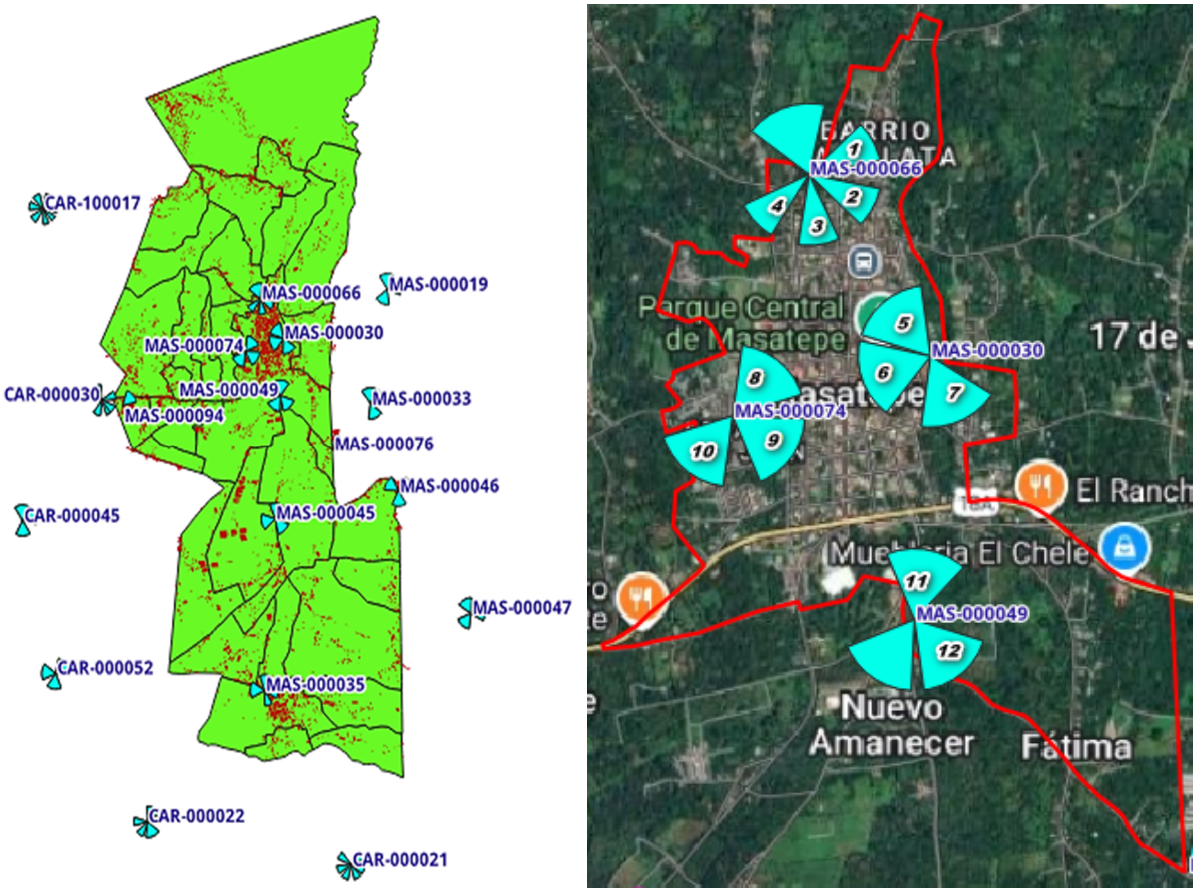


Figura 17, *Red LTE Municipio de Masatepe y Ciudad de Masatepe.*

6.2.3 Sistema Radiante

Se revisaron las últimas auditorías realizadas a los sitios, donde se obtuvieron los parámetros físicos del sistema radiante como latitud, longitud, azimut, tilt, altura y modelos de antenas. El hardware de la red corresponde principalmente a la marca Ericsson. En cuanto a radios, se identificaron los modelos RRU 2217 B2 para configuraciones 2x2 y RRU 4499 B2/B4 para configuraciones 4x4.

Respecto a las antenas, se destacan los modelos KRD 901 892/11, que soporta hasta tres sectores digitales, KRE 101 2405/1, que soporta dos beams, y KRE 101 2452/1, con un beam. Las antenas KRD 901 892/11 y KRE 101 2405/1 tienen como objetivo distribuir a los usuarios de una misma área de cobertura entre dos o más haces, lo que multiplica los recursos disponibles, ya que por cada beam se utiliza un

radio 2x2 o 4x4 según los puertos soportados. Los ENodeB que disponen de estos modelos de antenas asignan un PCI diferente por cada beam, garantizando una mejor distribución de los recursos y reduciendo la probabilidad de conflictos en la red.

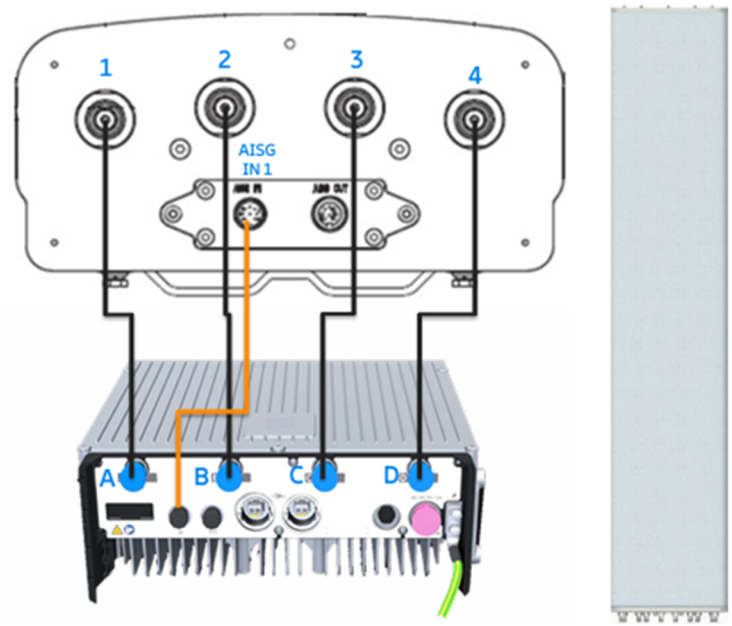


Figura 18, *Antena KRE 101 2452/1 y Radio 4499 B2/B4. [8]*

6.2.4 Distribución de PCI

Con apoyo del gestor ENM de Ericsson, se descargó la tabla Eutrancell, la cual contiene los atributos configurados a las celdas de la red LTE tales como PCI, cellid, TAC, etc. Posteriormente, con la herramienta QGIS se realizó una unión por atributo entre la tabla Eutrancell y las auditorías de los nodos. Esto permitió representar la distribución de PCI en la zona del Municipio de Masatepe. Para un total de 66 sectores, no se observa redundancia de PCI.

Para representar los valores posibles de $PCI \, mod \, 3$, se asignó el color azúl para un resultado 0, rojo para un resultado 1 y amarillo para un resultado 2. Luego de observar geospacialmente la distribución de sectores y basado en la orientación de cada sector, se encontraron 32 sectores con riesgo de interferencias de CRS.

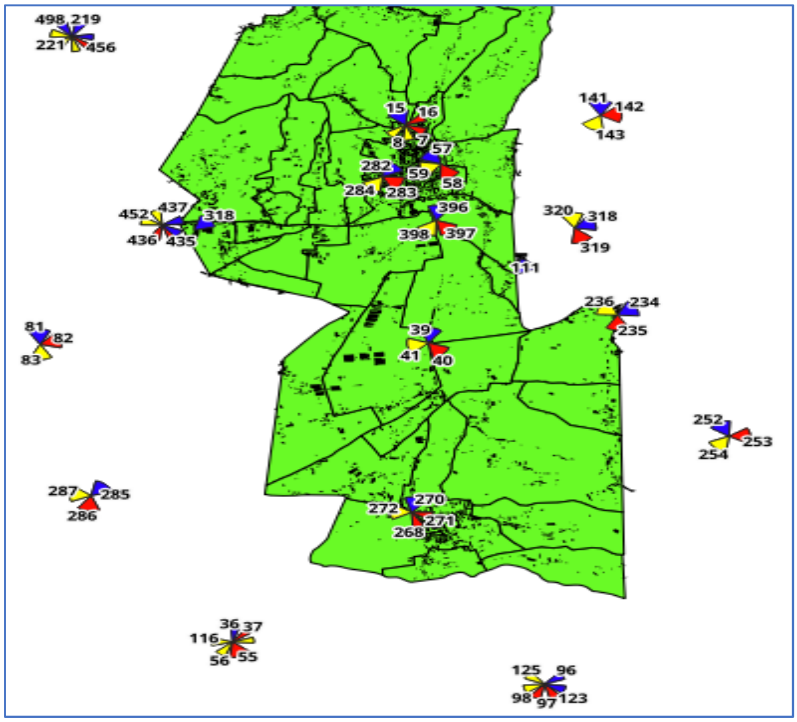


Figura 19, *Distribución de PCI en la red LTE de Masatepe.*

Ciudad de Masatepe presenta 7 relaciones de vecinas con mismo resultado de $PCI \bmod 3$. Dado que es la zona de mayor carga de usuarios, la mitigación del efecto de las colisiones CRS es más crítico.

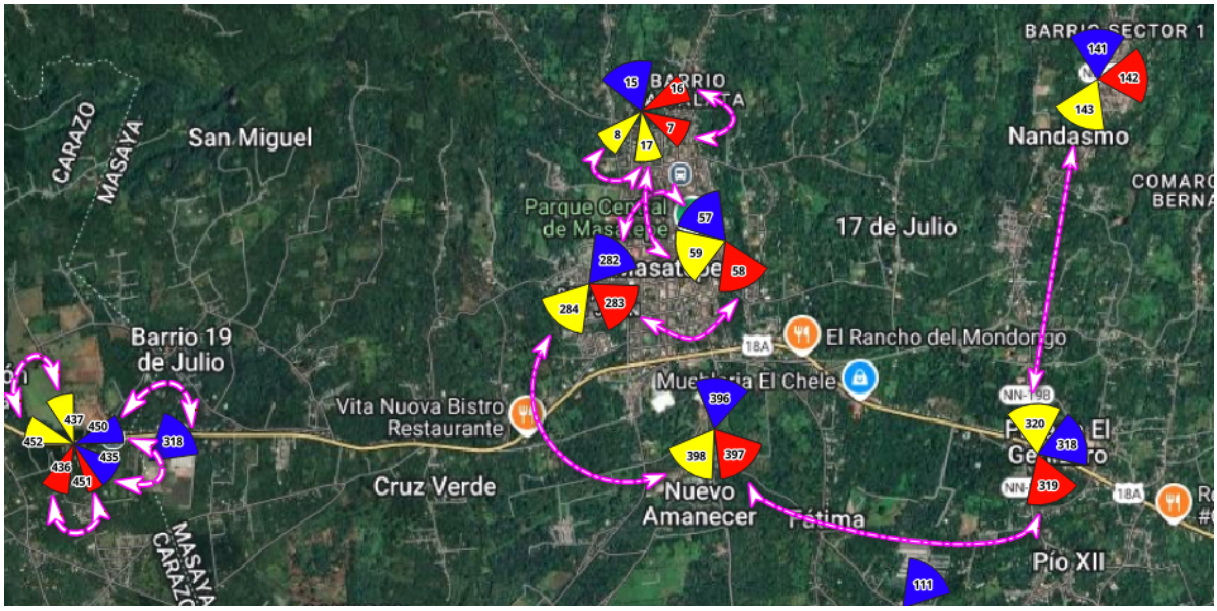


Figura 20, *Conflictos de CRS PCI mod 3 en Ciudad de Masatepe.*

6.2.5 Cobertura LTE

Se generó un plot de cobertura representativo de la señal LTE en el municipio de Masatepe mediante el software de predicción ASSET Radio. Posteriormente con la herramienta Análisis de Superposición disponible en el software QGIS, se estimó que, la ciudad de Masatepe presenta un 44.08% de territorio cubierto con niveles de RSRP entre 0 a -105dBm.

El porcentaje estimado se observa muy bajo, pero tomando en cuenta la geografía característica del municipio y distribución espacial de la población, el resultado se encuentra dentro lo intuitivamente esperado.

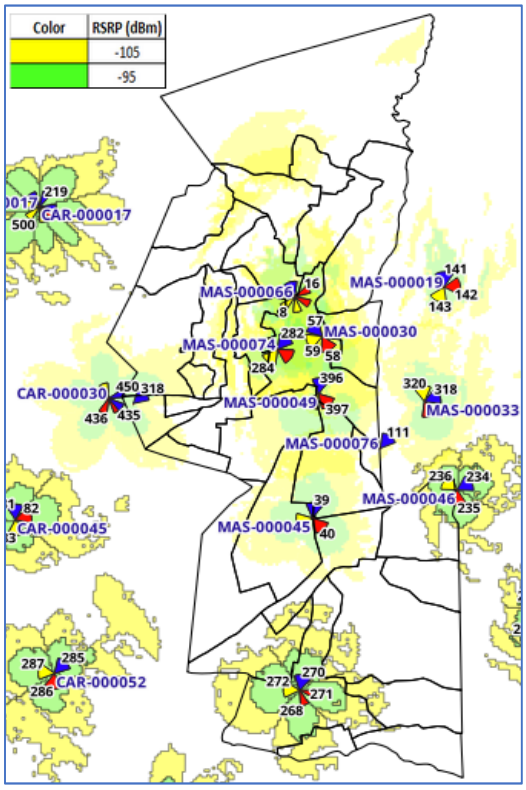


Figura 21, *Cobertura LTE municipio de Masatepe a corte de -105dBm RSRP.*

Desde el punto de vista de las comunidades, se observa que Ciudad de Masatepe, zona de mayor concentración poblacional del municipio, cuenta con un territorio cubierto de 97.1% con niveles RSRP entre 0 y -105 dBm.

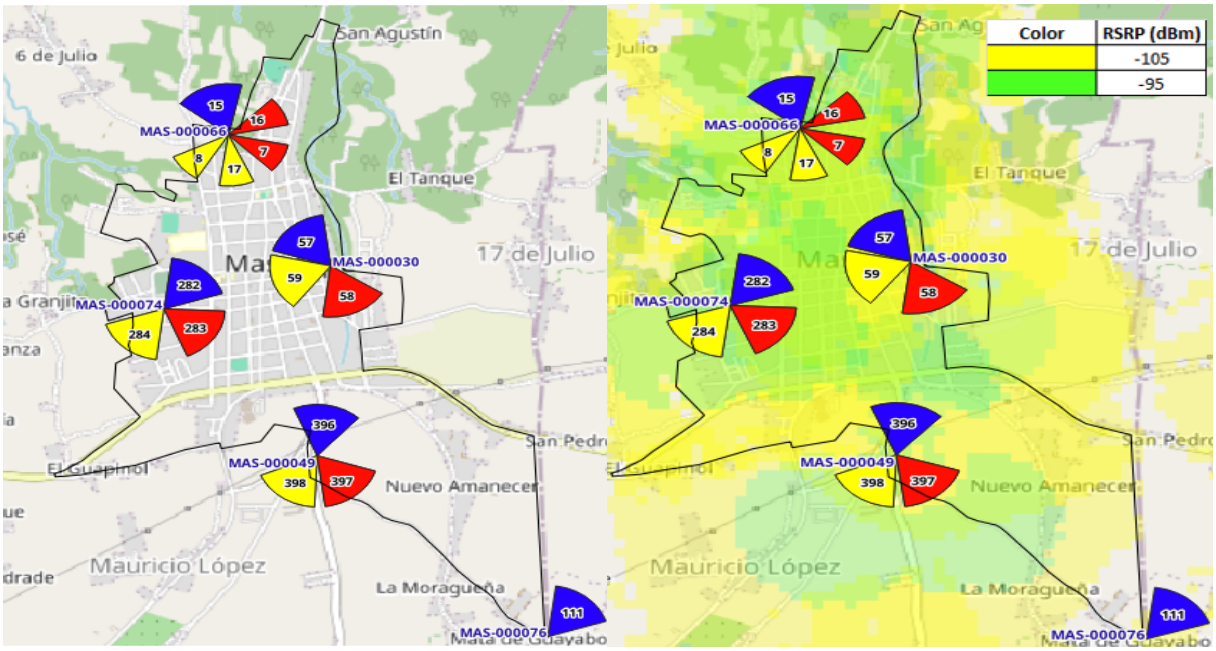


Figura 22, *Cobertura LTE Ciudad de Masatepe a corte de -105dBm RSRP.*

Al delimitar las coberturas de cada sector, y sin limitar el corte del plot a -105 dBm de RSRP y ampliarlo a -115 y -120, se pueden observar zonas de superposición donde al menos dos sectores coinciden en mismo resultado $PCI \ mod \ 3$.

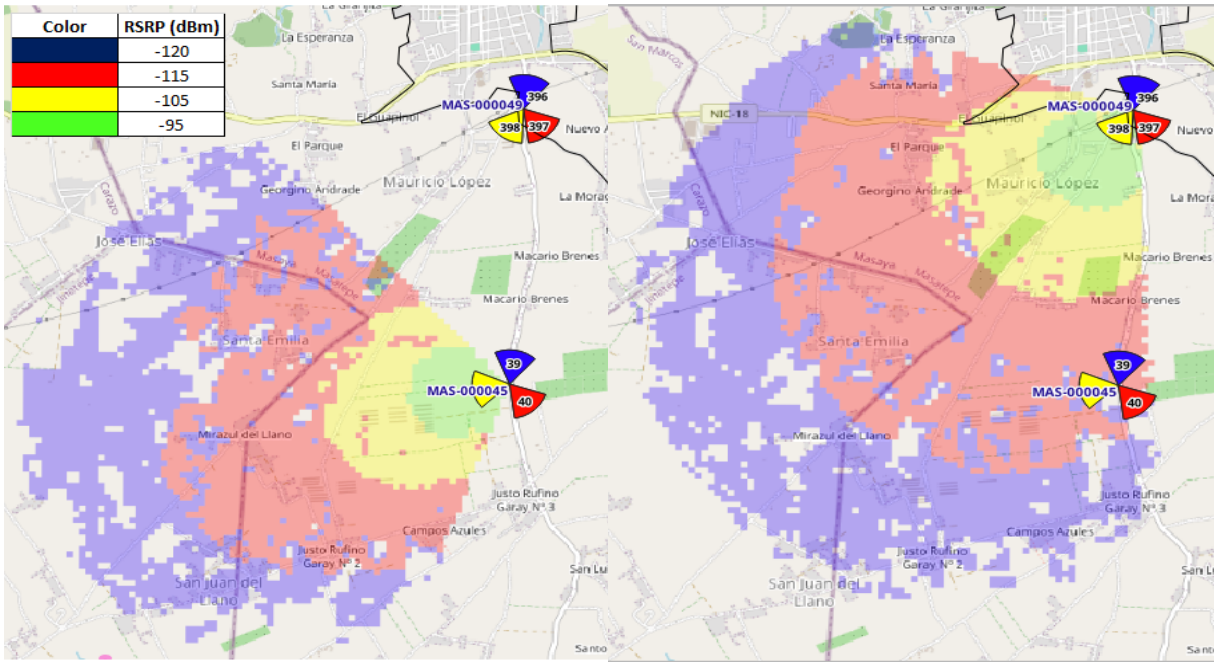


Figura 23, *Superposición de cobertura entre MAS-000049 y MAS-000045.*

También se observó que el sector 1 del sitio CAR-000052 presenta la mayor sobrepropagación de cobertura en la red LTE de Masatepe.

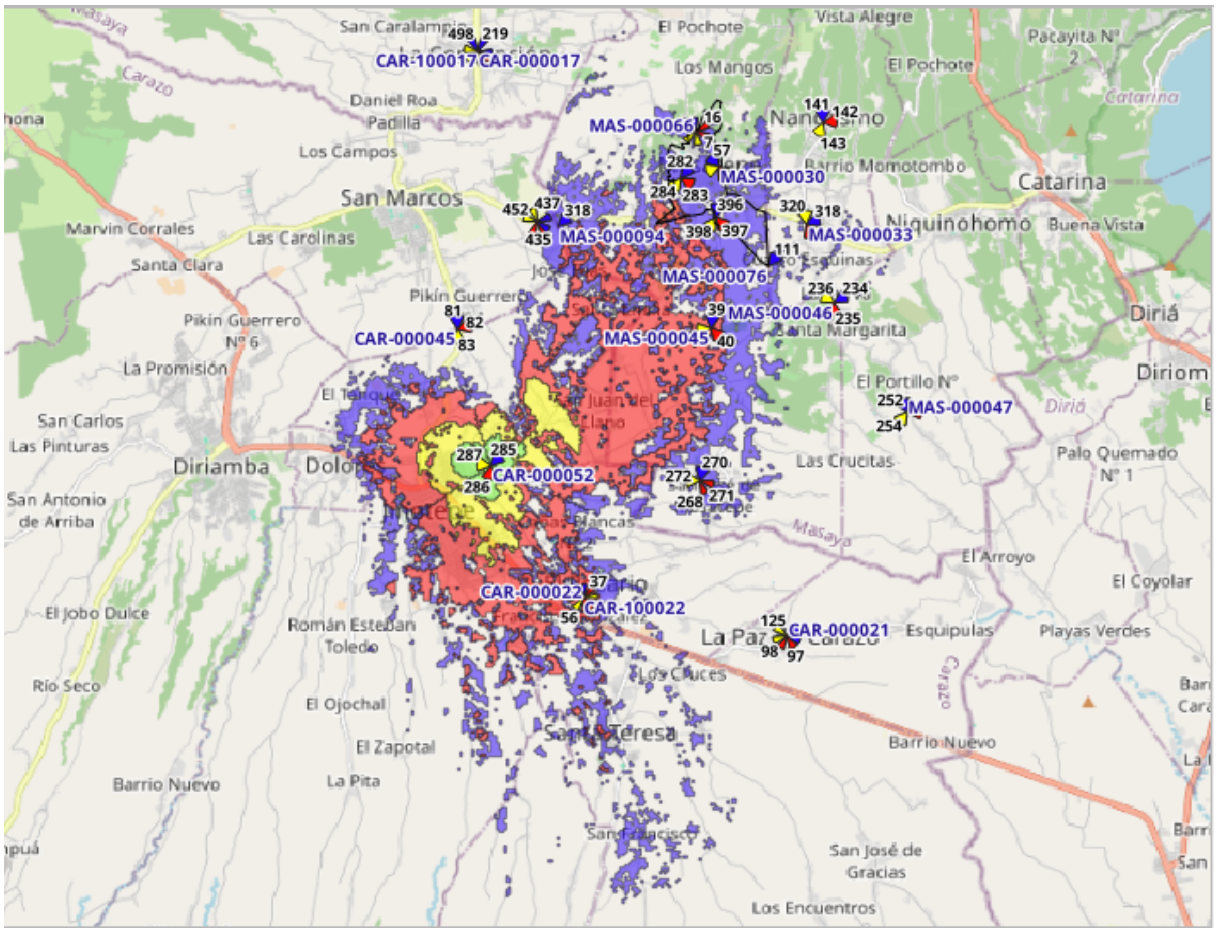


Figura 24, *Plot de cobertura sitio CAR-000052 con sobrepropagación.*

Usualmente para los casos expuestos anteriormente, los ingenieros de radiofrecuencia implementan medidas para limitar la cobertura de los sectores a través del incremento de tilt eléctrico o mecánico y la reorientación de antenas. Sin embargo, también se considera el efecto en la movilidad, el balanceo de carga para zonas de alto tráfico y presencia de clientes de alta facturación para los proveedores.

6.3 Diseño del modelo automatizado en Power Bi

Para el diseño del modelo en Power Bi se integraron diversas fuentes de información técnica de la red, las cuales fueron depuradas y transformadas mediante Power Query. El modelo combina parámetros de configuración de celdas, características del sistema radiante y registros de distribución de usuarios con el objetivo de representar geográficamente los sectores e identificar posibles interacciones que generen conflictos de PCI o colisiones de RS.

6.3.1 Fuentes de Datos

El modelo utiliza cinco fuentes de información técnica provenientes de registros de infraestructura, parámetros de configuración de red y contadores de desempeño. Estos se resumen en la tabla 9.

Tabla 12, Fuentes de datos utilizadas en el modelo de Power BI.

Fuente de datos	**Formato**	**Origen**	**Información principal**	**Uso en el modelo**
Inspección de Sistema Radiante	Excel (.xlsx)	Registro técnico de infraestructura	Coordenadas geográficas, azimut, altura, modelo de antena y configuración de tilt	Determinar ubicación y orientación de los sectores
EutrancellFDD	CSV	Gestor de red Ericsson ENM	Parámetros de configuración LTE incluyendo PCI	Identificación de PCI asignados a cada celda
Nomenclatura de Red	Tabla técnica	Documentación de planificación	Relación entre CellId, tipo de haz y sector virtual	Determinación del sector de cobertura
Modelo de Antenas	Tabla técnica	Hojas de datos del fabricante	Beamwidth y desplazamiento interno de azimut	Normalización de orientación del haz
UE Distribution	Excel (.xlsx)	Contadores de desempeño Ericsson	Histograma de distribución de Timing Advance de usuarios	Estimación del alcance de cobertura de las celdas

A partir de estas fuentes de información se realizó un proceso de depuración, normalización y combinación de datos mediante Power Query, con el objetivo de construir una tabla integrada denominada Tabla Base, utilizada como insumo principal del modelo.

6.3.2 Construcción de la Tabla Base

La Tabla Base se generó a partir de la integración de las diferentes fuentes de datos mediante procesos de transformación en Power Query, incluyendo combinación de consultas, eliminación de columnas innecesarias, creación de columnas personalizadas y agrupación de registros.



Figura 25, *Transformaciones de la Tabla Base.*

Durante este proceso se realizaron transformaciones como la normalización del azimut de los sectores según el modelo de antena y el desplazamiento interno del haz, la Identificación del sector de cobertura a partir de la nomenclatura de red, la estimación del alcance de cobertura mediante el análisis del histograma del contador pmTaInit2Distr, calculando la distancia máxima a la cual se acumula aproximadamente el 85 % de las conexiones iniciales de usuarios y por último la integración de los parámetros de configuración de las celdas LTE, incluyendo el PCI.

La tabla resultante contiene la información necesaria para la representación geográfica de los sectores y la detección de conflictos de PCI y colisión de RS.

Tabla 13, Formato de Tabla Base del Modelo en Power Bi.

SITE ID	SECTOR ID	LATITUDE	LONGITUDE	AZIMUTH	HBW	PCI	PCT_UE_ACUM	DIST_MAX_KM
CAR-000017	CAR-000017_S1	11.938194	-86.189556	332	33	498	0.961689734	0.63
CAR-000017	CAR-000017_S7	11.938194	-86.189556	130	20	457	0.954573186	1.01
CAR-000017	CAR-000017_S12	11.938194	-86.189556	168	22	458	0.973267102	1.01

6.3.3 Parámetros

Se crearon dos parámetros dinámicos denominado Distancia_Reuso y Analisis_RS. El parámetro Distancia_Reuso permite al usuario establecer la distancia máxima para la reutilización de valores PCI, mientras que Analisis_RS permite seleccionar el tipo de coincidencia de residuos de PCI que se desea analizar, considerando los valores PCI mod 3, PCI mod 6 y PCI mod 30.



Figura 26, *Parámetros del Modelo Power Bi.*

6.3.4 Funciones

Para automatizar los cálculos del modelo se implementaron funciones personalizadas en Power Query, las cuales permiten evaluar la interacción entre sectores considerando su posición geográfica, proyección de cobertura y configuración de PCI.

Tabla 14, Funciones personalizadas utilizadas en el modelo de detección.

Función	Propósito	Descripción técnica
fxHaversine	Cálculo de distancia entre celdas	Calcula la distancia entre dos coordenadas geográficas utilizando la fórmula de Haversine, permitiendo estimar la separación espacial entre sectores LTE.
fxBoundaries	Proyección geométrica de cobertura	Genera la representación geométrica del haz de cobertura de cada sector en formato WKT a partir del azimut, la apertura del sector y el alcance estimado de cobertura.
fxPciConflict	Detección de conflictos de PCI	Se proyectan rectas a partir de los azimuts y alcance de las celdas de una tabla A y se comparan con una tabla B para identificar intersecciones. El resultado son las celdas con conflictos y confusiones de PCI.
fxRsConflict	Detección de colisiones de RS	Se proyectan rectas a partir de los azimuts y alcance de las celdas de una tabla A y se comparan con una tabla B para identificar intersecciones. El resultado son las celdas con el mismo residuo de PCI según el divisor evaluado (mod 3, mod 6 o mod 30).
fxOvershooting	Detección de sobrepropagación	Identifica sectores cuyo alcance estimado invade la zona de cobertura de sectores vecinos orientados en dirección opuesta.

6.3.5 Consultas

El modelo se compone de seis consultas principales en Power Query, las cuales permiten estructurar la información, ejecutar las funciones de detección y preparar los resultados para su visualización en Power BI.

Tabla 15, Consultas principales del modelo de detección.

Consulta	Propósito	Descripción
Tabla_Base	Preparación de la información base	Carga la tabla consolidada de sectores LTE y genera atributos adicionales, incluyendo el cálculo del residuo del PCI según el parámetro Analisis_RS, la asignación de colores para visualización y la generación del haz de cobertura en formato WKT mediante la función fxBoundaries.
PCI_Reuse	Evaluación de reutilización de PCI	Calcula la distancia entre sectores mediante la función fxHaversine y filtra aquellos ubicados dentro de la distancia de reutilización definida por el parámetro Distancia_Reuso, identificando pares de sectores que comparten el mismo valor de PCI.
PCI_Conflict	Detección de conflictos de PCI	Ejecuta la función fxPciConflict para identificar sectores cuya cobertura se intersectan y presentan colisión o confusión de PCI. El resultado muestra los pares de sectores en conflicto y el tipo de conflicto detectado.
RS_Conflict	Detección de colisiones de RS	Ejecuta la función fxRsConflict para identificar sectores que presentan intersección geométrica y comparten el mismo residuo de PCI (mod 3, mod 6 o mod 30), según el parámetro Analisis_RS.
Overshooting	Detección de cobertura extendida	Ejecuta la función fxOvershooting para identificar sectores cuyo alcance de cobertura estimado se extiende significativamente más allá de su área esperada, pudiendo impactar zonas cubiertas por otros sectores o celdas vecinas.
Visuales	Preparación de parámetros para visualización	Organiza los valores de los parámetros del modelo en una estructura tabular que permite su visualización dentro de los objetos visuales del informe en Power BI.

6.3.6 Relaciones

Se definieron cinco relaciones entre las tablas del modelo para garantizar la sincronización de filtros entre los distintos objetos visuales. Todas las relaciones son de tipo uno a uno con dirección de filtrado bidireccional y utilizan el identificador de sector como campo de vinculación.

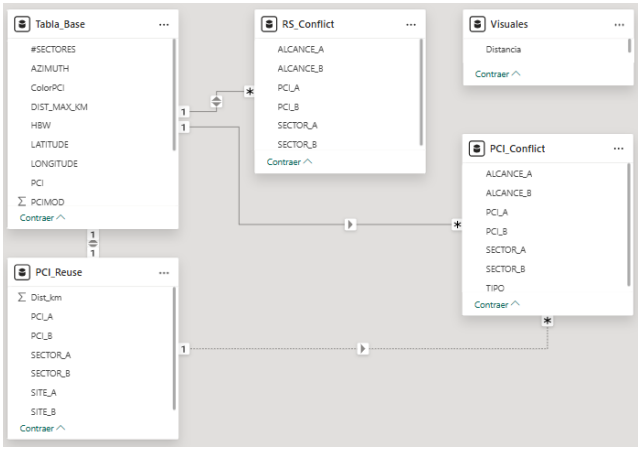


Figura 27, *Relaciones entre consultas del Proyecto.*

6.3.7 Objetos Visuales

Para facilitar la interpretación de los resultados, en la vista de informe de Power BI se incorporaron tablas, segmentaciones de datos, tarjetas informativas y un mapa interactivo. Las tablas muestran los principales hallazgos del modelo, como reutilización indebida de PCI en distancias menores a las establecidas, colisiones o confusiones de PCI, intersecciones con residuos comunes (mod 3, mod 6, mod 30) y casos de sobrepropagación donde la cobertura excede el área prevista.

Las segmentaciones de datos permiten filtrar por sector o tipo de condición, mientras que las tarjetas informativas presentan valores actuales de los parámetros utilizados. Finalmente, el mapa interactivo desarrollado con el complemento Icon Map representa puntos y polígonos geográficos a partir de geometrías WKT y aplica reglas de color para identificar espacialmente los conflictos detectados, facilitando su análisis visual.

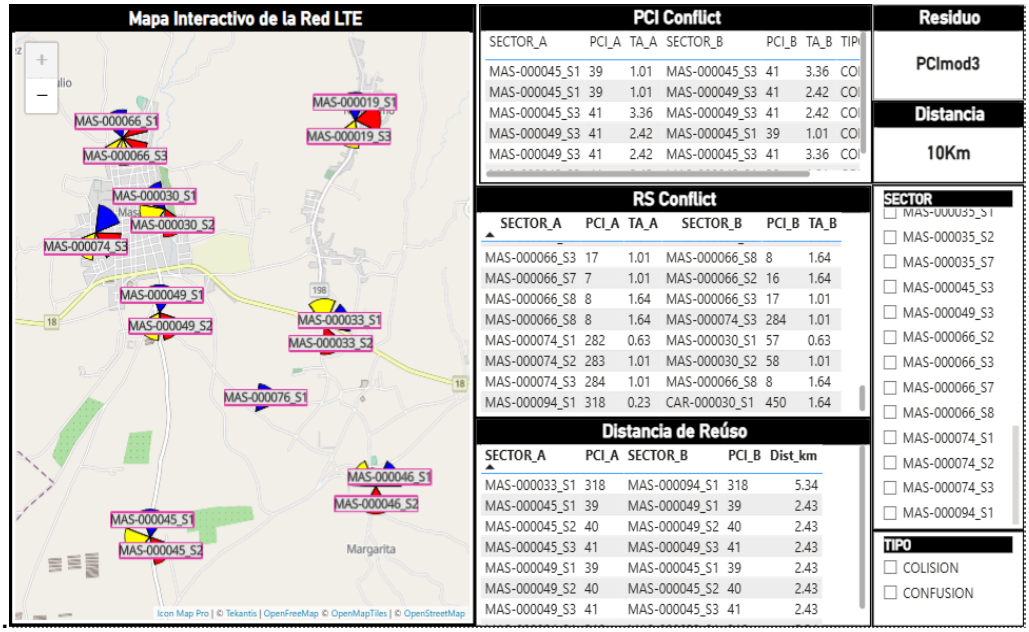


Figura 28, *Vista de Informe del Modelo en Power Bi.*

6.3.8 Pruebas de Estrés

Se determinó el tiempo de procesamiento del modelo incrementando progresivamente el número total de sectores evaluados. La Tabla 16 resume los resultados obtenidos, evidenciando cómo el aumento de sectores impacta en la duración del análisis y en la cantidad de conflictos detectados.

Tabla 16, Resultados de la Prueba de Estrés.

Sectores	Duración	Conflictos PCI	Conflictos RS	Sobrepropagación
66	10.96s	0	18	4
225	51.85s	0	169	84
752	2min19.86s	24	315	195
1,995	18min19.86s	54	1,107	706

Los resultados muestran que el modelo procesa grandes volúmenes de sectores en tiempos razonables, confirmando su eficiencia y escalabilidad al detectar conflictos PCI, RS y casos de sobrepropagación. Integrado en Power BI, ofrece un entorno visual claro que facilita la interpretación de hallazgos y respalda la optimización de redes LTE.

6.3.9 Mitigación de Conflictos RS en Ciudad de Masatepe

La Ciudad de Masatepe, al concentrar la mayor densidad poblacional y el mayor volumen de tráfico LTE del municipio, fue seleccionada como área de validación para aplicar medidas de redistribución de PCI y reducir conflictos de CRS en sectores críticos. Debido a las orientaciones físicas de los sectores, la corrección solo permitió disminuir los conflictos $PCImod3$ de seis a dos, lo que constituye una limitación del proceso.

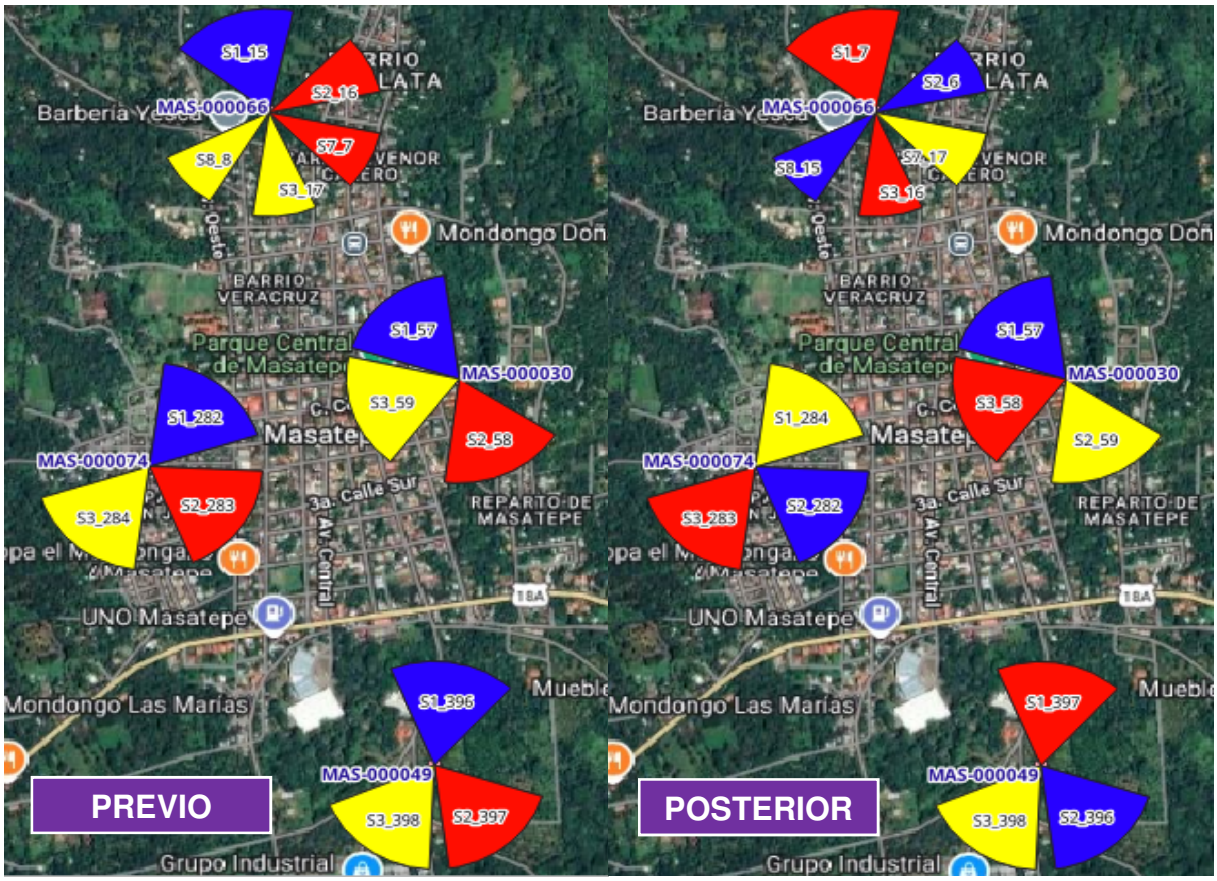


Figura 29, *Redistribución de PCI Previo vs Posterior en Ciudad de Masatepe.*

La validación se realizó con VIAVI Nitro Geo, herramienta que recopila parámetros de los equipos de usuario y permite analizar el comportamiento real de la red. El análisis se centró en los indicadores CQI, Throughput, RSRP y RSRQ, evaluados en las portadoras B2 y B4.

Para efectos de presentación se muestran únicamente los resultados de los sectores MAS-000074_S2 y MAS-000030_S2, donde se confirmó una mejora consistente en la mayoría de los indicadores. La Tabla 17 sintetiza los resultados globales, comparando ambas portadoras para los cuatro indicadores evaluados.

Tabla 17, Impacto de la redistribución de PCI en indicadores LTE.

Indicador	**Resultado Portadora en B2**	**Evaluación**	**Resultado Portadora en B4**	**Evaluación**	**Impacto Global**
CQI	Redistribución hacia rangos altos	Favorable	Redistribución hacia rangos altos	Favorable	Favorable en ambas portadoras
Throughtput	Reducción en bajas velocidades y aumento en rango superior	Favorable	Reducción en bajas velocidades y aumento en rango superior	Favorable	Favorable en ambas portadoras
RSRP	Pérdida de conexiones en rangos de mayor nivel de señal	Desfavorable	Incremento en rangos débiles y estabilidad en medios/altos	Favorable	Mixto: desfavorable en 1125, favorable en 2050
RSRQ	Disminución en rangos críticos y aumento en rangos superiores	Favorable	Disminución en rangos críticos y aumento en rangos superiores	Favorable	Favorable en ambas portadoras

En síntesis, se observa un impacto favorable en CQI, Throughput y RSRQ, mientras que el RSRP presenta un comportamiento mixto, con degradación en B2 y mejora en B4. Este balance confirma que la redistribución de PCI corrigió los conflictos CRS en las zonas de cobertura de los sectores evaluados, mejorando la experiencia de usuario en la mayoría de los parámetros críticos. No obstante, se identifica una oportunidad adicional de optimización mediante ajustes físicos, como tilt o reorientación de antenas, que podrían potenciar aún más la calidad de señal.

Los valores detallados por rangos, incluyendo variación porcentual, peso relativo e impacto ponderado, se presentan en el Anexo D como respaldo técnico del análisis.

VII. CONCLUSIONES

A partir del desarrollo del presente proyecto y del análisis de la red LTE del municipio de Masatepe, se derivan las siguientes conclusiones, que sintetizan los principales hallazgos y aportes del estudio:

- Se analizaron las causas técnicas de conflictos de PCI y colisiones de RS en redes LTE. Se demostró que la reutilización restringida de identificadores, las decisiones de diseño y la sobrepropagación de señal son los principales detonantes de interferencia, hallazgos que sirvieron de base para definir las funcionalidades del modelo automatizado en Power BI.

- Se caracterizó la red LTE de Masatepe, precisando la distribución de sitios y sectores, la asignación de PCI y los parámetros del sistema radiante. No se observaron conflictos directos de PCI, pero sí sectores en riesgo de colisiones CRS y casos de sobrepropagación, definiendo un panorama crítico que anticipó las condiciones que el modelo automatizado debía validar en la siguiente etapa.

- Se diseñó un modelo automatizado en Power BI que evaluó la interacción entre sectores LTE y detectó reutilización indebida de PCI, colisiones de RS y casos de sobrepropagación. Las pruebas de estrés demostraron su eficiencia y escalabilidad, proyectándolo como una herramienta práctica para el análisis crítico y la toma de decisiones en planificación y optimización de redes LTE.

- Se mejoró el desempeño de CQI, Throughput y RSRQ en los sectores MAS-000074_S2 y MAS-000030_S2, mientras que el RSRP mostró un efecto parcialmente favorable gracias a la redistribución de PCI aplicada a partir de los conflictos CRS detectados por el modelo automatizado.

VIII. RECOMENDACIONES

Con base en los resultados del modelo automatizado aplicado a la red LTE de Masatepe, se presentan las siguientes recomendaciones, dirigidas a corregir limitaciones y fortalecer su utilidad práctica:

- Integrar el modelo con fuentes de datos centralizadas (SQL, PostgreSQL, SharePoint) para garantizar disponibilidad, consistencia y actualización continua, superando la dependencia de archivos locales.

- Ampliar las funcionalidades del modelo para que, además de detectar conflictos, genere propuestas de optimización en la asignación de PCI, apoyando directamente los procesos de planificación y operación.

- Automatizar la asignación de PCI mediante algoritmos de optimización que evalúen combinaciones posibles y seleccionen configuraciones que reduzcan la probabilidad de conflictos.

- Extender el modelo hacia redes 5G e incorporar indicadores de desempeño, complementando el análisis de planificación con información operativa y ampliando el alcance de la herramienta.

- Implementar ajustes físicos en los sectores MAS-000074_S2 y MAS-000030_S2, como tilt o reorientación de antenas, para complementar la redistribución de PCI y consolidar las mejoras en CQI, Throughput y RSRQ, reduciendo las debilidades residuales que mantuvieron el RSRP solo parcialmente favorable.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] 3rd Generation Partnership Project. (2025). *Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 19) (3GPP TS 36.211 V19.1.0)*. ETSI.

[2] Ericsson AB. (2016, abril 26). *Coverage and capacity dimensioning FDD (1/100 56-HSC 105 50/1-T1 Uen AE) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[3] Ericsson AB. (2020, diciembre 7). *Control channel dimensioning FDD (2/100 56-HSC 105 50/1-T1 Uen AX) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[4] Ericsson AB. (2023, agosto 15). *PCI planning in ESS networks (18/100 56-HSC 105 50/1 Uen E) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[5] Ericsson AB. (2025, marzo 21). *PCI planning in NR networks (1/100 56-LZA 701 6017/1 Uen J) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[6] Ericsson AB. (2025, abril 10). *PCI conflict reporting overview (50/221 04-LZA 701 6014/1 Uen BH) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[7] Ericsson AB. (2025, noviembre 10). *System description LTE (30/1551-LZA 701 6014/1 Uen BJ35B) [Documento técnico interno]*. Ericsson Library Explorer (ELEX).

[8] Ericsson Antenna Technology Germany GmbH. (2023). *Catalog 2023 Rev. C [Catálogo corporativo]*. Rosenheim, Germany: Author.

[9] Johnson, C. (2012). *Long term evolution in bullets (2nd ed.)*. CreateSpace. http://www.lte-bullets.com/

[10] Microsoft. (2023). *Power BI documentation.* Microsoft Learn. https://learn.microsoft.com/power-bi/ (Consultado el 10 de diciembre de 2025)

[11] Vercellis, C. (2009). *Business intelligence: Data mining and optimization for decision making*. Wiley.

X. ANEXOS

Anexo A: Contador Ericsson pmTaInit2Distr

Este contador refleja la distribución inicial de distancia de los UE con capacidad LTE conectados a una celda, excluyendo aquellos clasificados como BL/CE y NB-IoT. La distancia se estima a partir del índice de Timing Advance, y cada intervalo registra el número de UE conectados dentro de un rango específico.

Tabla A1. *Distribución inicial de distancia de los UE según índice de TA*

Vector	Distancia (km)	TA	Vector	Distancia (km)	TA
0	< 0.08	0	28	63.5 – 68.5	814 – 877
1	0.08 – 0.23	1–2	29	68.5 – 73.6	878 – 942
2	0.23 – 0.63	3–7	30	73.6 – 78.9	943 – 1010
3	0.63 – 1.01	8–12	31	78.9 – 84.5	1011 – 1081
4	1.01 – 1.64	13–20	32	84.5 – 90.2	1082 – 1154
5	1.64 – 2.42	21–30	33	90.2 – 96.1	1155 – 1230
6	2.42 – 3.36	31–42	34	96.1 – 100.0	1231 – 1282
7	3.36 – 4.45	43–56	35	100.0 – 105.0	1283 – 1344
8	4.45 – 5.70	57–72	36	105.0 – 110.0	1345 – 1408
9	5.70 – 7.18	73–91	37	110.0 – 115.0	1409 – 1472
10	7.18 – 8.74	92–111	38	115.0 – 120.0	1473 – 1536
11	8.74 – 10.5	112–134	39	120.0 – 125.0	1537 – 1600
12	10.5 – 12.5	135–159	40	125.0 – 130.0	1601 – 1664
13	12.5 – 14.6	160–186	41	130.0 – 135.0	1665 – 1728
14	14.6 – 16.9	187–215	42	135.0 – 140.0	1729 – 1792
15	16.9 – 19.4	216–247	43	140.0 – 145.0	1793 – 1856
16	19.4 – 22.0	248–281	44	145.0 – 150.0	1857 – 1920
17	22.0 – 24.8	282–317	45	150.0 – 155.0	1921 – 1984
18	24.8 – 27.9	318–356	46	155.0 – 160.0	1985 – 2048
19	27.9 – 31.1	357–397	47	160.0 – 165.0	2049 – 2112
20	31.1 – 34.5	398–441	48	165.0 – 170.0	2113 – 2176
21	34.5 – 38.1	442–487	49	170.0 – 175.0	2177 – 2240
22	38.1 – 41.8	488–535	50	175.0 – 180.0	2241 – 2304
23	41.8 – 45.8	536–586	51	180.0 – 185.0	2305 – 2368
24	45.8 – 50.0	587–639	52	185.0 – 190.0	2369 – 2432
25	50.0 – 54.3	640–695	53	190.0 – 195.0	2433 – 2496
26	54.3 – 58.9	696–753	54	195.0 – 200.0	2497 – 2560
27	58.9 – 63.5	754–813			

Anexo B: Procedimiento Cálculo de Intersección de Líneas

A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para el cálculo de la intersección de rectas en el modelo, con sus pasos y fórmulas correspondientes.

Tabla B1. *Fórmulas utilizadas para el cálculo de intersección de rectas.*

Paso	Descripción	Fórmula
1	Conversión de ángulos a radianes	$\theta_{rad} = \theta_{deg} * {}^{\pi}/_{180}$
2	Conversión de coordenadas geográficas a cartesianas	$x_1 = R * \cos(lat_1) * \cos(lon_1)$ $y_1 = R * \cos(lat_1) * \sin(lon_1)$
3	Cálculo del punto final de la recta	$x_2 = x_1 + d * \cos(\theta_{rad})$ $y_2 = y_1 + d * \sin(\theta_{rad})$
4	Definición de la recta a partir de dos puntos	$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \qquad b = y_1 - m * x_1$
5	Sistema de ecuaciones para dos rectas	$y = m_1 * x + b_1$ $y = m_2 * x + b_2$
6	Cálculo del punto de intersección	$x^* = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2}$ $y^* = m_1 * x^* + b_1$
7	Verificación de pertenencia al segmento	x^* debe estar entre x_1 y x_2 y^* debe estar entre y_1 y y_2

R: radio de la Tierra (aprox. 6371 km).

lat,lon: latitud y longitud de la estación base.

θ_{deg}: azimut en grados.

θ_{rad}: azimut convertido a radianes.

d: distancia máxima de cobertura del sector (en km).

(x_1, y_1): coordenadas cartesianas de la estación base.

(x_2, y_2): coordenadas cartesianas del punto final del sector.

m: pendiente de la recta.

b: intercepto de la recta en el eje y.

m_1,b_1: pendiente e intercepto de la primera recta.

m_2,b_2: pendiente e intercepto de la primera recta.

(x^*, y^*): coordenadas del punto de intersección.

Anexo C: Procedimiento Cálculo de Distancia con Haversine

La fórmula de Haversine es una herramienta matemática muy utilizada en geodesia, navegación y telecomunicaciones porque permite calcular la distancia más corta entre dos puntos sobre la superficie terrestre.

Tabla C1. *Fórmulas utilizadas para el cálculo de distancia*

Paso	Descripción	Fórmula
1	Conversión de coordenadas a radianes	$lat_{rad} = lat_{deg} * {}^{\pi}/_{180}$ $lon_{rad} = lon_{deg} * {}^{\pi}/_{180}$
2	Diferencias de coordenadas	$\Delta lat = lat_2 - lat_1$ $\Delta lon = lon_2 - lon_1$
3	Cálculo del parámetro α	$\alpha = \sin^2\left(\frac{\Delta lat}{2}\right) + \cos(lat_1) * \cos(lat_2) * \sin^2\left(\frac{\Delta lon}{2}\right)$
4	Cálculo del parámetro c	$c = 2 * \arctan2\left(\sqrt{\alpha}, \sqrt{1-\alpha}\right)$
5	Distancia final	$d = R * c$

lat_1,lon_1: latitud y longitud del primer punto (en radianes).

lat_2,lon_2: latitud y longitud del segundo punto (en radianes).

$\Delta lat, \Delta lon$: diferencias de latitud y longitud entre los dos puntos.

α: parámetro auxiliar que combina diferencias angulares y cosenos de latitudes.

c: ángulo central entre los dos puntos sobre la esfera terrestre.

R: radio de la Tierra (aprox. 6371 km).

d: distancia ortodrómica (la más corta sobre la superficie terrestre).

Anexo D: Resultados Redistribución de PCI en Ciudad de Masatepe

En este anexo se presentan los resultados obtenidos tras la redistribución de PCI aplicada en la Ciudad de Masatepe. El análisis se centra en los indicadores CQI, Throughput, RSRP y RSRQ, evaluados en las portadoras B2 y B4.

Cada tabla muestra la distribución de conexiones por rangos, comparando los valores Previo y Posterior a la redistribución. Se incluyen además la variación porcentual, el peso relativo de cada rango respecto al total de conexiones y el impacto ponderado, que sintetiza el efecto global de la redistribución sobre cada indicador. Los resultados permiten identificar de manera clara si el impacto fue favorable, desfavorable o mixto, aportando evidencia cuantitativa para la validación técnica del modelo.

Tabla D1. *Resultados de CQI – Portadora B2*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
0-6	23206	19998	-13.82%	0.20	-2.73
6-8.5	35498	32621	-8.10%	0.30	-2.45
8.5-10	21965	22798	3.79%	0.19	0.71
10-12.5	25192	26753	6.20%	0.21	1.33
12.5-15	11624	12509	7.61%	0.10	0.75
Total	**117485**	**114679**	**-2.39%**	**1.00**	**-2.39**

Tabla D2. *Resultados de CQI – Portadora B4*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
0-6	22640	21516	-4.96	0.17	-0.83
6-8.5	38240	35495	-7.18	0.28	-2.02
8.5-10	27734	27907	0.62	0.20	0.13
10-12.5	30684	32593	6.22	0.23	1.41
12.5-15	16373	18099	10.54	0.12	1.27
Total	**135671**	**135610**	**-0.04**	**1.00**	**-0.04**

Tabla D3. *Resultados de Throughput Mbps – Portadora B2*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
0-1	8957	8623	-3.73	0.08	-0.28
1-2.5	9107	8354	-8.27	0.08	-0.64
2.5-5	12787	10765	-15.81	0.11	-1.72
5-7.5	13830	12373	-10.54	0.12	-1.24
7.5-10	12704	11835	-6.84	0.11	-0.74
10-500	60100	62729	4.37	0.51	2.24
Total	**117485**	**114679**	**-2.39**	**1.00**	**-2.39**

Tabla D4. *Resultados de Throughput Mbps – Portadora B4*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
0-1	9124	8405	-7.88	0.07	-0.53
1-2.5	8663	8350	-3.61	0.06	-0.23
2.5-5	11451	10232	-10.65	0.08	-0.90
5-7.5	12254	10947	-10.67	0.09	-0.96
7.5-10	12235	11615	-5.07	0.09	-0.46
10-500	81944	86061	5.02	0.60	3.03
Total	**135671**	**135610**	**-0.04**	**1.00**	**-0.04**

Tabla D5. *Resultados de RSRP dBm – Portadora B2*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
-150 a -120	2861	3052	6.68	0.02	0.16
-120 a -115	11328	11202	-1.11	0.10	-0.11
-115 a -110	15924	15881	-0.27	0.14	-0.04
-110 a -105	21164	21050	-0.54	0.18	-0.10
-105 a -95	36908	34531	-6.44	0.31	-2.02
-95 a 0	29300	28963	-1.15	0.25	-0.29
Total	**117485**	**114679**	**-2.39**	**1.00**	**-2.39**

Tabla D6. *Resultados de RSRP dBm – Portadora B4*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
-150 a -120	2546	3078	20.90	0.02	0.39
-120 a -115	10899	11596	6.40	0.08	0.51
-115 a -110	17579	17358	-1.26	0.13	-0.16
-110 a -105	24427	24085	-1.40	0.18	-0.25
-105 a -95	45936	45394	-1.18	0.34	-0.40
-95 a 0	34284	34099	-0.54	0.25	-0.14
Total	**135671**	**135610**	**-0.04**	**1.00**	**-0.04**

Tabla D7. *Resultados de RSRQ dB – Portadora B2*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
-50 a -19	13096	9707	-25.88	0.11	-2.88
-19 a -15	31208	28208	-9.61	0.27	-2.55
-15 a -12.5	29150	28347	-2.75	0.25	-0.68
-12.5 a -8.5	39697	43688	10.05	0.34	3.40
-8.5 a -5	4308	4709	9.31	0.04	0.34
-5 a 0	26	20	-23.08	0.00	-0.01
Total	**117485**	**114679**	**-2.39**	**1.00**	**-2.39**

Tabla D8. *Resultados de RSRQ dB – Portadora B4*

Rango	Conexiones Previo	Conexiones Posterior	Variación porcentual	Peso Relativo	Impacto Ponderado
-50 a -19	15392	12835	-16.61	0.11	-1.88
-19 a -15	35100	31876	-9.19	0.26	-2.38
-15 a -12.5	31551	31341	-0.67	0.23	-0.15
-12.5 a -8.5	48006	53878	12.23	0.35	4.33
-8.5 a -5	5608	5659	0.91	0.04	0.04
-5 a 0	13	21	61.54	0.00	0.01
Total	**135670**	**135610**	**-0.04**	**1.00**	**-0.04**