



DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE SEÑAL Y RENDIMIENTO DE RED EN TECNOLOGÍA LTE EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

POR

Bastían Marcelo Núñez Montero

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil en Telecomunicaciones.

Profesor Guía

Sergio Torres, Ph.D.

Concepción,
23 de julio de 2025

© 2025 Bastían Marcelo Núñez Montero

© 2025 Bastián Marcelo Núñez Montero

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

A todos los estudiantes de Telecom...

Resumen

Este estudio se centra en evaluar la calidad de la señal y el rendimiento de la red LTE del operador Entel en el campus de la Universidad de Concepción, considerando cómo varían estos aspectos según las diferentes condiciones horarias y espaciales. Para ello, se realizaron mediciones en terreno a lo largo de tres rutas y en tres momentos del día (mañana, mediodía y tarde), registrando parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI, CQI, velocidades, latencia, jitter, PCI, Cell ID, altitud y coordenadas geográficas. Los datos se procesaron con herramientas como MATLAB y Python, aplicando técnicas de estadística descriptiva, gráficos de caja, mapas de calor, análisis de correlación y regresión, así como reducción de dimensionalidad mediante PCA y agrupamiento con K-means. Los resultados revelan diferencias claras entre rutas y horarios, identificando áreas críticas con bajo rendimiento, lo cual se atribuye a factores topográficos y a la variabilidad temporal. Este análisis establece una base sólida para futuras mejoras en la planificación de redes móviles en entornos universitarios.

Abstract

This study focuses on evaluating the signal quality and performance of Entel's LTE network on the campus of the University of Concepción, considering how these aspects vary under different spatial and temporal conditions. Field measurements were conducted along three routes and at three times of the day (morning, midday, and afternoon), recording parameters such as RSRP, RSRQ, RSSI, CQI, download and upload speeds, latency, jitter, PCI, Cell ID, altitude, and geographic coordinates. The data were processed using tools such as MATLAB and Python, applying techniques including descriptive statistics, boxplots, heatmaps, correlation and regression analysis, as well as dimensionality reduction through PCA and clustering with K-means. The results reveal clear differences between routes and time slots, identifying critical areas with low performance, which are attributed to topographic factors and temporal variability. This analysis provides a solid foundation for future improvements in mobile network planning in university environments.

Agradecimientos

A lo largo de este camino, hay que recalcar el apoyo de ciertas personas a las que debo agradecer.

En primer lugar, a mi familia, por supuesto, gracias por su paciencia, cariño y apoyo incluso en momentos complicados.

A mis amigos y compañeros de carrera con los que compartí esta etapa que la hicieron más llevadera. También un reconocimiento a quienes colaboraron con este proyecto, permitiéndome realizar las mediciones y el análisis de datos con sus herramientas.

Índice General

Resumen	1
Abstract.....	2
Agradecimientos	3
Índice General.....	4
Índice de Tablas	9
Siglas.....	10
Capítulo 1 Introducción	4
1.1. Trabajos previos	5
1.1.1. Discusión.....	6
1.2. Definición del problema.....	8
1.3. Objetivos.....	9
1.3.1. Objetivo general.....	9
1.3.2. Objetivos específicos.....	9
1.4. Metodología.....	10
1.5. Alcances y Limitaciones	13
1.5.1. Alcances.....	13
1.5.2. Limitaciones.....	13
Capítulo 2 Marco Teórico.....	14
2.1. Introducción.....	14
2.2. Definiciones de conceptos clave.....	15
2.3. Modelos y formulaciones matemáticas.....	16
2.3.1. Correlación de Pearson	17
2.3.2. Regresión Lineal Múltiple	17
2.3.3. Análisis de Componentes Principales (PCA)	17
2.3.4. Agrupamiento con K-Means.....	18
2.4.1. Técnicas de análisis aplicadas	19
2.4.2. Justificación del enfoque metodológico	20
Capítulo 3 Desarrollo.....	21
3.1. Organización y estructuración de los datos	21
3.2. Preparación para el análisis y visualización.....	22
3.3. Automatización del flujo de trabajo	23

Capítulo 4 Resultados.....	24
4.1. Estadísticas Descriptivas.....	24
4.2. Análisis de velocidades y latencias.....	28
4.2.1. Análisis de velocidades de bajada.....	28
4.2.2. Análisis de velocidades de subida.....	31
4.2.3. Análisis de latencia promedio	33
4.2.4. Análisis de jitter.....	35
4.3. Calidad de señal.....	36
4.3.1. Análisis de RSRP.....	37
4.3.2. Análisis de RSRQ.....	41
4.3.3. Análisis de RSSI.....	45
4.4. Correlaciones entre variables	49
4.4.1. Matriz de Correlación Global	49
4.4.2. Comparación entre horarios.....	51
4.5. Análisis de Componentes Principales (PCA)	54
4.6. Análisis de agrupamiento (Clustering).....	55
4.7. Análisis de Regresión Lineal Múltiple.....	58
4.7.1. Regresión para Velocidad medida en iperf3	58
4.7.2. Regresión para velocidad medida en Ookla Speedtest	60
4.8. Relación entre Frecuencia y Velocidad en la red LTE	62
4.9. Análisis de cobertura y movilidad por celda física (PCI y Cell ID).....	64
4.9.1. Distribución de PCI por ruta y horario.....	64
4.9.2. Análisis de Cell ID.....	68
4.10. Comparación entre operadores móviles: Entel vs WOM.....	72
4.10.1. Comparación de calidad de señal	72
4.10.2. Comparación de velocidades de transmisión.....	73
4.10.3. Correlación entre parámetros comunes	76
4.10.4. Análisis de regresión para WOM.....	77
Capítulo 5 Conclusiones.....	78
5.1. Sumario	78
5.2. Conclusión.....	79
5.3. Trabajo a Futuro	80
Bibliografía.....	81

Índice de Figuras

1.1. Mapa de la Universidad de Concepción con las 3 rutas definidas.....	10
4.1. Boxplots de Velocidad de Bajada por Ruta y Horario.....	28
4.2. Histogramas de Velocidad de Bajada por Horario.....	30
4.3. Boxplots de Velocidad de Subida por Ruta y Horario.....	31
4.4. Histogramas de Velocidad de Subida por Horario.....	32
4.5. Boxplots de Latencia Promedio por Ruta y Horario.....	33
4.6. Histograma de Latencia Promedio por Horario.....	34
4.7. Boxplots de Jitter por Ruta y Horario.....	35
4.8. Histograma de Jitter por Horario.....	36
4.9. Boxplots de RSRP por Ruta y Horario.....	37
4.10. Mapa de Calor de RSRP en horario de mañana.....	38
4.11. Mapa de Calor de RSRP en horario de mediodía.....	39
4.12. Mapa de Calor de RSRP en horario de tarde.....	40
4.13. Boxplots de RSRQ por Ruta y Horario.....	41
4.14. Mapa de Calor de RSRQ en horario de mañana.....	42
4.15. Mapa de Calor de RSRQ en horario de mediodía.....	43
4.16. Mapa de Calor de RSRQ en horario de tarde.....	44
4.17. Boxplots de RSSI por Ruta y Horario.....	45
4.18. Mapa de Calor de RSSI en horario de mañana.....	46
4.19. Mapa de Calor de RSSI en horario de mediodía.....	47
4.20. Mapa de Calor de RSSI en horario de tarde.....	48
4.21. Matriz de Correlación Global entre Parámetros de Red LTE (Entel).....	49
4.22. Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de mañana.....	51
4.23. Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de mediodía.....	52
4.24. Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de tarde.....	52
4.25. Gráfico del PCA Entel.....	54
4.26. Mapa de agrupamiento de clústeres K-means.....	56
4.27. Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Bajada TCP (iperf3).....	58
4.28. Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Subida TCP (iperf3).....	59
4.29. Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Bajada ST.....	60
4.30. Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Subida ST.....	61
4.31. Gráfico de dispersión de la velocidad de bajada iperf3 vs Frecuencia Downlink.....	62
4.32. Gráfico de dispersión de la velocidad de subida iperf3 vs Frecuencia Uplink.....	63
4.33. Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de mañana.....	64
4.34. Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de mediodía.....	65
4.35. Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de tarde.....	65
4.36. Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de mañana.....	66

4.37. Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de mediodía...	66
4.38. Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de tarde	67
4.39. Gráfico de barras de velocidad de bajada por PCI.....	67
4.40. Gráfico de barras de velocidad de subida por PCI.....	68
4.41. Mapa de Cell ID por punto de medición.....	69
4.42. Mapa de Cell ID disponibles en CellMapper.....	71
4.43. Boxplots comparativos de velocidad Entel vs WOM	75
4.44. Matrices de correlación por operador	76
4.45. Gráfico de Regresión en el operador WOM	77

Índice de Tablas

4.1. Comparación de la media, mediana y desviación estándar de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario en Entel.....	24
4.2. Comparación de media y mediana de velocidades de bajada y subida por ruta y horario entre Entel (iperf3 y Speedtest).	25
4.3. Comparación de desviación estándar y percentil 75 de velocidades de bajada y subida por ruta y horario en Entel (iperf3 y Speedtest).	26
4.4. Promedios de latencias y jitter por ruta y horario en la red LTE de Entel.....	27
4.5. Criterios de calidad para parámetros RSRP, RSRQ y RSSI.	37
4.6. Cargas asociadas a cada variable en el análisis de componentes principales (PCA).....	55
4.7. Cargas promedio de variables por clúster (K-means).....	55
4.8. Frecuencia y Banda asociada a EARFCN utilizados en Entel.....	62
4.9. Agrupación de Cell ID por bloques consecutivos, PCI asociados y rutas donde fueron detectados.	70
4.10. Comparación de medias de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario entre WOM y Entel.....	72
4.11. Desviación estándar de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario entre WOM y Entel.	73
4.12. Comparación de media de velocidades de bajada y subida por ruta y horario entre Entel (iperf3 y Speedtest) y WOM (Speedtest).	73
4.13. Desviación estándar de velocidades por ruta y horario entre WOM y Entel.....	74

Siglas

RSRP Potencia de Señal Referencial Recibida (*Reference Signal Received Power*).

RSRQ Calidad de Señal Referencial Recibida (*Reference Signal Received Quality*).

RSSI Indicador de Intensidad de la Señal Recibida (*Received Signal Strength Indicator*).

SNR Relación Señal/Ruido (*Signal-to-Noise Ratio*).

LTE Evolución a Largo Plazo (*Long Term Evolution*).

QoS Calidad de Servicio (*Quality of Service*).

PCI Identidad de la Celda Física (*Physical Cell Identity*).

dB Decibelios.

dBm Índice de potencia en decibelios (dB) de la potencia medida en referencia a un milivatio.

PCA Análisis de Componentes Principales (*Principal Component Analysis*).

Mbps Megabits por segundo.

ST Speedtest

TCP Protocolo de Control de Transmisión (*Transmission Control Protocol*)

Capítulo 1

Introducción

En los últimos años, la demanda por servicios móviles ha crecido de manera sostenida, impulsando el desarrollo de redes celulares que sean cada vez más rápidas y eficientes. En este contexto, la tecnología LTE es la que destaca como uno de los principales estándares a nivel global. Existen desafíos particulares en la planificación de estas redes, especialmente en entornos urbanos densos como lo pueden ser los campus universitarios, donde los desafíos de cobertura y calidad son más complejos. Elementos como la topografía, la concentración de usuarios y la presencia de estructuras físicas afectan la propagación de la señal. Estos factores exigen un análisis técnico riguroso y contextualizado.

Evaluar el desempeño de una red LTE no se limita a revisar un solo parámetro, sino que implica considerar múltiples variables técnicas y factores que inciden en la experiencia de los usuarios. Variables como la intensidad y calidad de señal (RSRP, RSRQ, RSSI), el estado del canal (CQI), el rendimiento reflejado en las velocidades de bajada y subida, la latencia, el jitter, la frecuencia, el reconocimiento de las celdas existentes, entre otras, deben analizarse en conjunto. Además, es importante saber cómo estas variables cambian a lo largo del día, y el lugar donde se realice la medición, ya que se busca que tan significativa es la variación de estos valores.

En este escenario, la presente memoria tiene como propósito caracterizar el funcionamiento de la red LTE del operador Entel en el campus de la Universidad de Concepción. Este lugar no solo representa un entorno urbano con alta densidad de usuarios y presencia de múltiples estructuras físicas, sino que también es un centro académico y social con gran relevancia en la ciudad de Concepción. Evaluar el desempeño en la red permite identificar problemas reales de cobertura y calidad. Las campañas de medición en terreno se realizaron a lo largo de tres

rutas representativas del campus, registrando datos en tres franjas horarias: mañana, mediodía y tarde. Se capturaron diversos parámetros de calidad de señal, rendimiento y calidad del servicio. Aunque el foco principal del estudio se centra en Entel, se incluye la comparación de ciertos parámetros previamente medidos con el operador WOM, con el fin de contextualizar los resultados y ofrecer una visión más completa del entorno evaluado.

Este estudio describe el servicio LTE en el campus y propone una base metodológica replicable para estudios similares. La incorporación de métricas como la latencia, el jitter y velocidades medidas desde distintas herramientas (iperf3 y Speedtest), junto a los distintos análisis multivariados de los datos, ofrecen una visión más amplia, tanto desde el punto de vista técnico como desde la experiencia real del usuario.

1.1. Trabajos previos

La evaluación del desempeño de redes LTE en entornos urbanos y universitarios ha sido ampliamente abordada en investigaciones recientes, que coinciden en destacar la influencia de factores como la topografía, la densidad de edificaciones y la congestión de usuarios sobre la calidad del servicio móvil. Estudios como los de Simpson y Sun [1], Imoize y Adegbite [2], y Manap et al. [8], han utilizado mediciones en terreno y parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI y velocidades de transmisión para caracterizar el comportamiento de la red en escenarios reales, desarrollando metodologías aplicables a entornos universitarios y comerciales.

Uno de los trabajos más influyentes para este estudio es el de Simpson y Sun [1], quienes llevaron a cabo un estudio detallado sobre la variación y relación entre parámetros de calidad de señal como RSRP, RSRQ y RSSNR a lo largo de tres rutas, además de cómo se relacionan con la distancia transmisor-receptor con una estación base, todo esto con mediciones reales en terreno, incluyendo análisis estadísticos y visualizaciones espaciales.

Otro estudio influyente es el de Elsherbiny et al. [6] en donde el análisis en rutas donde pasa el transporte público, de distintos parámetros de calidad y velocidad de bajada y subida, además de datos geográficos, se relacionan a la base de este estudio, pero llevado a rutas dentro de un campus universitario.

Otros estudios han enfocado sus esfuerzos en el impacto de la infraestructura física sobre la propagación de señales. Manap et al. [8] evaluaron el rendimiento de la cobertura 4G con el parámetro RSSI en un campus universitario de Malasia, concluyendo que la señal LTE es altamente sensible a la presencia de obstáculos, refiriéndose a las características arquitectónicas de los edificios, lo cual condiciona la calidad de servicio.

En un enfoque más centrado en la experiencia del usuario, Putra et al. [3] llevaron a cabo un

estudio en Indonesia midiendo los valores de RSRP, RSRQ y SNR para tres operadores distintos. El análisis identificó que las principales causas de degradación del servicio eran la distancia al transmisor, la cantidad de usuarios en las áreas medidas y la topografía.

En Chile, la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL) ha definido que un servicio móvil solo puede ser calificado como banda ancha si ofrece una velocidad mínima garantizada de al menos 5 Mbps de descarga y 1 Mbps de subida [11]. Esta definición sirvió como base de comparación para evaluar el rendimiento registrado durante las mediciones en este estudio.

Además, según reportes técnicos de Entel, la velocidad promedio nacional de su red 4G LTE se sitúa en 4 Mbps de descarga y 600 Kbps de subida [12], lo que evidencia una brecha respecto a los estándares definidos por la normativa vigente y refuerza la necesidad de realizar evaluaciones en terreno bajo distintos escenarios de uso, especialmente en contextos de alta variabilidad geográfica, como lo es un campus universitario.

A nivel local, en el contexto de la Universidad de Concepción, se desarrolló previamente el Proyecto de Habilitación Profesional titulado “Análisis de Propagación de Señales LTE en el Campus de la Universidad de Concepción”, donde se caracterizó la red del operador WOM. En ese trabajo se realizaron mediciones en las mismas tres rutas y franjas horarias que en el presente estudio, evaluando parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI, SNR y velocidades, utilizando las aplicaciones NetMonster y Fast Speedtest, y procesando los datos en MATLAB para generar mapas de calor y correlación espacial.

Este proyecto previo sirvió como punto de partida para el desarrollo metodológico de la presente memoria. En este nuevo estudio se incorpora un nuevo operador que es Entel, se transfiere el procesamiento de MATLAB a Python, y se amplía el análisis mediante la inclusión de nuevas métricas como velocidad medida en iperf3 y en Ookla, latencia, jitter, bandas de frecuencia y datos sobre las celdas.

1.1.1. Discusión

Los estudios revisados coinciden en que la calidad del servicio LTE está determinada por una variedad de factores técnicos y ambientales. La literatura especializada destaca la influencia de aspectos como la interferencia, el tipo de entorno, la infraestructura urbana, la cantidad de usuarios conectados y la franja horaria en que se realiza la medición.

Investigaciones como las de Simpson y Sun [1] subrayan la importancia de incorporar herramientas de análisis espacial, para obtener una evaluación contextualizada.

Sin embargo, persisten ciertos vacíos metodológicos. Muchos de los estudios consultados se enfocan en entornos amplios o genéricos como ciudades o centros comerciales, y no en contextos universitarios. Otros no consideran variaciones horarias ni incluyen otras métricas

aparte de parámetros de calidad y rendimiento.

Frente a este panorama, esta memoria propone una evolución metodológica al estar centrada en el operador Entel, manejar los datos del operador WOM y estar enfocada en el entorno universitario de la Universidad de Concepción. Esta estrategia permitió no solo capturar la dinámica espacial de la red, sino su comportamiento temporal.

Este trabajo no solo entrega el comportamiento de la red, sino que también busca aportar enfoques replicables para futuras evaluaciones de calidad de servicio en redes móviles.

1.2. Definición del problema

El crecimiento sostenido de la demanda por servicios móviles en entornos urbanos plantea desafíos cada vez más exigentes para garantizar una conectividad estable, rápida y de calidad. Este problema se vuelve aún más complejo en el caso de un campus universitario, donde la alta densidad de usuarios, la movilidad constante, la topografía y las barreras que imponen los edificios y facultades, afectan directamente la propagación y calidad de la señal.

A pesar de la importancia de estos espacios, existe una escasez de estudios recientes que caractericen comparativamente el servicio entregado por distintos operadores móviles analizado por mediciones reales en terreno. Si bien se han desarrollado investigaciones previas, el análisis hecho en el campus de la Universidad de Concepción resulta novedoso a la hora de comparar operadores bajo una misma metodología de medición y análisis, para así generar conclusiones sobre el lugar elegido. Sobre esto, el lugar elegido posee características únicas dentro del paisaje urbano local, al ser un lugar reconocido de la ciudad de Concepción, siendo no solo un lugar para los estudiantes de la universidad, sino que un lugar para cualquiera que desee ir por lo que la fluctuación de usuarios, la combinación de zonas abiertas, distribución de múltiples edificios, cambios de altitudes, entre otras cosas, convierten al campus en un escenario ideal para evaluar el comportamiento de una red LTE. Además, muchos estudios se centran únicamente en parámetros tradicionales de red como RSRP, RSRQ y RSSI, dejando de lado métricas claves como velocidad, latencia, jitter, entre otras variables a considerar. Sumado a esto, se destaca el rol de la banda de frecuencia utilizada en cada medición y otras variables para ver su relación en el rendimiento.

Frente a este escenario, el problema que aborda esta memoria no se limita a medir cobertura general, sino que propone una caracterización integral y comparativa del desempeño LTE en un entorno universitario real.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento de la red LTE en el campus de la Universidad de Concepción, analizando como varía la calidad de señal y el rendimiento del servicio según la ubicación, el horario y el operador, a través de mediciones en terreno y herramientas de análisis técnico.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Realizar campañas de medición en terreno de parámetros técnicos de la red LTE (RSRP, RSRQ, RSSI, velocidades de bajada y subida, latencia, jitter, EARFCN, CQI, PCI y Cell ID) utilizando aplicaciones como NetMonster, Drive Test (iperf3) y Speedtest, en tres rutas definidas del campus y durante tres horarios distintos del día.
2. Procesar y estructurar los datos recolectados mediante herramientas computacionales, organizándolos por operador, ruta y horario, y aplicando criterios adecuados para el manejo de valores atípicos o faltantes.
3. Aplicar técnicas de análisis estadístico descriptivo y visualización (como boxplots, mapas de calor y gráficos de dispersión), con el fin de identificar patrones, niveles de variabilidad y consistencia en el servicio LTE entregado por cada operador.
4. Comparar el desempeño de los dos operadores móviles bajo condiciones similares de medición, evaluando diferencias en la calidad de señal y el rendimiento observado.
5. Representar los resultados mediante visualizaciones claras y efectivas, incluyendo mapas georreferenciados, análisis de cobertura y movilidad, análisis de componentes principales (PCA) y agrupamientos mediante clustering.
6. Evaluar el impacto de variables técnicas como la frecuencia, la latencia, el jitter, la calidad de señal, las rutas de medición y los horarios, para determinar su relación con las velocidades alcanzadas y el rendimiento general del servicio.

1.4. Metodología

OE1. Realizar campañas de medición en terreno de parámetros técnicos de la red LTE (RSRP, RSRQ, RSSI, velocidades de bajada y subida, latencia, jitter, EARFCN, CQI, PCI y Cell ID) utilizando aplicaciones como NetMonster, Drive Test (iperf3) y Speedtest, en tres rutas definidas del campus y durante tres horarios distintos del día.

Para comenzar, se llevaron a cabo campañas de medición en tres rutas definidas dentro del campus de la Universidad de Concepción. Las mediciones se realizaron en tres franjas horarias: mañana (8:00-10:00), mediodía (12:00-14:00) y tarde (15:00-17:00), en días hábiles con condiciones climáticas estables, siguiendo una rutina de desplazamiento constante.



Fig. 1.1 Mapa de la Universidad de Concepción con las 3 rutas definidas

Para Entel, se midieron los siguientes parámetros:

- RSRP, RSRQ, RSSI y CQI: obtenidos mediante iperf3.
- Velocidad de bajada y subida: obtenidas mediante Ookla Speedtest e iperf3 en protocolo TCP.
- Latencia: idle, download y upload obtenidas mediante Ookla Speedtest y promedio mediante iperf3.
- Jitter: obtenido mediante iperf3.

- EARFCN: obtenido desde iperf3.
- PCI y Cell ID: obtenidos mediante iperf3.
- Ubicación geográfica: latitud, longitud, altitud y precisión mediante iperf3.

Para WOM, se midieron los siguientes parámetros:

- RSRP, RSRQ, RSSI y SNR: obtenidos mediante NetMonster.
- Velocidad de bajada y subida: obtenidos mediante Fast Speedtest.
- Ubicación geográfica: latitud, longitud y altitud mediante NetMonster.

Se utilizaron dos equipos móviles, uno para cada operador (Entel y WOM), forzados a operar exclusivamente bajo tecnología LTE para asegurar homogeneidad.

- Dispositivo 1 (Entel): modelo Samsung Galaxy A05, habilitado para ejecutar Speedtest de Ookla e iperf3.
- Dispositivo 2 (WOM): modelo Samsung Galaxy J2 Pro, utilizado para capturar parámetros mediante NetMonster y medir velocidades con Fast Speedtest.

Las aplicaciones empleadas son las siguientes:

- Ookla Speedtest: empleada para medir velocidad de bajada, subida y latencias diferenciadas (idle, download, upload) en Entel.
- Drive Test (iperf3): empleada para medir parámetros de calidad de señal, velocidad de bajada, subida, latencia promedio, jitter, EARFCN, PCI y Cell ID en Entel.
- Fast Speedtest: utilizada para capturar velocidades de bajada y subida en WOM.
- NetMonster: utilizada para registrar RSRP, RSRQ, RSSI, SNR y datos geográficos en WOM.

OE2. Procesar y estructurar los datos recolectados mediante herramientas computacionales, organizándolos por operador, ruta y horario, y aplicando criterios adecuados para el manejo de valores atípicos o faltantes.

Tras la recolección, los datos fueron procesados en Python, estructurados por operador, ruta

y horario. Se establecieron estructuras jerárquicas mediante diccionarios y listas que permitieron mantener la trazabilidad de cada medición. Durante esta etapa se filtraron valores atípicos y se descartaron muestras incompletas o fuera de rango.

OE3. Aplicar técnicas de análisis estadístico descriptivo y visualización (como boxplots, mapas de calor y gráficos de dispersión), con el fin de identificar patrones, niveles de variabilidad y consistencia en el servicio LTE entregado por cada operador.

A continuación, se aplicaron técnicas de estadística descriptiva para evaluar el comportamiento de los distintos parámetros técnicos medidos. Este análisis se enfocó en la identificación de patrones, dispersión y variabilidad de los datos según operador, ruta y horario.

Se calcularon estadísticas como media, mediana, moda, desviación estándar, mínimos y máximos, percentiles 25 y 75 e IQR.

Los resultados se visualizaron mediante boxplots para representar variabilidad, mapas de calor para visualizar espacialmente y gráficos de dispersión para explorar relaciones entre variables.

OE4. Comparar el desempeño de los dos operadores móviles bajo condiciones similares de medición, evaluando diferencias en la calidad de señal y el rendimiento observado.

Luego, se realizó una comparación entre los resultados obtenidos para Entel y WOM, considerando variables comunes. Esta etapa buscó identificar diferencias notorias en el comportamiento de cada operador bajo condiciones equivalentes, reforzando el análisis técnico con una perspectiva comparativa.

Los parámetros considerados para esta comparación fueron RSRP, RSRQ, RSSI, velocidad de bajada y subida. Para el análisis, se construyeron gráficos tipo boxplot comparativos entre las velocidades de Entel y la velocidad que ya se tenía de WOM.

OE5. Representar los resultados mediante visualizaciones claras y efectivas, incluyendo mapas georreferenciados, análisis de cobertura y movilidad, análisis de componentes principales (PCA) y agrupamientos mediante clustering

Se incorporaron herramientas de análisis multivariado como el Análisis de Componentes Principales (PCA) y el agrupamiento mediante K-means, para sintetizar la información e identificar patrones ocultos o zonas con comportamientos similares.

Adicionalmente, se incorporó un análisis de cobertura y movilidad en donde se incorporan los parámetros de identificación de celdas físicas (PCI) y Cell ID, para asociar ciertos

comportamientos de velocidad con la infraestructura desplegada por el operador en el campus. Además, se generaron mapas georreferenciados de los parámetros medidos, lo que permitió visualizar espacialmente el comportamiento de la red en el campus universitario.

OE6. Evaluar el impacto de variables técnicas como la frecuencia, la latencia, el jitter, la calidad de señal, las rutas de medición y los horarios, para determinar su relación con las velocidades alcanzadas y el rendimiento general del servicio.

Finalmente, se evaluó como influyen variables como la frecuencia utilizada, la calidad de la señal, la latencia, el jitter, las rutas de medición, la distribución de celdas y los horarios, en el rendimiento observado, en este caso, las velocidades de bajada y subida.

1.5. Alcances y Limitaciones

1.5.1. Alcances

- Este estudio se centra en la caracterización técnica del servicio LTE dentro del campus de la Universidad de Concepción, tomando como referencia tres rutas definidas y tres horarios distintos del día (mañana, mediodía y tarde).
- Se consideraron dos operadores móviles (Entel y WOM), lo que permitió establecer comparaciones bajo condiciones de medición similares.
- Las variables evaluadas se basaron en parámetros de calidad de señal (RSRP, RSRQ, RSSI), rendimiento (velocidades de bajada y subida, medidas tanto con Speedtest como con iperf3), calidad de experiencia (latencia y jitter), frecuencia de operación obtenida del EARFCN, información sobre la celda y su cobertura (PCI y Cell ID).
- Se aplicaron técnicas de análisis estadístico, visualización geoespacial, reducción de dimensionalidad, agrupamiento de variables para detectar patrones, zonas críticas y relaciones entre variables.
- El alcance de este trabajo no solo incluye una descripción detallada del comportamiento de la red, sino también la generación de visualizaciones e interpretaciones que puedan orientar futuras mejoras en la planificación de redes móviles.

1.5.2. Limitaciones

- El estudio se restringe exclusivamente a la tecnología LTE, sin incluir otras

generaciones como 3G o 5G.

- En cuanto a las pruebas de rendimiento con iperf3, solo se consideraron las medidas con el protocolo TCP, debido a que las mediciones con el protocolo UDP presentaron fallos recurrentes, por lo que fueron descartadas del análisis final.
- Algunas mediciones con iperf3 no pudieron completarse por pérdidas de conectividad o errores de la aplicación, lo que generó vacíos puntuales en los datos en comparación con Speedtest, aun así, se consideraron solamente las mediciones que fueron un éxito en ambas.
- WOM presentó una mayor cantidad de puntos de medición, pero con un número más limitado de parámetros disponibles. Además, el dispositivo utilizado para sus pruebas no correspondía a un equipo de gama alta, lo que podría haber influido en los resultados de velocidad en ciertas condiciones.
- Todas las mediciones se realizaron en exteriores, no se incluyeron zonas interiores como aulas, bibliotecas o edificios administrativos.
- No se consideraron métricas de congestión de usuarios en tiempo ni patrones reales de tráfico de red, por lo que los resultados no necesariamente reflejan condiciones de máxima demanda.
- Este estudio no evalúa la percepción directa de los usuarios, por lo que sus conclusiones se limitan a un enfoque técnico. Aunque se procuró mantener condiciones climáticas estables y rutas consistentes, no se puede descartar la influencia de factores externos tanto ambientales como eventos transitorios.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Introducción

La tecnología LTE (Long Term Evolution) representa una de las principales soluciones de acceso móvil de cuarta generación (4G), ofreciendo importantes mejoras en velocidad, eficiencia espectral y latencia respecto a generaciones anteriores como 2G y 3G. En Chile, LTE se ha consolidado como la infraestructura dominante para servicios móviles durante los últimos años y su análisis técnico se basa en un conjunto de parámetros que permiten evaluar su desempeño. Comprender estos indicadores es esencial para caracterizar adecuadamente la calidad de señal y la experiencia del usuario final. A su vez, esto requiere una visión integral que considere los principios de propagación de señales y las herramientas analíticas empleadas para interpretar los datos recolectados.

Este capítulo tiene como propósito establecer los fundamentos teóricos que sustentan el análisis hecho en esta memoria. Para ello, se presentan las definiciones clave de los parámetros medidos, las herramientas utilizadas y los métodos de análisis adoptados para interpretar los datos.

2.2. Definiciones de conceptos clave

Para evaluar el comportamiento y la calidad del servicio en redes LTE, es fundamental comprender los principales conceptos abordados en este estudio:

- **RSRP (Reference Signal Received Power):** Representa la potencia promedio recibida de las señales de referencia transmitidas por una celda LTE. Se expresa en decibelios-milivatios (dBm) y se utiliza como indicador clave para evaluar la cobertura. Valores más negativos indican menor intensidad de señal.
- **RSRQ (Reference Signal Received Quality):** Mide la calidad de la señal de referencia considerando tanto la potencia recibida como el nivel de interferencia. Se expresa en decibelios (dB) y permite evaluar la eficiencia del canal.
- **RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Es la medida de la potencia total recibida incluyendo la señal útil, interferencia y ruido dentro del ancho de banda asignado. A diferencia de RSRP, no está limitado únicamente a las señales de referencia. También se expresa en dBm.
- **SNR (Signal-to-Noise Ratio):** Relación entre la potencia útil de la señal y el nivel de ruido de fondo. Se expresa en decibelios (dB) y es un indicador clave de la calidad de propagación. Valores más altos implican mayor capacidad para transmitir datos con menor tasa de error.
- **CQI (Channel Quality Indicator):** Es un índice que reporta la calidad del canal de enlace descendente, determinado por el terminal móvil. Este valor, que varía típicamente entre 0 y 15, es utilizado por la red para seleccionar el esquema de modulación y codificación más adecuado.
- **Latencia:** Tiempo que demora un paquete de datos en viajar desde el dispositivo emisor hasta el receptor. En este estudio se midieron diferentes tipos de latencia: en reposo (idle), durante subida (upload), durante descarga (download), y su promedio. Se expresa en milisegundos (ms).
- **Jitter:** Variación en los tiempos de entrega de los paquetes de datos. Una alta variabilidad puede afectar negativamente servicios en tiempo real como llamadas VoIP o streaming. También se expresa en milisegundos (ms).
- **Velocidad de transmisión:** Cantidad de datos transmitidos por unidad de tiempo, tanto en descarga como en subida. Se midió mediante dos métodos: aplicaciones comerciales (Speedtest) y pruebas activas con iPerf3 sobre el protocolo TCP. Se expresa en megabits por segundo (Mbps).
- **EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number):** Es un identificador

numérico que representa la frecuencia portadora utilizada por una celda LTE. A partir del valor de EARFCN es posible calcular la frecuencia real en MHz, así como la banda LTE correspondiente, lo cual influye directamente en el alcance y desempeño del enlace.

- NetMonster: Aplicación de diagnóstico para dispositivos Android que permite acceder a información detallada de la red móvil en tiempo real. Fue utilizada para recolectar valores de RSRP, RSRQ, RSSI, SNR, así como información geográfica asociada a cada punto de medición (latitud, longitud, altitud).
- Speedtest (Ookla y Fast): Aplicaciones comerciales ampliamente utilizadas para pruebas de velocidad de conexión a internet. Se utilizaron como complemento para medir velocidades de descarga y subida, además de latencia de bajada, subida y en reposo, simulando el comportamiento típico del tráfico de datos.
- Drive Test (iperf3): Esta aplicación está construida sobre la herramienta iperf3, que actúa como su backend principal para la ejecución de pruebas TCP. iperf3 es una herramienta orientada a pruebas de rendimiento de red que mide tráfico TCP y UDP. Se utilizó en un entorno controlado y permitió obtener mediciones de velocidad de subida y bajada, latencia, jitter, parámetros de calidad de señal, nivel de señal, CQI, y el identificador EARFCN correspondiente a la frecuencia portadora en uso, además de datos geográficos como latitud y longitud. iperf3 entrega datos con un enfoque más técnico, orientado al análisis del canal y la calidad del enlace desde la capa de transporte.
- PCI (Physical Cell Identity): Identificador físico que distingue a las celdas LTE dentro de una misma banda y área de cobertura. Es utilizado por los dispositivos para sincronizar y conectarse a la celda más adecuada. Su valor va de 0 a 503 y no es único a nivel nacional, por lo que puede repetirse en distintos sectores.
- Cell ID (Identificador de Celda): Identificador único que representa una celda específica en la red móvil de un operador. A diferencia del PCI, el Cell ID permite una asociación más precisa con la infraestructura física (antenas) desplegada por el operador. Este parámetro puede usarse para ubicar geográficamente celdas mediante herramientas como CellMapper.

2.3. Modelos y formulaciones matemáticas

El análisis técnico realizado en esta memoria se apoyó en un conjunto de modelos matemáticos que permiten evaluar relaciones entre variables, reducir la complejidad del conjunto de datos y detectar patrones de comportamiento. Estas técnicas fueron

implementadas directamente en Python, pero a continuación se describen los fundamentos teóricos de cada una.

2.3.1. Correlación de Pearson

La correlación de Pearson permite cuantificar la fuerza y dirección de una relación lineal entre dos variables numéricas.

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.1)$$

donde $\bar{x}$ e $\bar{y}$ representan las medias de cada variable. Este coeficiente, que varía entre -1 y 1, permitió identificar relaciones estadísticas directas o inversas entre los distintos indicadores de red. Se utilizó para construir matrices de correlación entre parámetros técnicos como RSRP, RSRQ, RSSI, CQI, velocidades de bajada y subida, latencia y jitter.

2.3.2. Regresión Lineal Múltiple

Los modelos de regresión lineal permiten estimar el valor de una variable dependiente a partir de varias variables independientes. En ambos casos de operadores utilizados (Entel y WOM), se utilizaron modelos con múltiples predictores (RSRP, RSRQ, RSSI).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (2.2)$$

Donde y representa la variable dependiente (por ejemplo, velocidad de bajada), x_n representa las variables explicativas, β_0 es el intercepto, β_n son los coeficientes, y ε el término de error. Este enfoque permitió cuantificar la influencia de los parámetros de calidad de señal sobre el rendimiento observado.

2.3.3. Análisis de Componentes Principales (PCA)

El Análisis de Componentes Principales es una técnica de reducción de dimensionalidad que transforma un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. Estos componentes retienen la mayor parte de la varianza presente en los datos originales, facilitando su visualización.

El procedimiento incluyó:

- Estandarización de las variables.
- Cálculo de la matriz de covarianza.

- Obtención de autovalores y autovectores.
- Proyección sobre los componentes principales.

Matemáticamente, la transformación de los datos se expresa como:

$$Z = XW \quad (2.3)$$

Donde X es la matriz de datos estandarizados, W es la matriz de autovectores (componentes principales), y Z es la nueva representación de los datos. Esta técnica permitió representar gran parte de la variabilidad original en tan solo dos dimensiones, facilitando el análisis visual.

2.3.4. Agrupamiento con K-Means

El algoritmo K-Means permite agrupar puntos de datos en clústeres, de forma que los elementos dentro de un mismo grupo tengan características similares entre sí. Se basa en minimizar la distancia entre los puntos y el centroide de su grupo.

Para aplicar esta técnica, se escalaron previamente las variables, luego con el método del codo se determinó un numero adecuado de clústeres, lo que permitió distinguir zonas con distintos niveles de desempeño.

Se expresa como:

$$J = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (2.4)$$

Donde μ_i es el centroide del clúster C_i . En este caso, los resultados del modelo fueron visualizados sobre un mapa del campus, permitiendo identificar zonas óptimas, críticas, intermedias y aceptables en cuanto a calidad de señal y las velocidades observadas.

2.4. Metodologías relevantes

2.4.1. Técnicas de análisis aplicadas

El procesamiento y análisis de los datos obtenidos en terreno se apoyó en un conjunto de técnicas estadísticas y de visualización que permitieron extraer conclusiones significativas sobre la calidad de señal y el rendimiento de las redes LTE evaluadas. Estas herramientas fueron seleccionadas por su capacidad para representar la variabilidad de los datos, detectar comportamientos atípicos, explorar relaciones entre variables y facilitar comparaciones entre operadores.

- Estadística descriptiva: Se calcularon métricas clásicas como media, mediana, desviación estándar, máximos, mínimos, percentiles y rango intercuartílico (IQR) para caracterizar la distribución de los valores medidos por parámetro, ruta y horario. Este análisis permitió una primera visión general del comportamiento de la red.
- Boxplots (gráficos de caja): Se utilizaron para representar visualmente la dispersión y simetría de los datos. Estas representaciones permiten identificar valores atípicos, comparar la variabilidad entre rutas y horarios, y observar diferencias entre operadores móviles de forma clara.
- Mapas de calor georreferenciados: Se generaron mapas que representan espacialmente los valores medidos en el campus universitario, asignando colores a los niveles de parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI y velocidad. Esta técnica permitió identificar zonas críticas y áreas con buen desempeño de forma visual.
- Gráficos de dispersión (scatter plots): Fueron empleados para explorar la relación entre pares de variables, como RSRP y velocidad de bajada.
- Análisis de correlación: Se calcularon matrices de correlación entre variables técnicas para evaluar la fuerza y dirección de las asociaciones entre parámetros de señal y rendimiento. Este análisis fue útil para identificar qué parámetros de señal están más relacionados con el rendimiento de red.
- Regresión lineal: Se aplicaron modelos de regresión para estudiar como las variables de señal (RSRP, RSRQ, RSSI) explican el comportamiento de la velocidad de bajada y de subida.
- Análisis de Componentes Principales (PCA): técnica de reducción de dimensionalidad que transforma el conjunto de variables correlacionadas en un conjunto de componentes ortogonales.
- Clustering: Se implementó el algoritmo K-means para agrupar automáticamente los

puntos de medición con comportamientos similares. Cada clúster resultante representa un tipo de condición de red en función de parámetros como RSRP, RSRQ, RSSI y velocidades, permitiendo interpretar agrupaciones naturales en el comportamiento del servicio.

2.4.2 Justificación del enfoque metodológico

El enfoque metodológico adoptado en esta memoria responde a la necesidad de caracterizar empíricamente el comportamiento de redes móviles LTE en un entorno real, como lo es un campus universitario. Dado el volumen de datos recolectados y la diversidad de parámetros técnicos involucrados, fue fundamental seleccionar herramientas de análisis que permitieran abordar esta complejidad de una forma efectiva. Estas herramientas permitieron

- Describir y comparar el comportamiento de la red entre rutas, horarios y operadores (mediante estadística descriptiva y boxplots).
- Identificar patrones espaciales (a través de mapas de calor georreferenciados).
- Explorar relaciones internas entre variables (usando correlación y regresión lineal).
- Sintetizar información multivariable (mediante análisis de componentes principales).
- Detectar agrupaciones de comportamiento similares (utilizando clustering).
- Analizar la cantidad de celdas que fueron reconocidas por cada punto de medición y como esto afecta al rendimiento (mediante PCI y Cell ID).
- Determinar si una banda de frecuencia está relacionada a mejores o peores valores de velocidad (utilizando EARFCN).

Este conjunto de herramientas permitió realizar una caracterización integral y cuantitativa del servicio LTE, adaptable a otros entornos o tecnologías futuras.

Capítulo 3

Desarrollo

3.1. Organización y estructuración de los datos

Antes de iniciar el procesamiento computacional de los datos, fue fundamental asegurar la correcta recolección de las mediciones en terreno, considerando los desafíos asociados a la variabilidad tanto espacial como temporal del entorno universitario.

Las campañas se realizaron a pie, siguiendo tres rutas predefinidas que abarcan distintas zonas del campus de la Universidad de Concepción. Cada recorrido fue ejecutado en distintas fechas, pero respetando los mismos rangos horarios (mañana, mediodía y tarde) y manteniendo la estructura de las rutas.

Se utilizaron dos dispositivos móviles, uno con tarjeta SIM del operador Entel y otro del operador WOM. Ambos equipos fueron forzados a operar exclusivamente bajo tecnología LTE, evitando cambios de red automáticos y bloqueando conexiones Wi-Fi, con el fin de asegurar la consistencia técnica en todas las mediciones.

Durante cada recorrido, se utilizaron las aplicaciones NetMonster (para WOM), Speedtest (Ookla en Entel, Fast en WOM) e iperf3 (en Entel), con las que se registraron parámetros de señal y rendimiento. La frecuencia de las mediciones fue de entre uno y dos minutos por punto, dependiendo de la herramienta. Las coordenadas GPS se capturaron automáticamente desde las propias aplicaciones. Para garantizar la homogeneidad en la carga de red, todos los recorridos se realizaron en días hábiles, con clima estable y sin presencia de eventos masivos en el campus que pudieran alterar la cantidad de usuarios conectados.

Una vez finalizada la recolección, los datos fueron organizados en estructuras jerárquicas, considerando tres dimensiones principales: operador móvil (Entel o WOM), ruta (1, 2 o 3) y horario (mañana, mediodía o tarde). Esta segmentación permitió mantener la trazabilidad completa de cada muestra y analizar los datos bajo condiciones definidas.

Cada combinación ruta-horario-operador fue tratada como un subconjunto independiente, en el que se agruparon los parámetros técnicos obtenidos: nivel de señal (RSRP, RSRQ, RSSI), velocidades de subida y bajada, latencias, jitter, indicadores de calidad (como CQI o SNR, cuando estuvieron disponibles), EARFCN, PCI, Cell ID y coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud). Se mantuvo una clara distinción entre variables comunes a ambos operadores (como RSRP o velocidades ST) y aquellas exclusivas de uno de ellos (como jitter o latencia promedio de iperf3 en Entel).

Los datos fueron almacenados en estructuras tabulares y listas codificadas por claves únicas (por ejemplo, ruta1_manana, ruta2_tarde, etc.) lo que permitió un acceso flexible y ordenado para análisis posteriores.

3.2. Preparación para el análisis y visualización

Una vez organizados los datos por ruta, horario y operador, se procedió a realizar una etapa de validación y limpieza de los datos para conservar únicamente los registros válidos, ya que algunas mediciones eran incompletas o tenían valores extremos, así asegurando la consistencia de las unidades y preparar los datos para el análisis. Los valores nulos fueron excluidos. El objetivo fue consolidar una base de datos confiable para su análisis.

Tras esta validación, se estructuró la información en subconjuntos específicos para cada combinación de ruta y horario, esto para aplicar análisis comparativos, tanto dentro del operador Entel, o a la hora de compararlo con WOM.

En algunos análisis, fue necesario generar una versión unificada de la base de datos global para cada operador, fusionando todas las rutas y horarios. Esta consolidación fue necesaria para aplicar técnicas que requieren un conjunto amplio de datos, como el PCA y el clustering. Previamente, todas las variables numéricas fueron estandarizadas para evitar sesgos de escala.

Para la construcción de los mapas de calor, los valores técnicos se vincularon directamente con las coordenadas GPS obtenidas. Cada punto fue representado con un marcador en la posición real de la medición en el campus.

Los parámetros técnicos fueron agrupados en tres grandes categorías principales, indicadores de calidad de señal, métricas de rendimiento y variables complementarias.

3.3. Automatización del flujo de trabajo

Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad del análisis y facilitar la generación de visualizaciones y resultados, se implementó un conjunto de scripts de Python por cada sección que se quiso analizar.

Para la generación de gráficos tipo boxplot, se desarrollaron funciones reutilizables capaces de recibir como entrada los datos ya sea por ruta o por horario. Estas funciones permitieron representar parámetros de calidad y rendimiento de forma consistente entre operadores y tramos.

En el caso de los mapas de calor, se programaron scripts por variable que están presentes en las tres franjas horarias definidas. Cada script generaba archivos HTML interactivos, donde los puntos de medición eran representados según el valor registrado.

El análisis de componentes principales (PCA) también fue automatizado a través de un script parametrizado, que permite ejecutar el modelo, generar el gráfico de dispersión y visualizar las cargas de cada componente.

Por otro lado, se implementaron scripts específicos para construir y exportar las matrices de correlación ya sea global o por horario. Junto con los parámetros tradicionales, se incorporó el análisis de identificadores PCI y Cell ID. Estos valores fueron organizados con la misma estructura de rutas y horarios, permitiendo cruzarlos con las variables de rendimiento. Posteriormente, los Cell ID fueron agrupados por rangos para asociarlos a torres específicas, y se exploró su correspondencia con la infraestructura disponible en CellMapper.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Estadísticas Descriptivas

El primer paso en el análisis de los datos recolectados fue el análisis de estadísticas descriptivas, la cual en la siguiente tabla resume los valores de los parámetros RSRP, RSRQ y RSSI medidos en la red LTE del operador Entel. Se presentan la media, mediana y desviación estándar por ruta y horario.

Estos indicadores permiten observar cómo varía la potencia y calidad de señal en diferentes sectores del campus y en distintos momentos del día.

Tabla 4.1: Comparación de la media, mediana y desviación estándar de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario en Entel

Ruta	Horario	Media RSRP (dBm)	Media RSRQ (dB)	Media RSSI (dBm)	Mediana RSRP	Mediana RSRQ	Mediana RSSI	D.E RSRP	D.E RSRQ	D.E RSSI
Ruta 1	Mañana	-90.33	-13.09	-77.7	-91.5	-13.0	-79.0	9.27	1.56	8.57
Ruta 1	Mediodía	-78.7	-13.6	-65.42	-78.0	-13.0	-67.0	9.79	2.0	8.99
Ruta 1	Tarde	-78.74	-13.69	-65.46	-78.0	-14.0	-65.0	10.42	1.95	9.63
Ruta 2	Mañana	-90.11	-13.63	-76.89	-88.0	-14.0	-77.0	10.75	2.01	9.69
Ruta 2	Mediodía	-94.1	-14.43	-79.76	-94.0	-14.0	-81.0	10.56	1.94	10.13
Ruta 2	Tarde	-88.67	-14.0	-75.08	-87.5	-14.0	-73.0	8.9	2.21	8.14
Ruta 3	Mañana	-92.0	-13.8	-78.6	-89.0	-13.0	-77.0	13.73	1.64	12.36
Ruta 3	Mediodía	-96.29	-14.86	-82.14	-102.0	-15.0	-89.0	11.57	1.57	10.38
Ruta 3	Tarde	-95.29	-14.43	-81.57	-100.0	-15.0	-85.0	11.43	1.9	9.5

Los resultados revelan diferencias significativas en la calidad de señal entre rutas, con una clara ventaja en la Ruta 1, especialmente durante el mediodía y la tarde, donde destacan los

valores de RSRP con medias de -78.7 dBm aproximadamente en 2 horarios, clasificándose como una ruta con valores buenos. En contraste, la Ruta 3 muestra condiciones desfavorables, con valores promedio de RSRP que alcanzan hasta los -96.3 dBm, clasificándose como una zona de señal crítica.

Respecto al RSRQ, se observa una tendencia relativamente estable en todas las rutas.

El comportamiento del RSSI sigue una tendencia similar a la de RSRP, lo que es esperable dado que ambos parámetros están relacionados con la intensidad de la señal recibida. Sus valores son más variables y en general más altos.

Las desviaciones estándar muestran una mayor dispersión de valores, especialmente en la mañana, lo que indica menor estabilidad.

Ahora se presentan los valores medios y centrales de velocidad para el operador Entel, considerando mediciones realizadas con iperf3 y Ookla Speedtest.

Tabla 4.2: Comparación de media y mediana de velocidades de bajada y subida por ruta y horario entre Entel (iperf3 y Speedtest)

Ruta	Horario	Media Bajada iperf3	Media Bajada ST	Media Subida iperf3	Media Subida ST	Mediana Bajada iperf3	Mediana Bajada ST	Mediana Subida iperf3	Mediana Subida ST
Ruta 1	Mañana	6.04	6.91	8.66	12.37	4.3	5.0	5.26	9.88
Ruta 1	Mediodía	5.24	5.26	7.11	10.69	3.84	4.86	6.49	11.2
Ruta 1	Tarde	6.65	7.5	9.81	11.94	4.61	5.19	6.49	9.25
Ruta 2	Mañana	5.59	6.15	7.47	7.27	2.94	1.48	4.1	4.24
Ruta 2	Mediodía	5.51	4.96	8.5	8.5	2.45	1.82	5.23	6.14
Ruta 2	Tarde	6.24	7.26	8.78	10.01	4.14	3.09	8.21	9.09
Ruta 3	Mañana	5.7	6.59	4.97	9.71	3.01	3.99	4.32	7.79
Ruta 3	Mediodía	3.14	4.19	6.3	4.08	2.21	2.71	3.39	2.15
Ruta 3	Tarde	2.34	3.56	2.6	5.74	2.1	3.53	2.32	1.3

En general, se observa que las velocidades obtenidas con Speedtest tienden a ser más altas que las medidas con iperf3. Esto puede ser por la selección de servidores cercanos o por el tipo de tráfico generado.

En la Ruta 1, se alcanzan las mejores velocidades promedio tanto en bajada como en subida. Durante la tarde, las velocidades superan los 6.6 Mbps y 7.5 Mbps en iperf3 y Ookla respectivamente, en bajada, y se elevan a más de 9.8 Mbps y 11.9 Mbps en subida. Estos valores reflejan un buen nivel de servicio, con capacidad suficiente de sostener tráfico exigente.

En la Ruta 2, el rendimiento es similar, aunque disminuye un poco en especial en los valores del Speedtest. En la Ruta 3 se muestra el desempeño más limitado. Las velocidades apenas

superan los 2.3 Mbps (iperf3) y 3.5 Mbps (Speedtest) en la tarde. La tendencia sugiere que la cobertura en esta zona es deficiente o que existe mayor interferencia o saturación.

Contrario a lo esperado, la tarde es el mejor horario para las rutas 1 y 2, mientras que la mañana para la Ruta 3.

Tabla 4.3: Comparación de desviación estándar y percentil 75 de velocidades de bajada y subida por ruta y horario en Entel (iperf3 y Speedtest)

Ruta	Horario	D.E Bajada iperf3	D.E Bajada ST	D.E Subida iperf3	D.E Subida ST	Perc 75 Bajada iperf3	Perc 75 Bajada ST	Perc 75 Subida iperf3	Perc 75 Subida ST
Ruta 1	Mañana	4.46	6.22	8.59	10.01	8.29	9.27	11.99	16.38
Ruta 1	Mediodía	3.82	3.28	4.13	4.13	6.42	7.14	9.53	13.5
Ruta 1	Tarde	5.56	5.55	8.74	7.9	8.97	9.49	12.17	14.15
Ruta 2	Mañana	7.79	9.39	9.29	7.2	5.4	5.6	6.31	8.97
Ruta 2	Mediodía	9.56	6.17	10.92	9.25	4.93	7.37	10.97	9.9
Ruta 2	Tarde	5.68	8.89	7.34	7.22	9.83	7.59	10.41	12.83
Ruta 3	Mañana	7.3	6.25	2.32	8.07	3.3	6.1	4.73	14.7
Ruta 3	Mediodía	2.81	4.0	6.05	5.0	3.55	5.96	9.9	4.87
Ruta 3	Tarde	1.99	2.35	1.05	7.43	2.73	5.1	2.68	8.88

La Ruta 1 muestra las mayores velocidades en general, pero también evidencia una alta variabilidad en varios tramos, especialmente en subida durante la mañana y tarde. Esto indica que, aunque el rendimiento promedio es alto, existen diferencias notables entre puntos medidos. Además, presenta también elevados valores de P75, con velocidades que superan hasta los 16.38 Mbps en subida según Speedtest. Por lo que valores altos y una alta dispersión.

La Ruta 2 presenta un comportamiento más inestable, se observan desviaciones estándar muy elevadas, en especial en el horario del mediodía, mientras que la ruta 3 presenta los valores más bajos tanto en desviación como en percentil 75, por lo que el desempeño es uniformemente bajo.

Este análisis demuestra de que no basta con observar promedios, sino que la variabilidad es importante en cada ruta al mostrar picos de tráfico o fluctuaciones de red dentro de la misma, o reafirma como en el caso de la Ruta 3, que incluso los mejores tramos dentro de esa ruta alcanzan niveles aceptables de servicio.

La siguiente tabla resume los valores promedio de latencias en estado idle, durante descarga, durante subida, latencia promedio y jitter medidos en la red de Entel.

Tabla 4.4: Promedios de latencias y jitter por ruta y horario en la red LTE de Entel

Ruta	Horario	Latencia Idle (ms)	Latencia Download (ms)	Latencia Upload (ms)	Latencia Promedio iperf3(ms)	Jitter iperf3 (ms)
Ruta 1	Mañana	76.74	2340.38	1225.78	55.73	55.86
Ruta 1	Mediodía	52.67	2254.7	885.63	44.53	56.05
Ruta 1	Tarde	44.6	1921.34	678.8	34.81	29.31
Ruta 2	Mañana	385.53	2710.63	1799.84	163.8	201.5
Ruta 2	Mediodía	116.24	3128.43	1384.76	64.56	58.92
Ruta 2	Tarde	125.54	2628.5	1354.83	76.1	67.23
Ruta 3	Mañana	116.8	2592.8	1713.0	211.79	207.54
Ruta 3	Mediodía	95.29	2455.43	1849.14	175.13	167.64
Ruta 3	Tarde	163.43	3776.43	2050.71	172.24	179.33

Los resultados muestran una clara diferencia entre rutas. La Ruta 1 presenta los mejores valores de latencia y jitter en todos los horarios, con latencias promedio por debajo de 56 ms y el jitter con valores moderados, especialmente en la tarde, donde se observa el mejor desempeño general (latencia promedio de 34.81 ms y jitter de 29.31 ms).

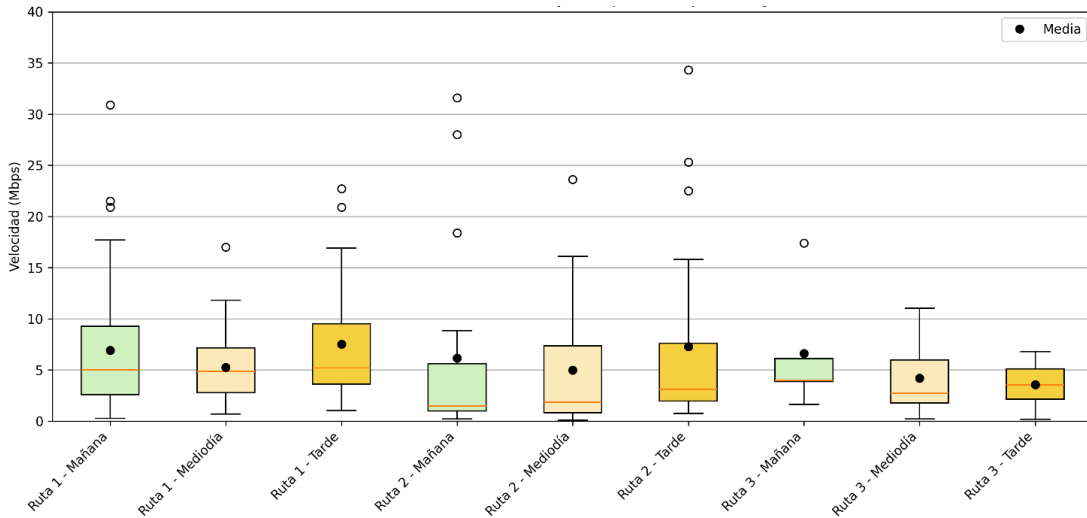
En contraste, la Ruta 3 presenta claramente el peor desempeño en términos de retardo y estabilidad con valores que superan los 170 ms en iperf3 y más de 200 ms de jitter durante la mañana, lo que indica una conexión inestable con valores elevados de retardo. La situación se mantiene crítica durante el mediodía y la tarde, sin evidencias de mejora.

Los resultados evidencian que tanto la latencia como el jitter son altamente dependientes de la ruta y el horario.

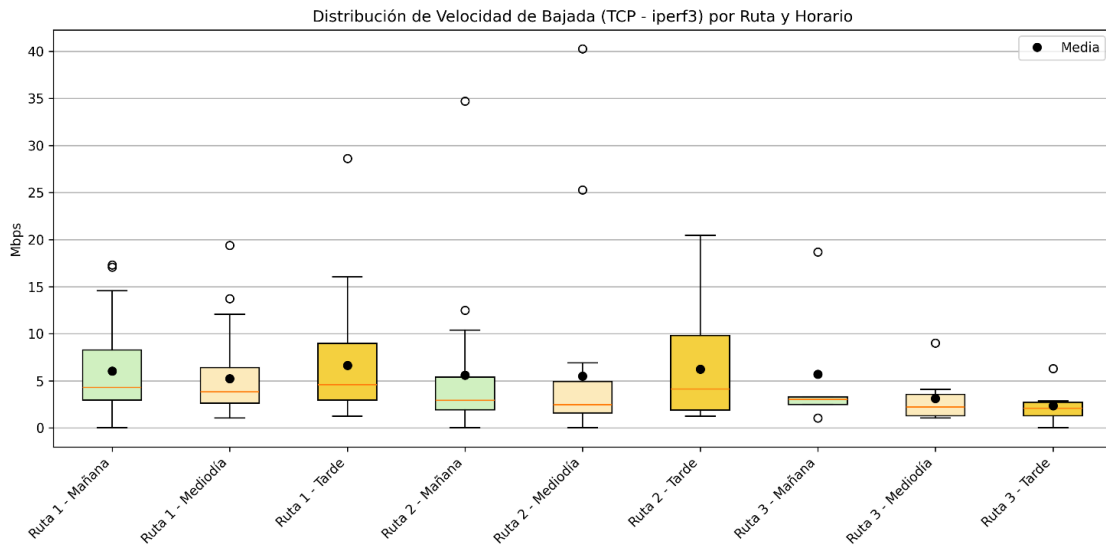
4.2. Análisis de velocidades y latencias

4.2.1. Análisis de velocidades de bajada

4.2.1.1 Análisis de boxplots de velocidad de bajada



(a) Velocidad medida por Speedtest



(b) Velocidad medida por iPerf3

Fig. 4.1 Boxplots de Velocidad de Bajada por Ruta y Horario

En general, las velocidades de bajada medidas con Speedtest, fueron consistentemente más altas que las medidas con iPerf3.

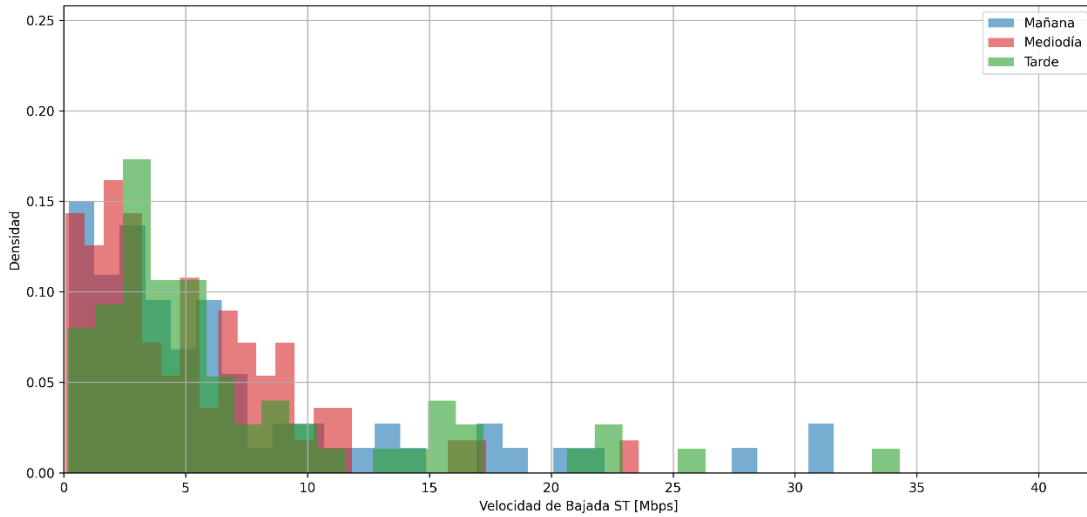
La Ruta 1 presentó el mejor rendimiento global, especialmente en la tarde, aunque es la que más varía junto a la Ruta 2.

Por otro lado, la Ruta 3 destaca por registrar las velocidades de bajada más bajas, especialmente durante los horarios de mediodía y tarde, donde las cajas muestran valores en rangos bajos y con menor dispersión, aunque también está relacionado a que es la ruta con menor cantidad de mediciones.

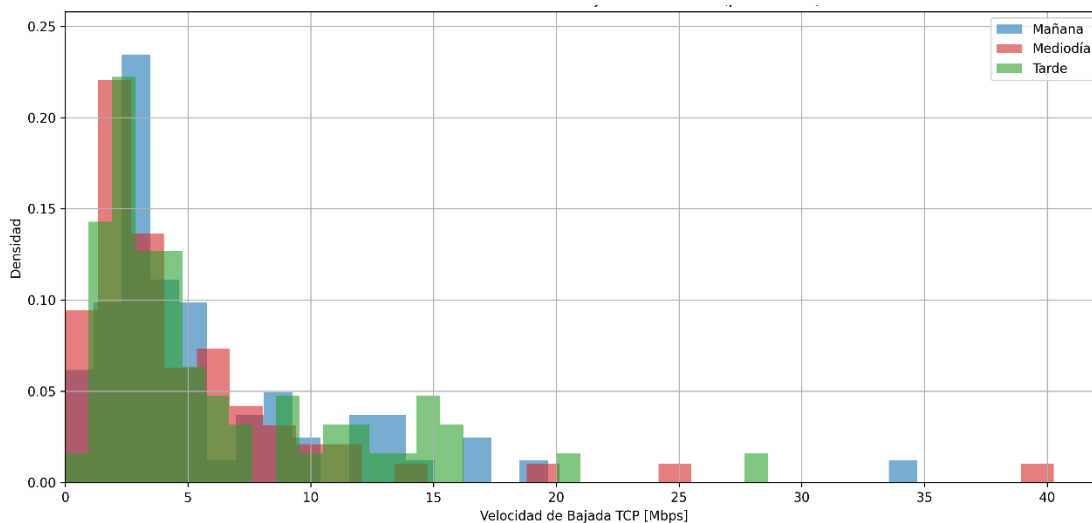
Respecto a la variabilidad horaria, se aprecia que en las tres rutas evaluadas existe una tendencia a obtener mejores resultados durante el horario de la mañana considerando las 3 rutas, aunque la media en la tarde es más alta en algunas rutas.

4.2.1.2. Análisis de histogramas de velocidad de bajada

Además, se incorporan histogramas que representan la distribución de la velocidad de bajada medidas con ambas herramientas (iperf3 y Speedtest), diferenciadas por horario.



(a) Velocidad medida por Speedtest



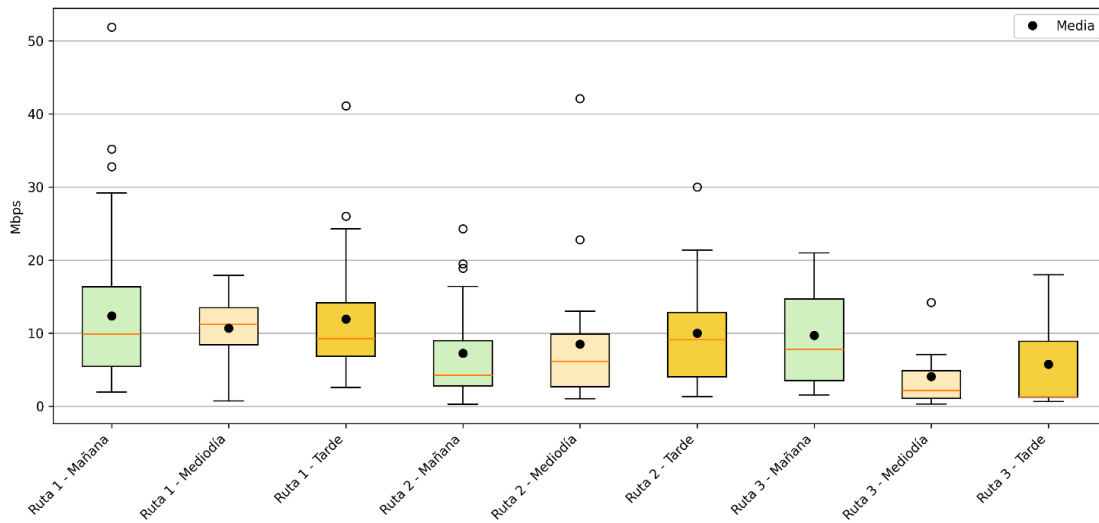
(b) Velocidad medida por iperf3

Fig. 4.2 Histogramas de Velocidad de Bajada por Horario

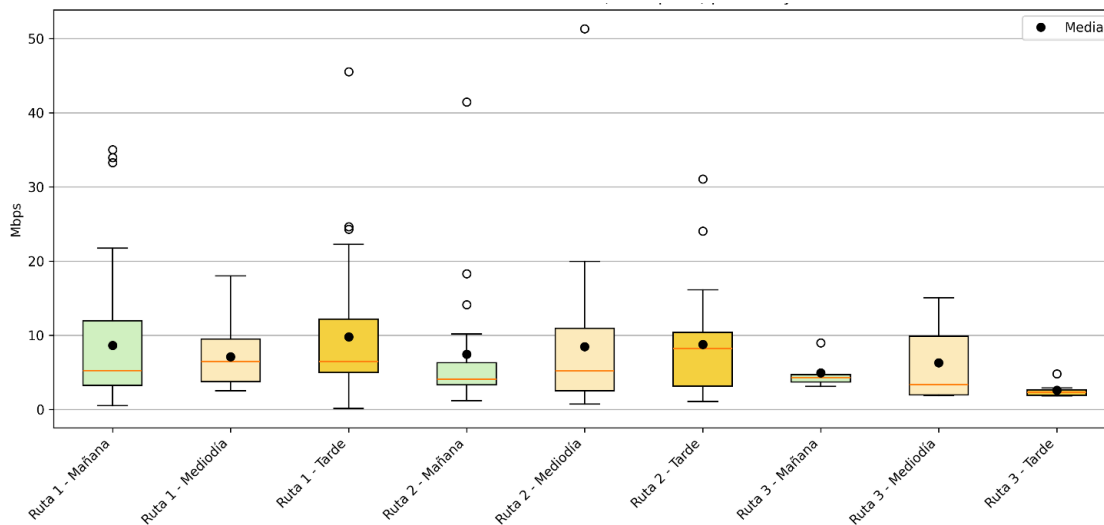
La distribución de Speedtest se muestra más compacta, con la mayoría de los valores concentrados entre 0 y 9 Mbps, aunque en algunos casos aparecen valores altos, especialmente en la mañana, por lo que si hay eventos puntuales de buen desempeño. Las mediciones con iperf3 presenta alta concentración en los primeros 3 a 5 Mbps con colas largas hacia la derecha que muestra variabilidad. La tarde muestra una distribución algo más uniforme, pero no tan alta como la mañana.

4.2.2. Análisis de velocidades de subida

4.2.2.1 Análisis de boxplots de velocidad de subida



(a) Velocidad medida por Speedtest



(b) Velocidad medida por iPerf3

Fig. 4.3 Boxplots de Velocidad de Subida por Ruta y Horario

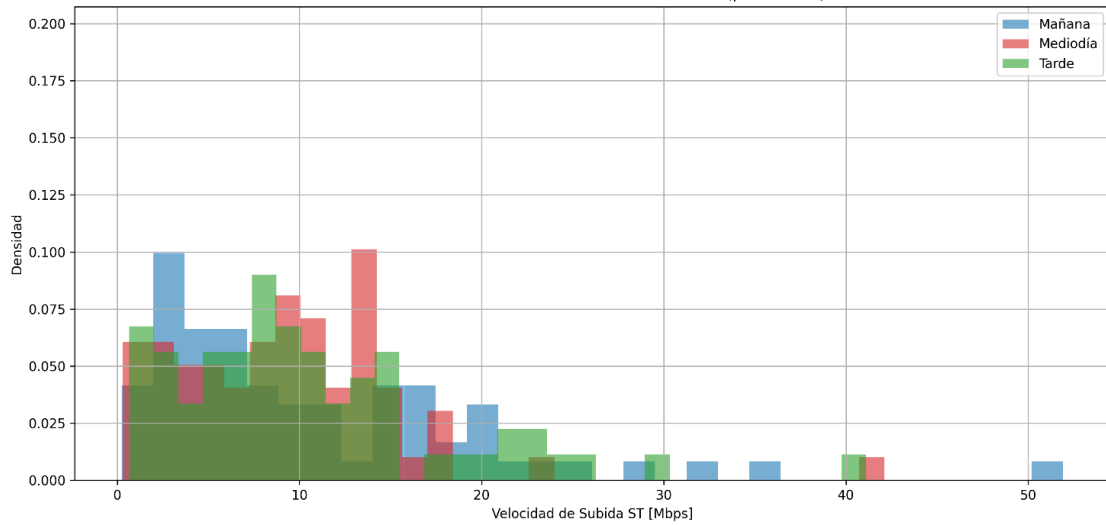
El comportamiento de la velocidad de subida sigue un patrón similar al de bajada, con Speedtest entregando valores más altos en casi todos los escenarios. Los resultados de los boxplots indican nuevamente que la Ruta 1 mantiene los mejores valores de rendimiento, particularmente en el horario de la mañana y tarde, con mejores valores promedio.

En la Ruta 2, el horario de la tarde destaca con un notable aumento en las medianas. En la Ruta 3 se muestran velocidades reducidas en todos los horarios, con baja dispersión, lo que

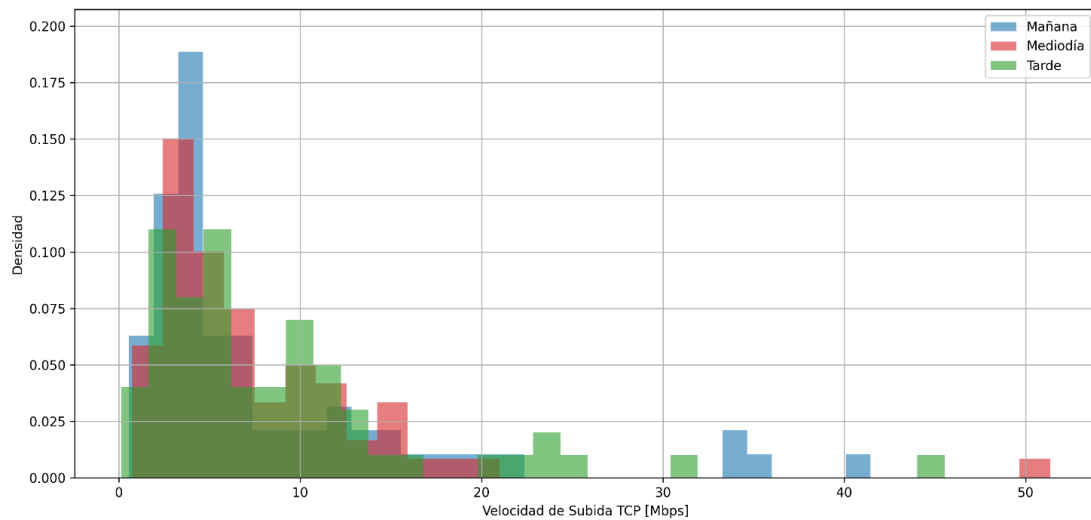
indica un servicio limitado y uniforme.

Generalmente, se observa que la mañana ofrece condiciones más favorables para la velocidad de subida.

4.2.2.2. Análisis de histogramas de velocidad de subida



(a) Velocidad medida por Speedtest



(b) Velocidad medida por iperf3

Fig. 4.4 Histogramas de Velocidad de Subida por Horario

La distribución de Speedtest abarca un rango más amplio, con varios valores aislados que incluso superan los 40 Mbps. Sin embargo, durante la tarde, los valores tienden a concentrarse en tramos más bajos. En contraste, los resultados de iperf3 se concentran en el rango de 2 a 5 Mbps, con algunas excepciones en la mañana. Esto sugiere que el rendimiento de la velocidad de subida se degrada a lo largo del día de manera progresiva.

4.2.3. Análisis de latencia promedio

4.2.3.1. Análisis de boxplots de latencia

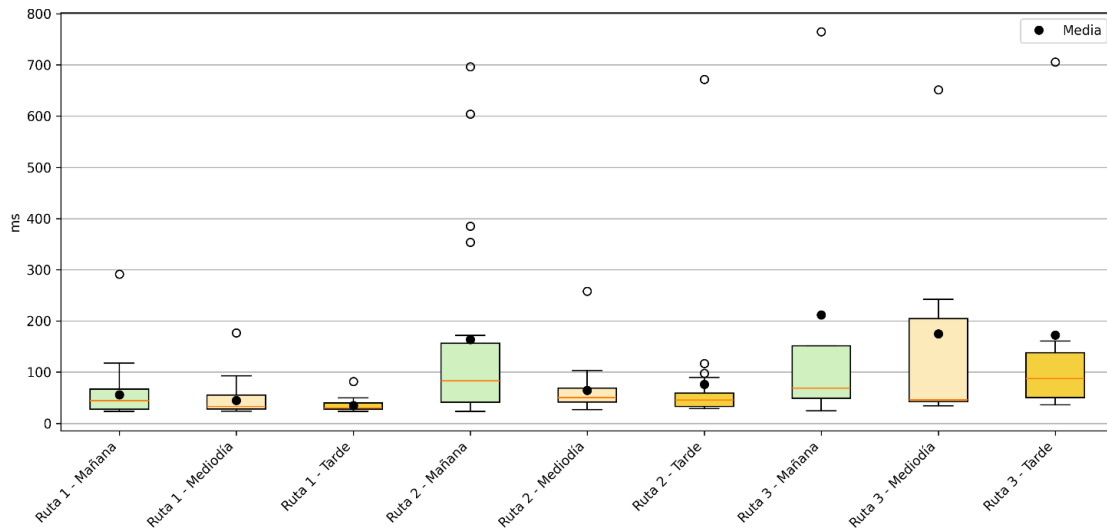


Fig. 4.5 Boxplots de Latencia promedio por Ruta y Horario

En Ruta 1, la latencia tiende a disminuir progresivamente desde la mañana hacia la tarde, alcanzando los mejores resultados en el último horario. En Ruta 2, se observan latencias elevadas y dispersas durante la mañana, mientras que al mediodía y tarde los valores son notablemente inferiores y más estables.

En la Ruta 1, los resultados fueron favorables, la latencia disminuye progresivamente desde la mañana hacia la tarde, alcanzando los mejores valores en este último horario. En Ruta 2, se observan latencias diversas, con una gran dispersión en la mañana y mejores valores al avanzar el día.

La Ruta 3 muestra los peores resultados, con medias que superan los 170 ms en todos los horarios y un comportamiento desfavorable. Además, las distribuciones son amplias, con medias muy alejadas de las medianas, sugiriendo valores extremos.

En general, los resultados indican que la latencia presenta un valor más alto, por ende, peor en el horario de la mañana.

4.2.3.2. Análisis de histograma de latencia por horario

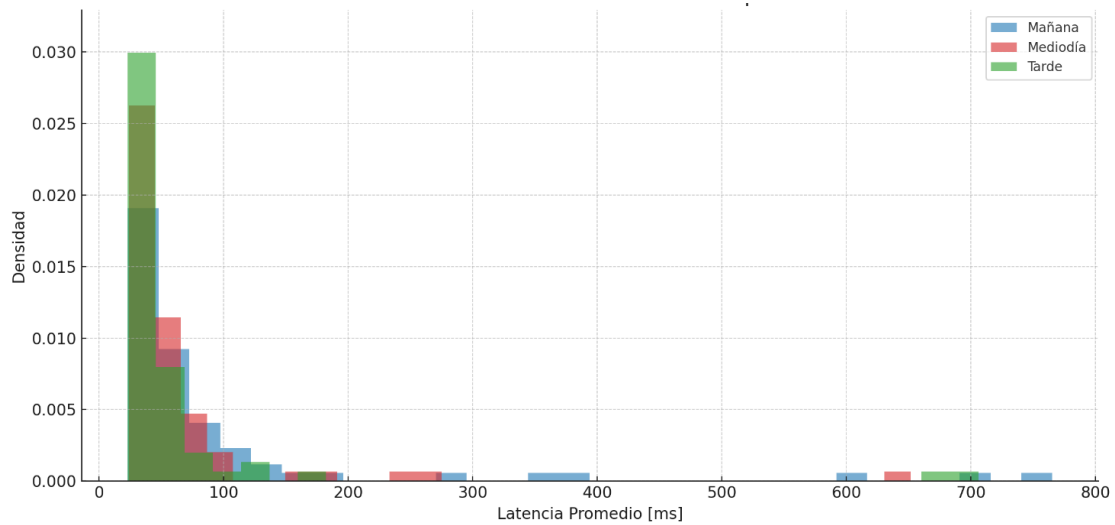


Fig. 4.6 Histograma de Latencia promedio por Horario

Se confirma que en el horario de la mañana los valores son más altos, aunque la mayoría de los valores están entre 0 y 100 ms, la distribución dice que hay mayor cantidad de valores bajos para el horario de la tarde y el mediodía, dejando valores extremos más notorios para el horario de la mañana.

4.2.4. Análisis de jitter

4.2.4.1. Análisis de boxplots de jitter

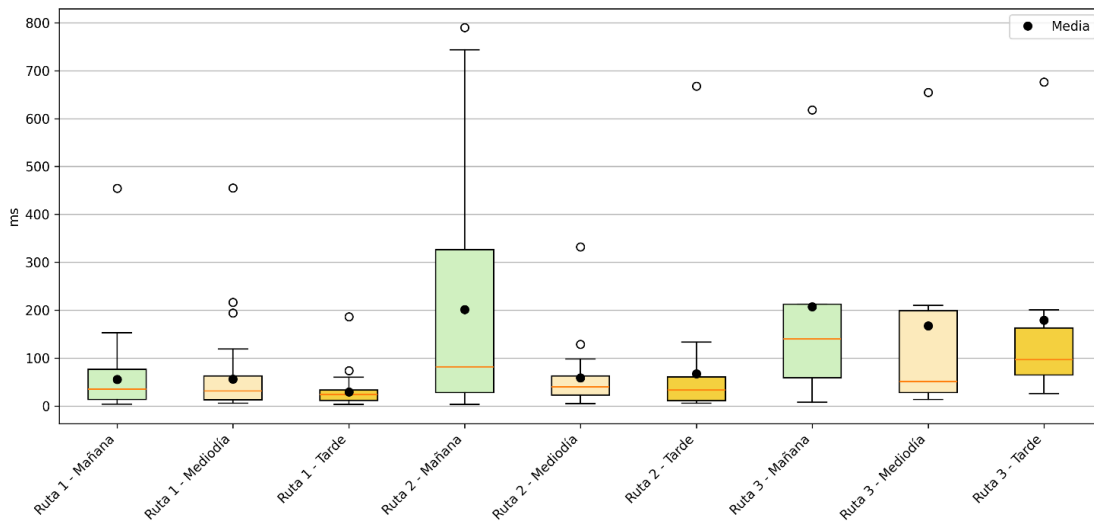


Fig. 4.7 Boxplots de Jitter por Ruta y Horario

En la Ruta 1 se observan los niveles más bajos y estables de jitter. Las medias y medianas se mantuvieron por debajo de 60 ms en todos los horarios, y la dispersión es reducida considerablemente. Este comportamiento refuerza el buen desempeño observado en latencia. La Ruta 2 presentó resultados críticos en la mañana, con jitter muy elevado y una gran dispersión. Esto combinado con una alta latencia en el mismo horario, refleja un escenario muy inestable. Luego se observan mejoras notables en el mediodía y tarde. La ruta 3 mantiene jitter elevado durante todo el día, además de tener una diferencia de media y mediana considerable, reflejando alta variabilidad.

4.2.4.2. Análisis de histograma de jitter

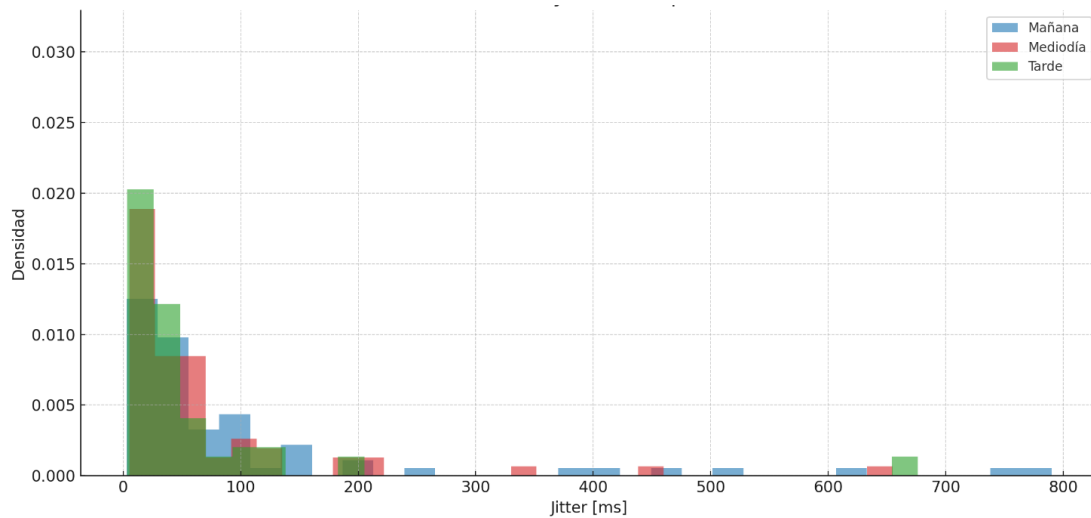


Fig. 4.8 Histograma de jitter por Horario

La distribución del jitter muestra una concentración de valores en el rango de 1 a 50 ms, especialmente durante el mediodía, donde la curva es más estrecha y simétrica en torno a los 15 ms. Sin embargo, en la mañana la dispersión aumenta considerablemente.

En conjunto, estos resultados evidencian que, si bien el jitter es mayoritariamente controlado, existen periodos del día principalmente en la mañana donde se indican eventos de inestabilidad que podrían impactar negativamente la experiencia del usuario.

4.3. Calidad de señal

La calidad de señal en redes móviles LTE es un aspecto fundamental para determinar el nivel de servicio percibido por los usuarios. Parámetros como la potencia de señal recibida (RSRP), la calidad de la señal respecto al ruido (RSRQ) y la intensidad total recibida (RSSI) permiten caracterizar las condiciones del canal, lo que impacta directamente en la estabilidad y en el rendimiento.

El análisis se realiza mediante gráficos de distribución (boxplots) y mapas de calor georreferenciados, permitiendo caracterizar la variabilidad espacial y temporal de cada parámetro.

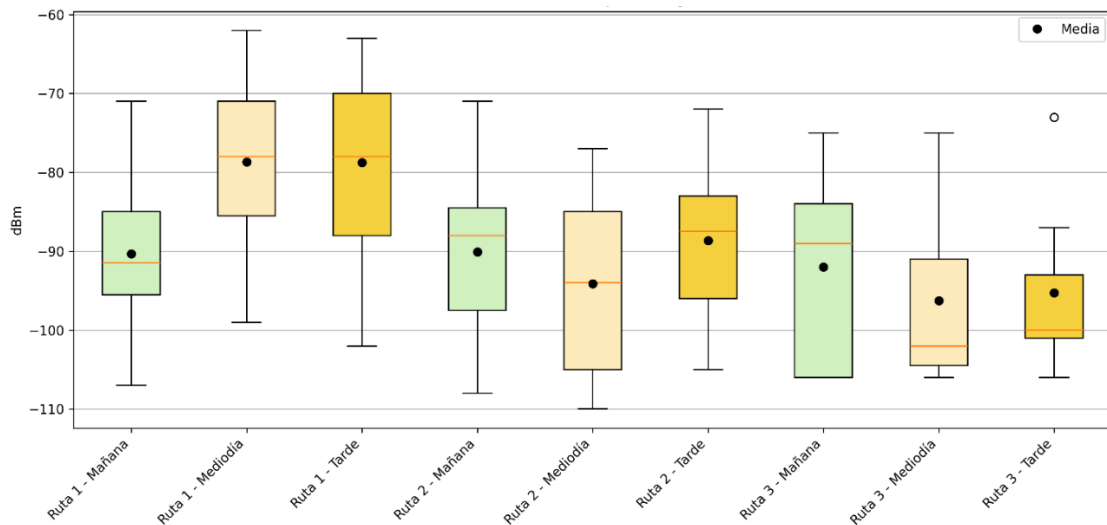
Para conocer los valores considerados como excelentes, buenos, decentes o muy malos, se consideran los valores de la siguiente tabla:

Tabla 4.5: Criterios de calidad para parámetros RSRP, RSRQ y RSSI

Calidad	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSI (dBm)
Excelente	> -80	> -10	> -65
Buena	-80 a -90	-10 a -15	-65 a -75
Decente a mala	-90 a -100	-15 a -20	-75 a -95
Muy mala	< -100	< -20	< -95

4.3.1. Análisis de RSRP

4.3.1.1. Análisis de boxplots de RSRP

**Fig. 4.9** Boxplots de RSRP por Ruta y Horario

Los resultados reflejan diferencias claras entre las rutas evaluadas. La Ruta 1 destaca por mostrar valores cercanos a -78 dBm en el mediodía y la tarde, demostrando excelentes valores. Por el contrario, la Ruta 3 presenta una señal débil con los valores de RSRP más bajos, y con una dispersión considerable, especialmente en la mañana. La Ruta 2 tiene un comportamiento intermedio.

4.3.1.2. Análisis de mapas de calor de RSRP por horario

Complementando el análisis estadístico, los mapas de calor del RSRP permiten visualizar la distribución espacial de la señal.



Fig. 4.10 Mapa de calor de RSRP en horario de mañana

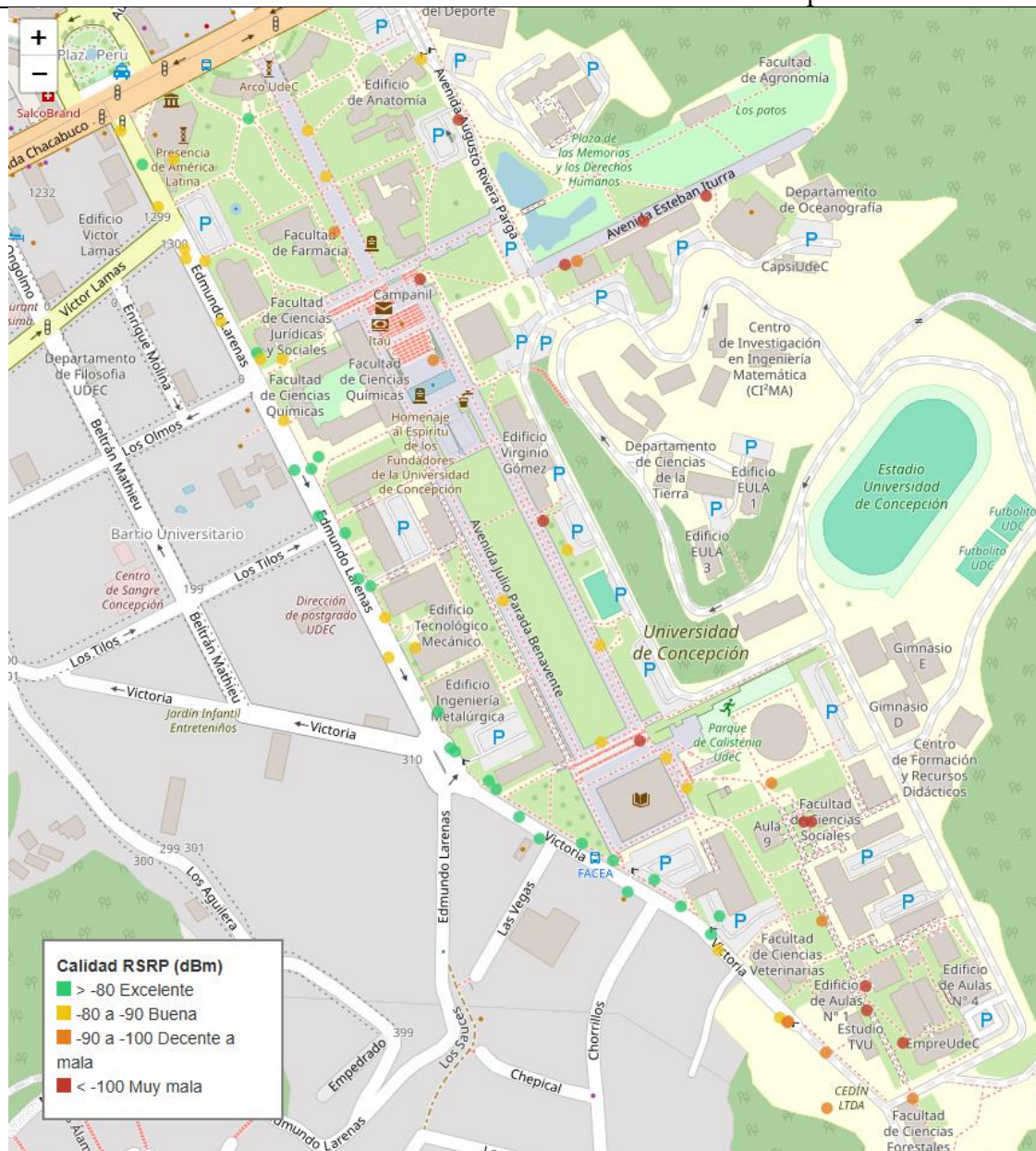


Fig. 4.11 Mapa de calor de RSRP en horario de mediodía

Durante la mañana hay una mayor proporción de zonas con señal deficiente, con zonas clasificadas como decente a mala. Se observan sectores puntuales de muy mala cobertura principalmente en los extremos del área medida. En el mediodía la cobertura mejora visiblemente, con amplias áreas de buena cobertura. Predominan zonas consideradas buenas para RSRP y algunas consideradas excelentes. En la tarde se consolida esta mejora, donde la cobertura se estabiliza y las zonas críticas se reducen, aunque aún aparecen en sectores periféricos.

4.3.2. Análisis de RSRQ

4.3.2.1. Análisis de boxplots de RSRQ

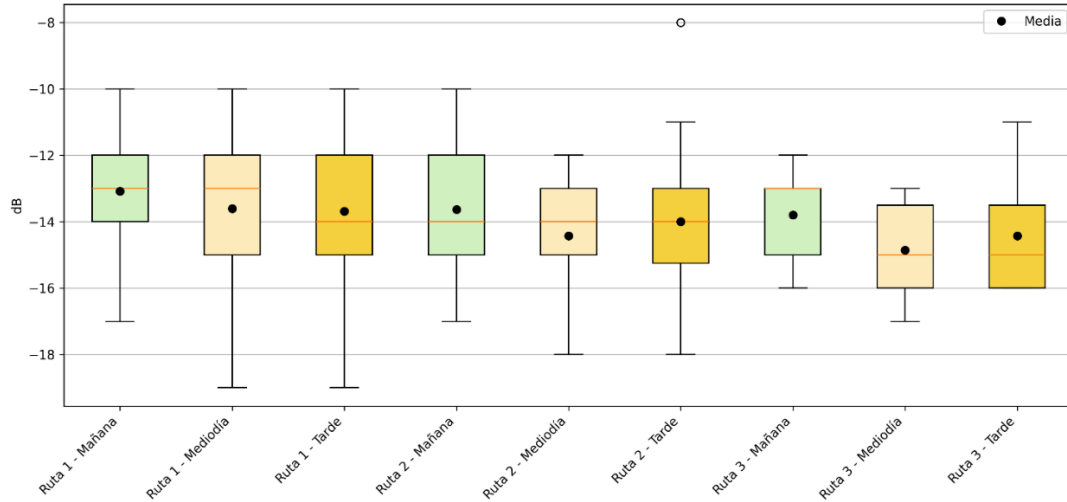


Fig. 4.13 Boxplots de RSRQ por Ruta y Horario

El RSRQ presenta un comportamiento más estable y uniforme entre rutas y horarios. La mayoría de los valores se concentran entre -13 y -15 dB, lo cual se traduce en una calidad buena.

La Ruta 1 muestra las mejores condiciones promedio, donde las medias se acercan a los -13 dB. En cambio, las Rutas 2 y 3 presentan valores más bajos sin llegar a niveles críticos.

4.3.2.2. Análisis de mapas de calor de RSRQ

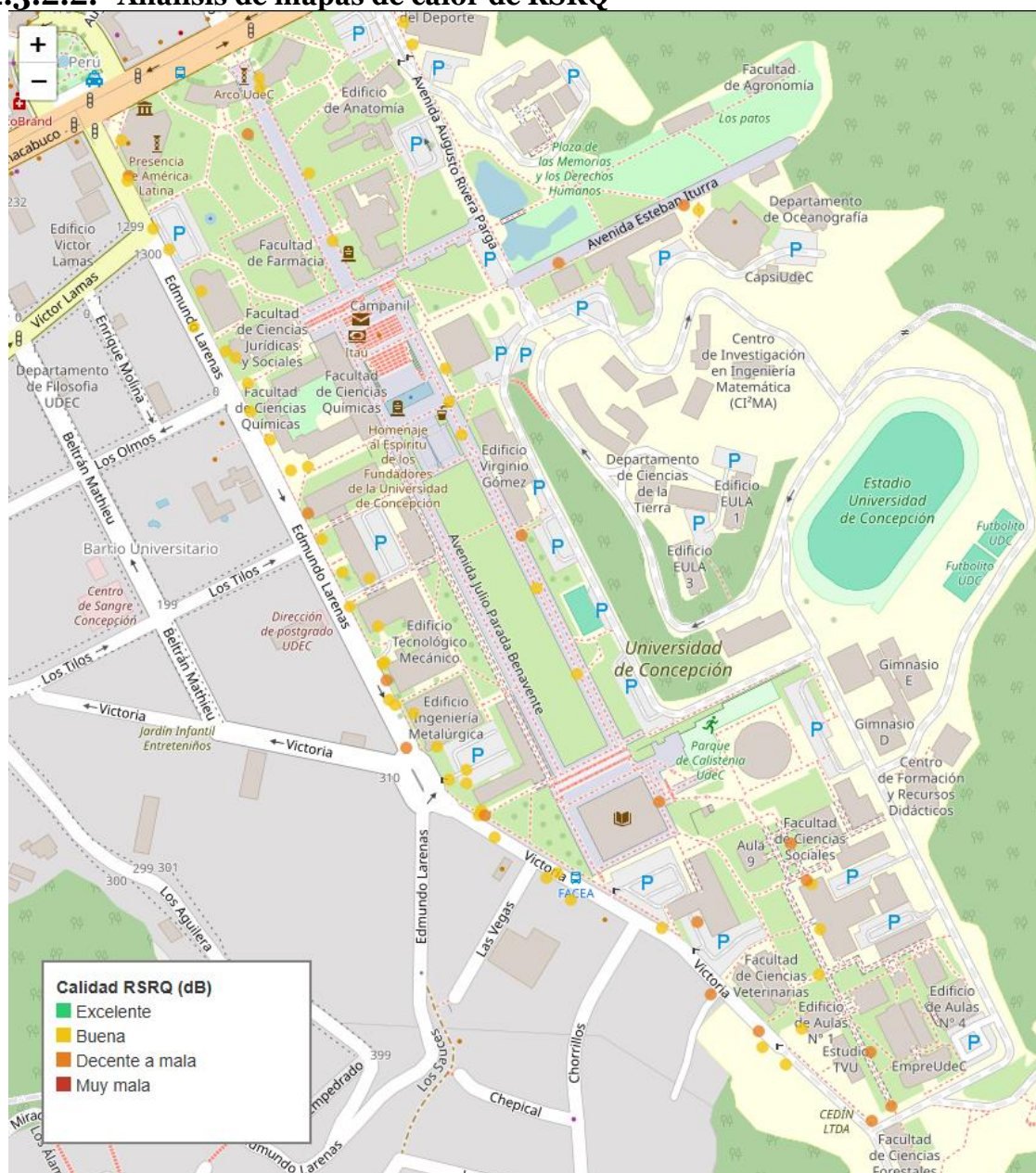


Fig. 4.14 Mapa de calor de RSRQ en horario de mañana

43

La calidad de RSRQ es favorable en la mayor parte del campus. Durante la mañana se destacan zonas de buena calidad, especialmente en el eje central del campus (Foro, Ingeniería, Ciencias) mientras que en mediodía y tarde se mantiene una distribución similar, aunque con leve aumento de sectores clasificados como decentes a malos.

4.3.3. Análisis de RSSI

4.3.3.1. Análisis de boxplots de RSSI

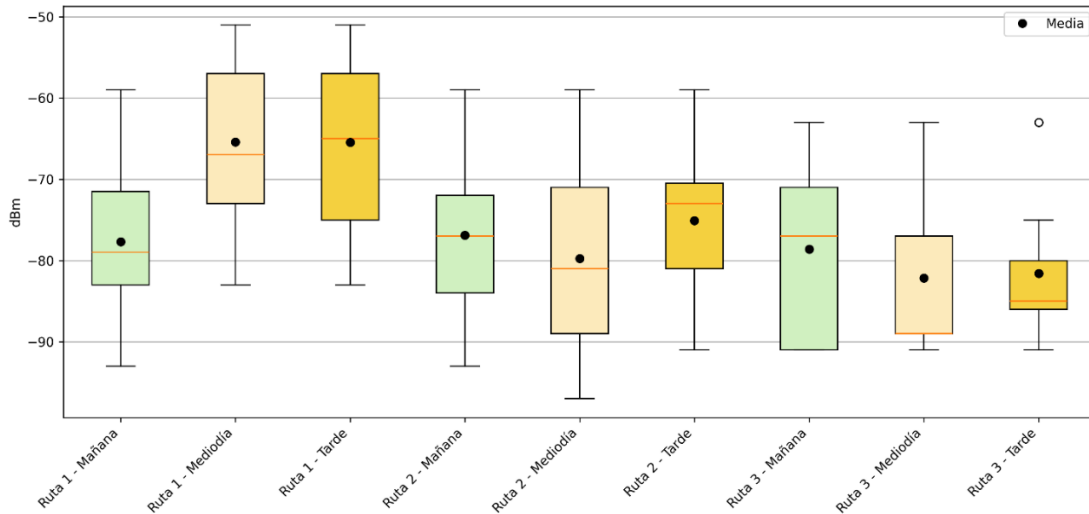


Fig. 4.17 Boxplots de RSSI por Ruta y Horario

En el análisis de distribución de RSSI, se observa que los comportamientos generales mantienen una tendencia similar a los patrones previamente detectados en RSRP. Los mejores valores de RSSI se concentran en la Ruta 1, particularmente durante el mediodía y la tarde. La media durante el mediodía en esta ruta alcanza aproximadamente los -65 dBm, representando condiciones de señal favorables. Por su parte, la Ruta 3 confirma el patrón de peor desempeño en términos de calidad de señal.

4.3.3.2. Análisis de mapas de calor de RSSI

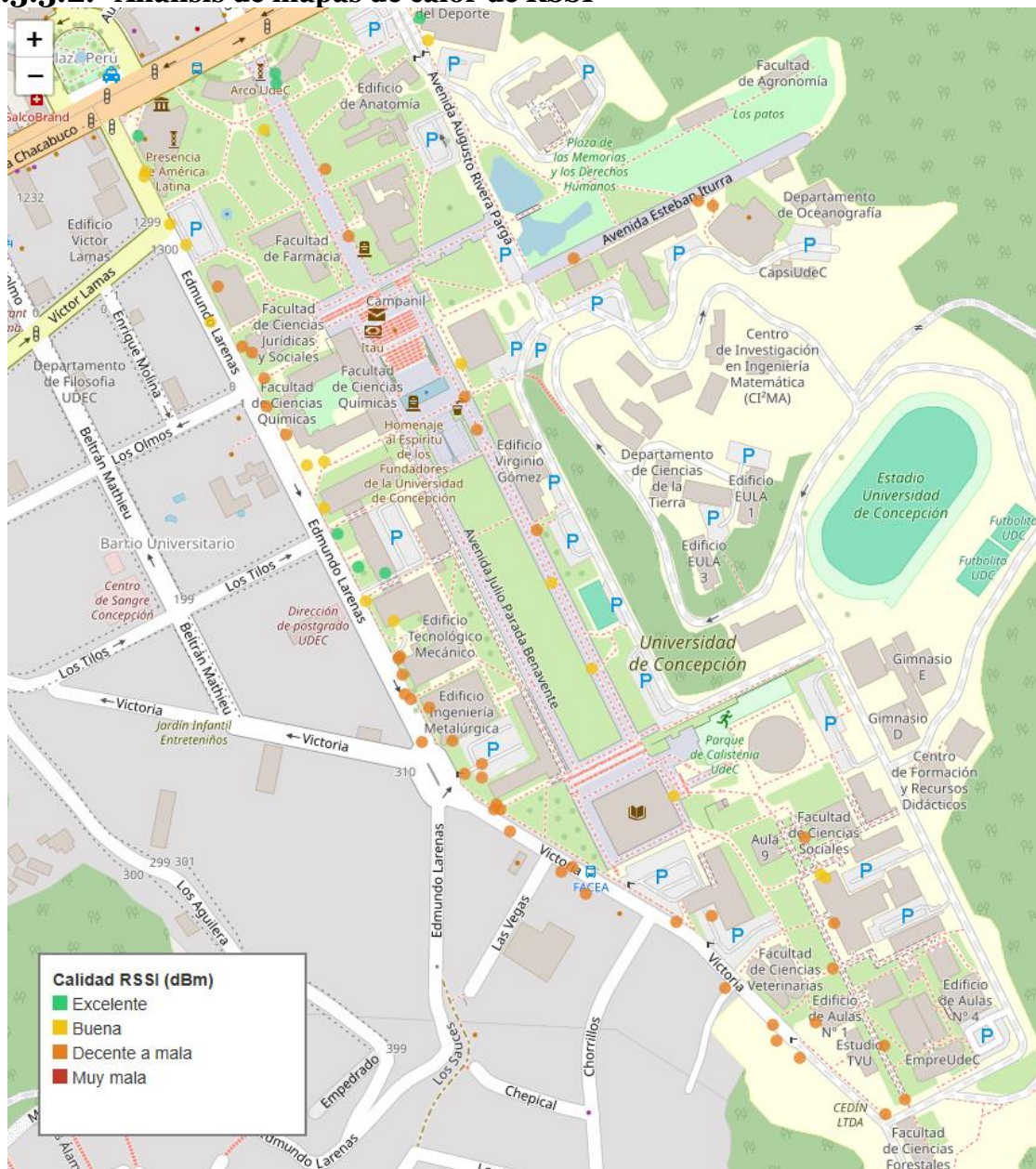


Fig. 4.18 Mapa de calor de RSSI en horario de mañana

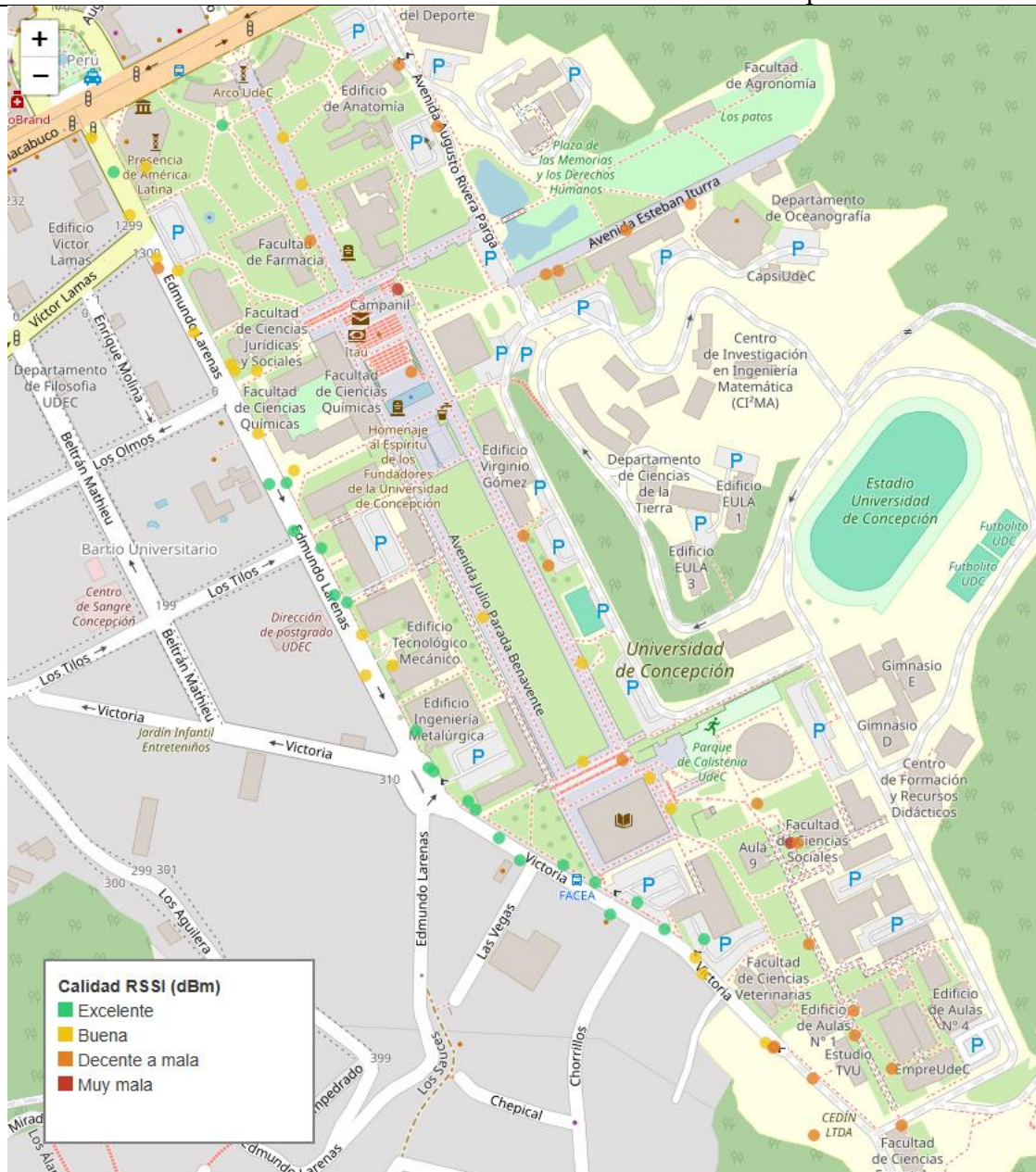


Fig. 4.19 Mapa de calor de RSSI en horario de mediodía

Durante la mañana, predominan puntos de calidad decente a mala en gran parte del campus, lo cual es consistente con los valores más negativos de los boxplots. En el mediodía, se aprecia una notable mejora en la cobertura, esto se ve en el incremento de puntos verdes y amarillos en sectores como la Facultad de Ingeniería y los alrededores de la Biblioteca Central. Finalmente, durante la tarde, se mantienen valores buenos a excelentes en las zonas medias de la Universidad, en donde los extremos muestran los valores considerados decentes a malos.

48

condiciones de señal a lo largo del día, especialmente al mediodía, mientras que la Ruta 3 es el sector más desfavorecido, con baja intensidad de señal y alta variabilidad.

Respecto a los horarios, el mediodía se perfila como el horario de mejor desempeño general, mientras que la mañana concentra las mayores deficiencias en términos de señal.

4.4. Correlaciones entre variables

La matriz de correlación permite evaluar si existen relaciones significativas entre parámetros de calidad y rendimiento. A partir de la matriz de correlación global, se observan patrones consistentes entre todos los datos medidos en la red LTE de Entel.

4.4.1. Matriz de Correlación Global

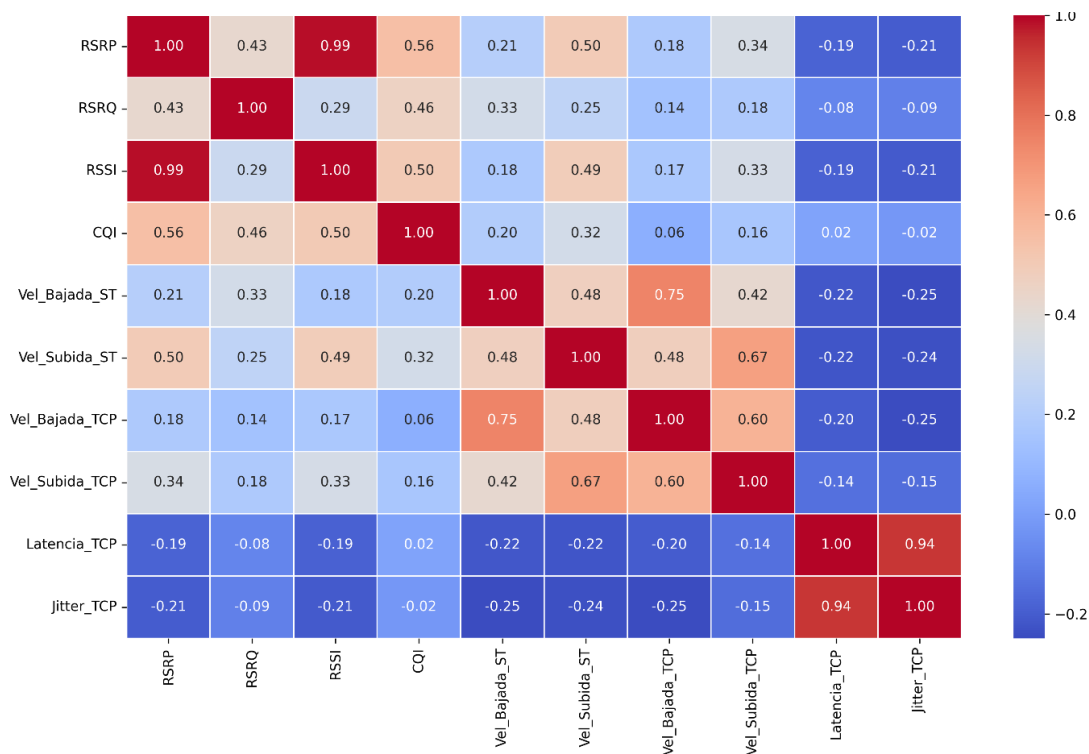


Fig. 4.21 Matriz de Correlación Global entre Parámetros de Red LTE (Entel)

Como primer punto, destaca la correlación casi perfecta entre RSRP y RSSI, lo cual es coherente, ya que ambos reflejan el nivel de potencia recibido, aunque a través de diferentes componentes de la señal. Esto sugiere que, en análisis posteriores, podría bastar considerar solo uno de ellos.

Cuando se examina la relación entre los parámetros de calidad de señal (RSRP, RSRQ) y las velocidades de bajada y subida (medidas tanto por Speedtest como por iperf3), se observa una correlación moderada en el mejor de los casos. Esto indica que, si bien una mejor señal tiende a favorecer mayores velocidades, existen otros factores que reducen la dependencia directa entre estas variables. El análisis conjunto de calidad de señal y velocidad es válido siempre y cuando se consideren otros factores significativos, si es directamente no tiene mucho sentido.

Se observa una buena correlación positiva tanto entre las velocidades de bajada medidas en iperf3 y Speedtest, y las velocidades de subida de ambas mediciones, en donde se puede ver que hay sentido entre estas mediciones que, con sus diferencias, muestran algo similar y se pueden considerar herramientas útiles para visualizar este tipo de mediciones en tiempo real. Respecto a la latencia y el jitter, los resultados muestran una correlación alta entre estos dos indicadores, reflejando que condiciones de red inestables afectan ambos parámetros de manera simultánea. Por otro lado, las latencias promedio presentan correlaciones negativas con las velocidades, aunque tampoco son claras, pero pueden dar la idea de que, a mayor latencia, se registran menores velocidades. Con el jitter se observan casi los mismos valores. Finalmente, la correlación entre CQI y los parámetros de velocidad es también moderada. Esto confirma que, aunque CQI refleja condiciones de enlace más favorables, su impacto en las tasas de transferencia puede estar atenuado por otros elementos de la red.

4.4.2. Comparación entre horarios

Al segmentar los resultados por franja horaria, se observan ligeras diferencias en la intensidad de las correlaciones entre las variables medidas.

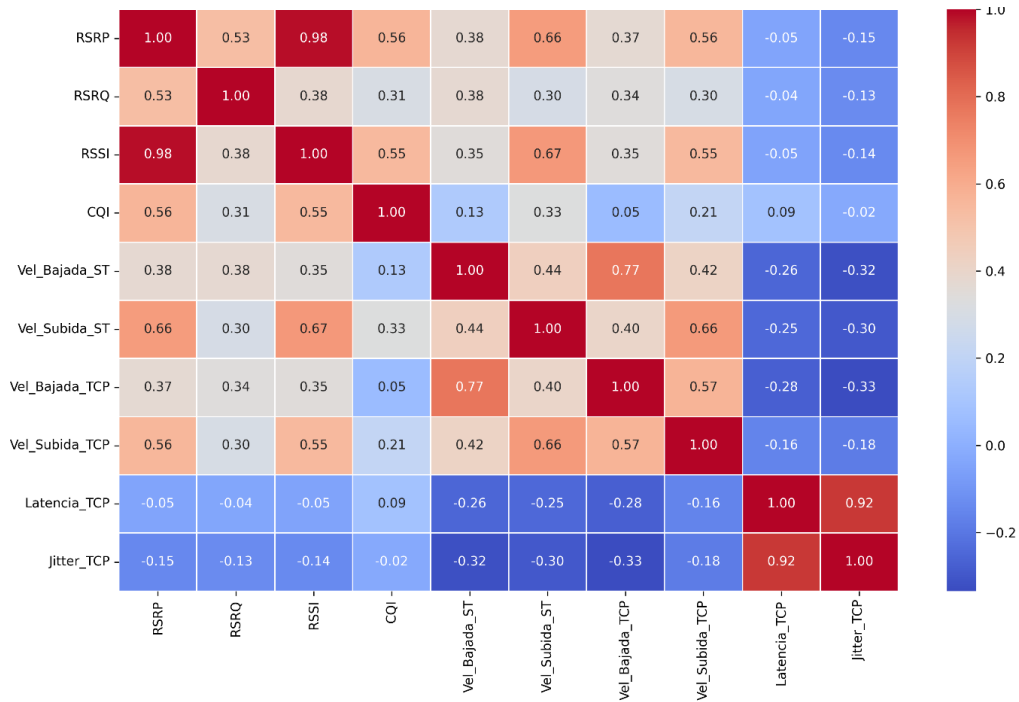


Fig. 4.22 Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de mañana

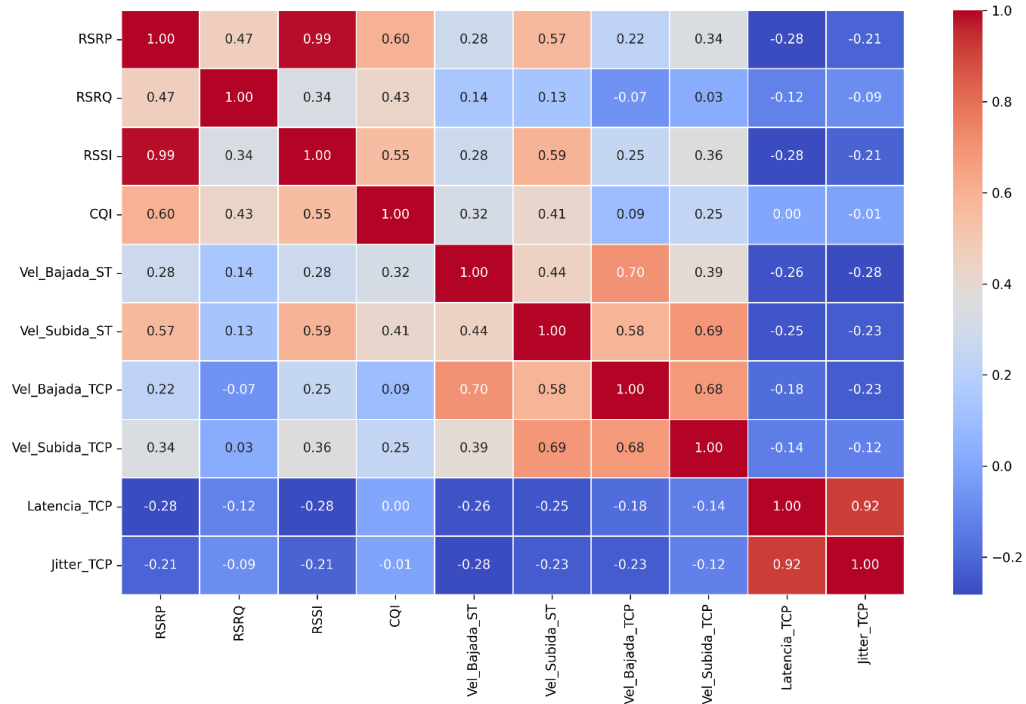


Fig. 4.23 Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de mediodía

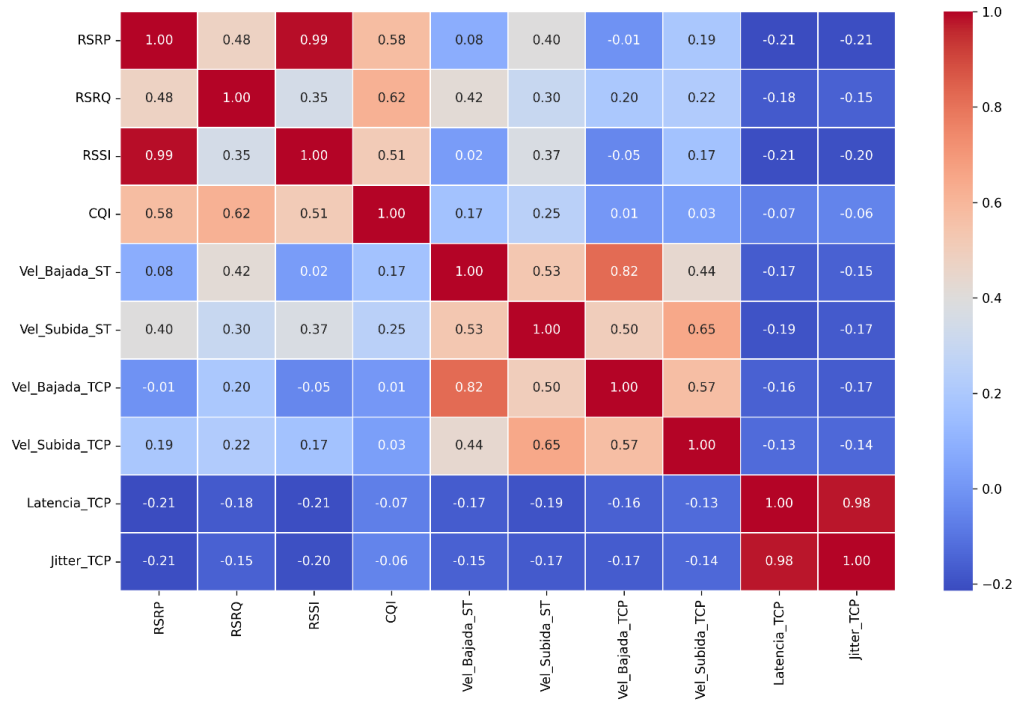


Fig. 4.24 Matriz de Correlación entre Parámetros de Red LTE en horario de tarde

En la mañana, las correlaciones entre calidad de señal y velocidad fueron más claras. RSRP y RSSI mostraron una relación moderadamente fuerte con la velocidad de subida ST. También se reforzó la coherencia entre herramientas que midieron las velocidades de bajada y subida, especialmente la de bajada. Durante el mediodía, este tipo de relaciones comenzaron a debilitarse. La congestión o el uso de la red en este horario podría haber afectado la estabilidad del rendimiento. En la tarde, las correlaciones entre calidad y rendimiento fueron aún más débiles. Los indicadores de señal dejaron de ser un predictor del desempeño de la red.

El análisis de correlaciones confirma que, si bien los parámetros de señal como RSRP y RSSI se relacionan de forma consistente entre sí, su influencia sobre el rendimiento no es lineal ni estable en todos los contextos. Las correlaciones más sólidas entre calidad de señal y velocidad se observan en condiciones de baja congestión, como en el horario de la mañana. Estos resultados evidencian que el comportamiento de la red no puede explicarse únicamente por la calidad de señal recibida, sino que requiere considerar de forma conjunta otros factores técnicos y contextuales.

4.5. Análisis de Componentes Principales (PCA)

En este análisis, se consideraron parámetros de calidad de señal (RSRP, RSRQ, RSSI, CQI), velocidades de bajada y subida (medidas mediante Speedtest e iperf3), latencia promedio y jitter.

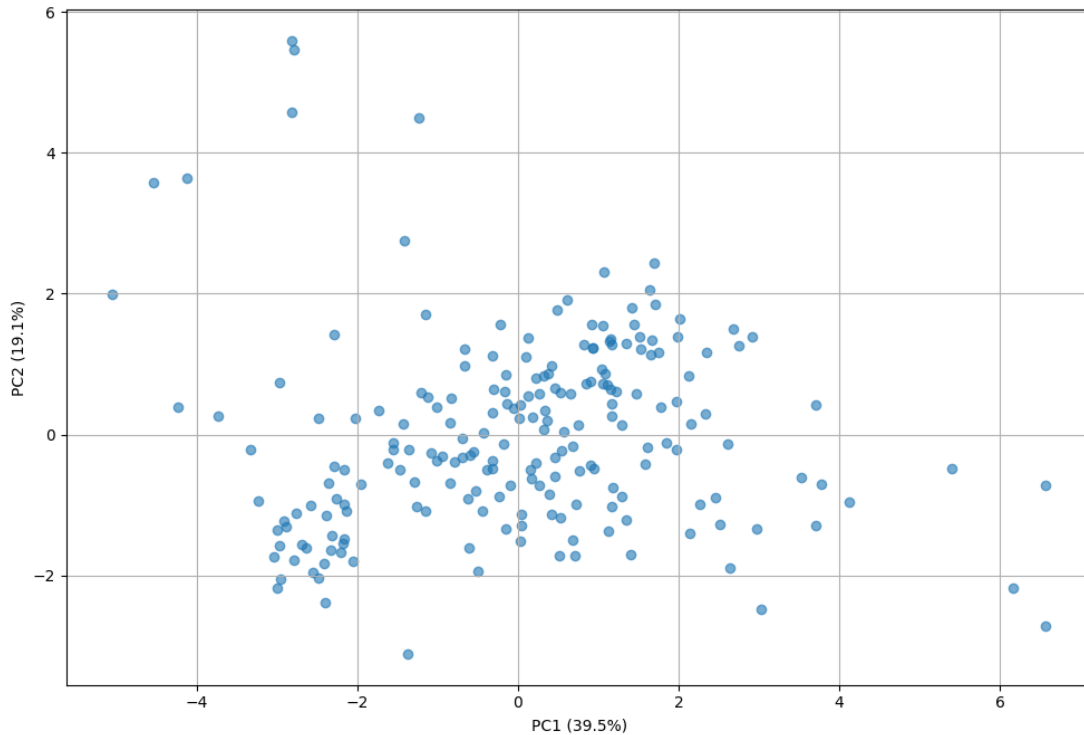


Fig. 4.25 Gráfico del PCA Entel

El gráfico resultante, generado a partir de los dos primeros componentes explica el 58.6% de la varianza total del conjunto (PC1: 39.5%, PC2: 19.1%). La distribución de los puntos revela una nube densa y extendida, sin agrupaciones claras, pero con una tendencia dominante a lo largo del eje PC1.

Al analizar las cargas factoriales (ver Tabla 4.6), se observa que PC1 está fuertemente influenciado por RSRP, RSSI y las velocidades de bajada y subida, lo que representa una dimensión técnica centrada en la potencia de señal y el rendimiento, variables que ya mostraban relaciones moderadas en los análisis de correlación.

PC2, en cambio, muestra cargas más altas para latencia promedio y jitter, lo que indica que este eje está asociado a la potencia de señal, la calidad reflejada en el CQI y el retardo del canal. La separación entre las variables de retardo y los valores negativos de rendimiento refuerza lo antes visto de que a mayor latencia y jitter, el rendimiento tiende a disminuir.

Tabla 4.6: Cargas asociadas a cada variable en el análisis de componentes principales (PCA)

Variable	PC1	PC2
RSRP	0.390	0.340
RSRQ	0.253	0.225
RSSI	0.372	0.318
CQI	0.267	0.403
Vel. Bajada iperf3	0.313	-0.298
Vel. Subida iperf3	0.339	-0.101
Latencia Promedio	-0.219	0.461
Jitter	-0.235	0.456
Vel Bajada ST	0.323	-0.226
Vel Subida ST	0.393	-0.017

Esta diferenciación entre componentes respalda la hipótesis de que la experiencia de usuario en una red móvil no puede explicarse únicamente por la potencia de señal recibida.

4.6. Análisis de agrupamiento (Clustering)

Con el objetivo de identificar zonas del campus con comportamientos técnicos similares en términos de señal y rendimiento, se aplicó un algoritmo de agrupamiento no supervisado K-means sobre el conjunto completo de variables técnicas de la red Entel. El agrupamiento se realizó considerando parámetros de calidad de señal (RSRP, RSRQ, RSSI) y rendimiento (velocidades de bajada y subida medidas con iperf3 y Speedtest), lo que permitió clasificar los puntos de medición en cuatro clústeres distintos, cuyos promedios para cada variable se resumen en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Cargas promedio de variables por clúster (K-means)

Clúster	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	RSSI (dBm)	Vel. Bajada iperf3 (Mbps)	Vel. Subida iperf3 (Mbps)	Vel. Bajada ST (Mbps)	Vel. Subida ST (Mbps)
0	-98.47	-14.89	-83.97	3.02	4.12	2.87	4.5
1	-78.33	-12.25	-66.33	19.62	31.14	19.32	29.62
2	-76.56	-13.31	-63.71	4.08	8.47	4.51	12.33
3	-87.95	-12.73	-75.49	10.09	7.47	12.58	10.73

- Clúster 0 (Zona Crítica - Rojo): Agrupa mediciones con valores degradados de RSRP, RSRQ y RSSI, acompañados de velocidades bajas, tanto en iperf3 como en Speedtest. Representa sectores de cobertura deficiente y desempeño reducido.
- Clúster 1 (Zona Óptima - Azul): Corresponde a mediciones con excelente calidad de señal y las velocidades de transmisión más altas registradas. Refleja áreas de óptimo desempeño de la red.

- Clúster 2 (Zona Aceptable - Verde): Presenta buena calidad de señal, pero velocidades de transmisión relativamente bajas, indicando posibles limitaciones de capacidad pese a la cobertura.
- Clúster 3 (Zona Intermedia - Naranja): Representa una condición intermedia en términos de señal y velocidades, superando a la zona crítica, pero sin alcanzar los niveles óptimos.

Estos resultados se visualizaron geográficamente en el mapa de la Figura 4.18, donde cada punto de medición se colorea de acuerdo con el clúster asignado.

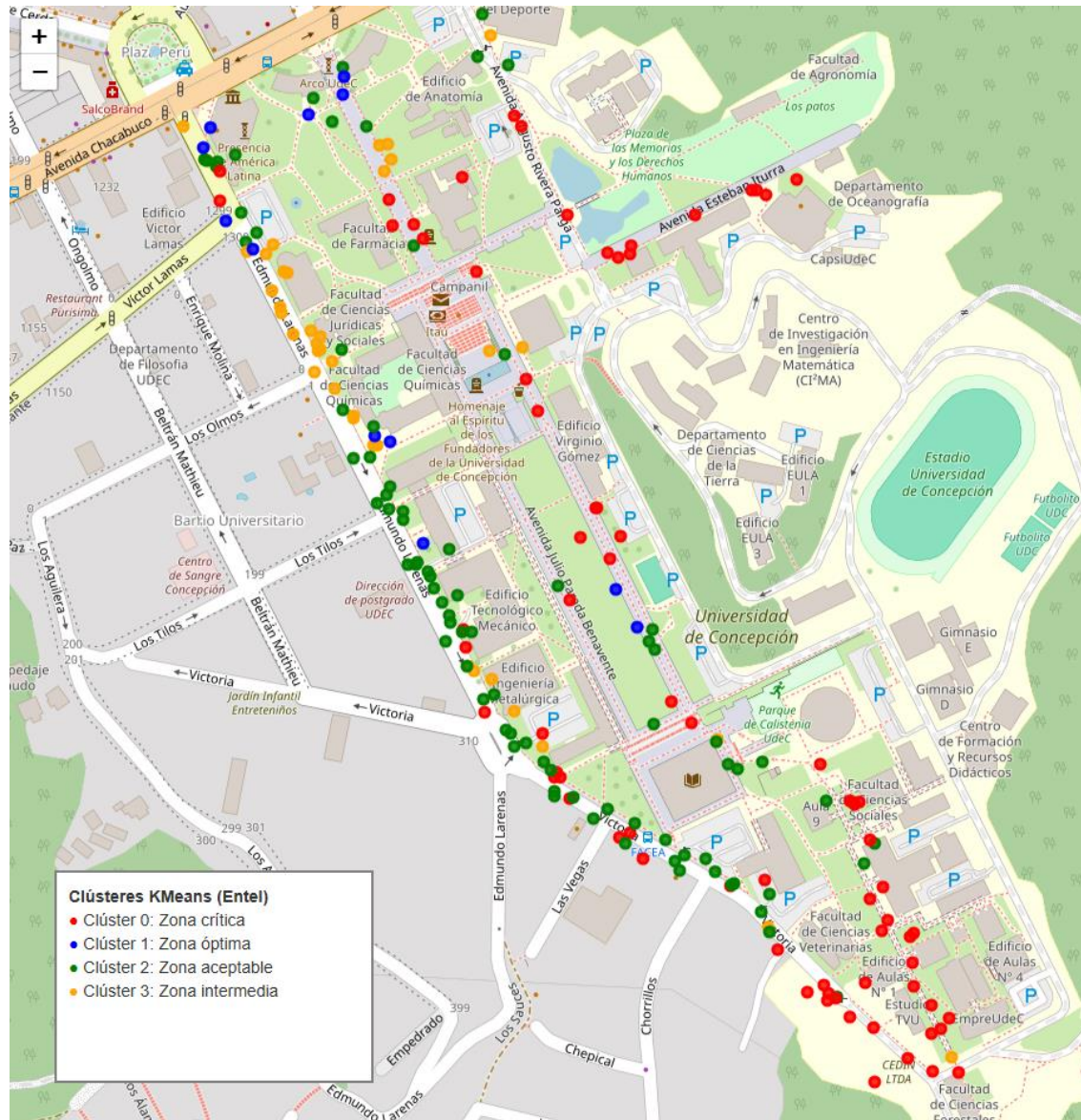


Fig. 4.26 Mapa de agrupamiento de clústeres K-means

El análisis de clústeres evidencia que existen zonas claramente diferenciables dentro del campus en términos de calidad de señal y desempeño de transmisión. Al comienzo de las rutas se observan clústeres que indican zonas optimas e intermedias, lo cual entrega buenos

valores en general de los parámetros considerados en este caso, luego se ven los valores predominantes que corresponden al clúster 2 en donde pasa a ser una zona aceptable con algunos puntos en donde pueden haber valores con buena calidad de señal, pero bajo rendimiento, finalmente se observan las zonas críticas, las cuales predominan al final de las tres rutas, por lo que se puede ver una amplia variabilidad de zonas las cuales son identificables y que podrían ser priorizadas a la hora de futuras intervenciones de mejora de red o ajustes de planificación.

4.7. Análisis de Regresión Lineal Múltiple

Con el objetivo de evaluar hasta qué punto los parámetros de calidad de señal permiten estimar el rendimiento de red, se aplicaron modelos de regresión lineal múltiple considerando como variables independientes RSRP, RSRQ y RSSI, y como variable dependiente la velocidad de transmisión, tanto de bajada como de subida. Se construyeron cuatro modelos distintos: dos utilizando datos de Speedtest (ST) y dos desde iperf3.

4.7.1. Regresión para Velocidad medida en iperf3

4.7.1.1. Velocidad de bajada medida en iperf3

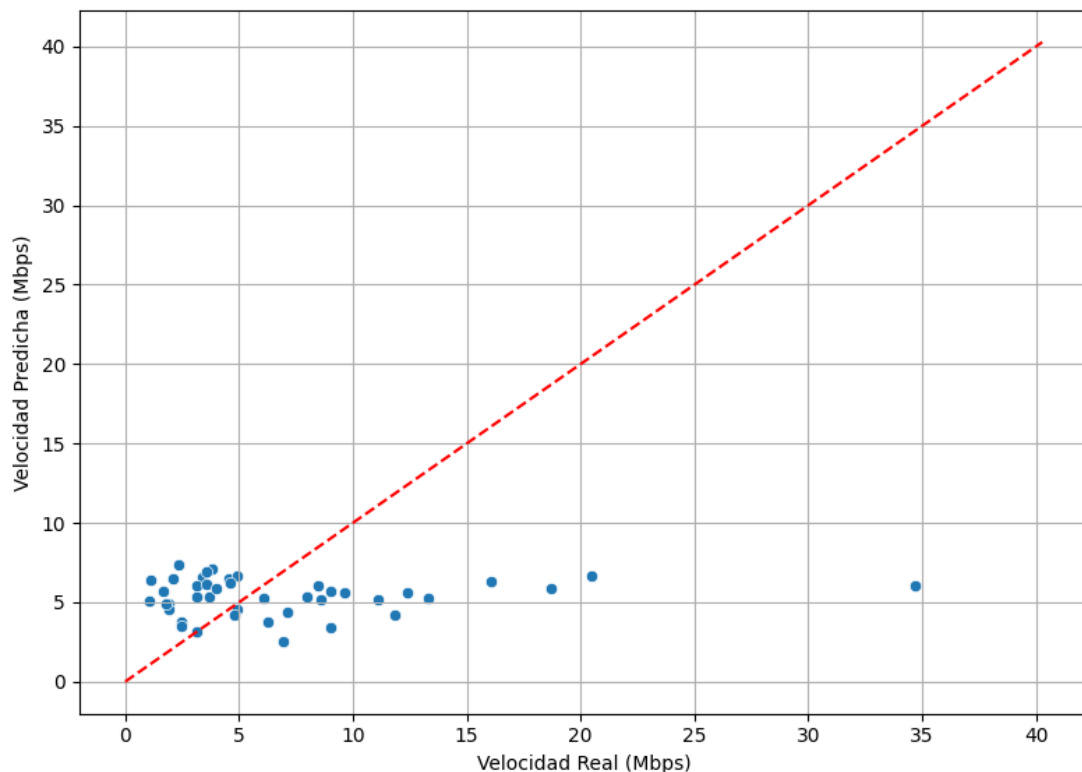


Fig. 4.27 Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Bajada TCP (iperf3)

- $R^2 = -0.054$
- RMSE = 6.527 Mbps
- Coeficientes: RSRP = -0.746, RSRQ = 0.809, RSSI = 0.830

El gráfico muestra un rendimiento muy deficiente, los puntos no siguen ninguna tendencia clara respecto a la línea roja, y hay una subestimación de la velocidad predicha.

4.7.1.2. Velocidad de subida medida en iperf3

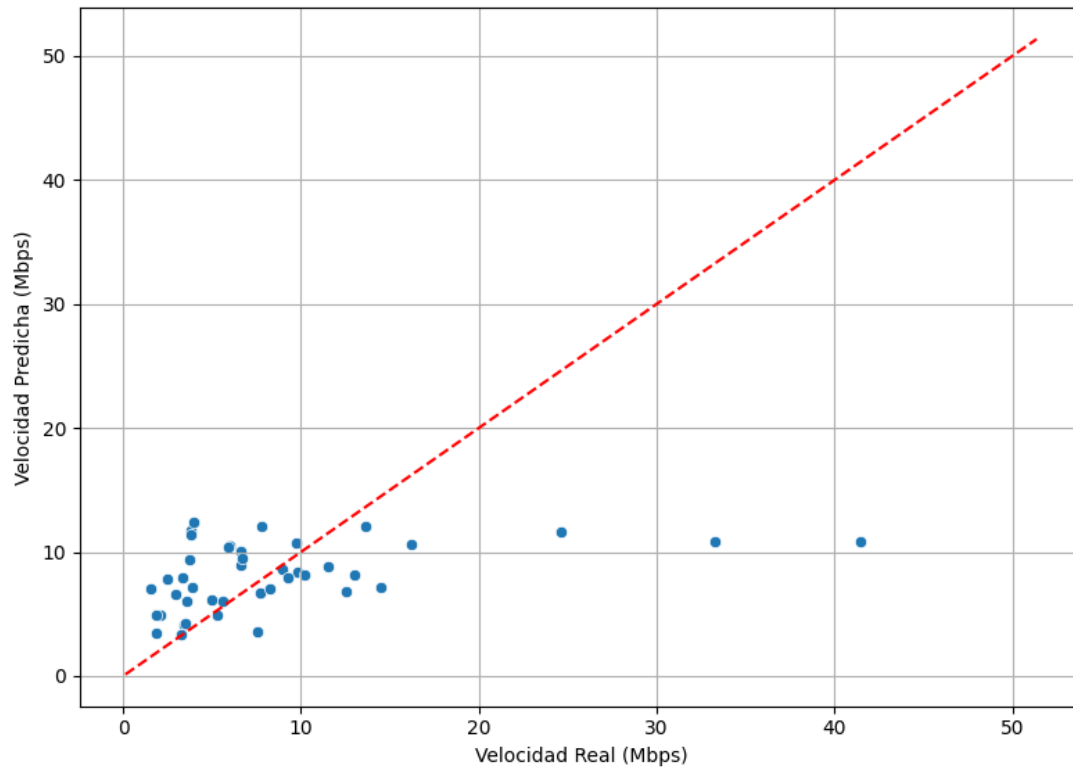


Fig. 4.28 Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Subida TCP (iperf3)

- $R^2 = 0.168$
- $RMSE = 7.276$ Mbps
- Coeficientes: $RSRP = -0.199$, $RSRQ = 0.345$, $RSSI = 0.415$

Aunque sigue siendo un modelo de bajo rendimiento, se observa una mejor alineación en valores bajos y medios respecto a la línea de referencia. Aun así, los valores altos reales están subestimados fuertemente. El error (RMSE) se mantiene alto, y los coeficientes no capturan adecuadamente toda la variabilidad de la subida.

4.7.2. Regresión para velocidad medida en Ookla Speedtest

4.7.2.1. Velocidad de bajada medida en Speedtest

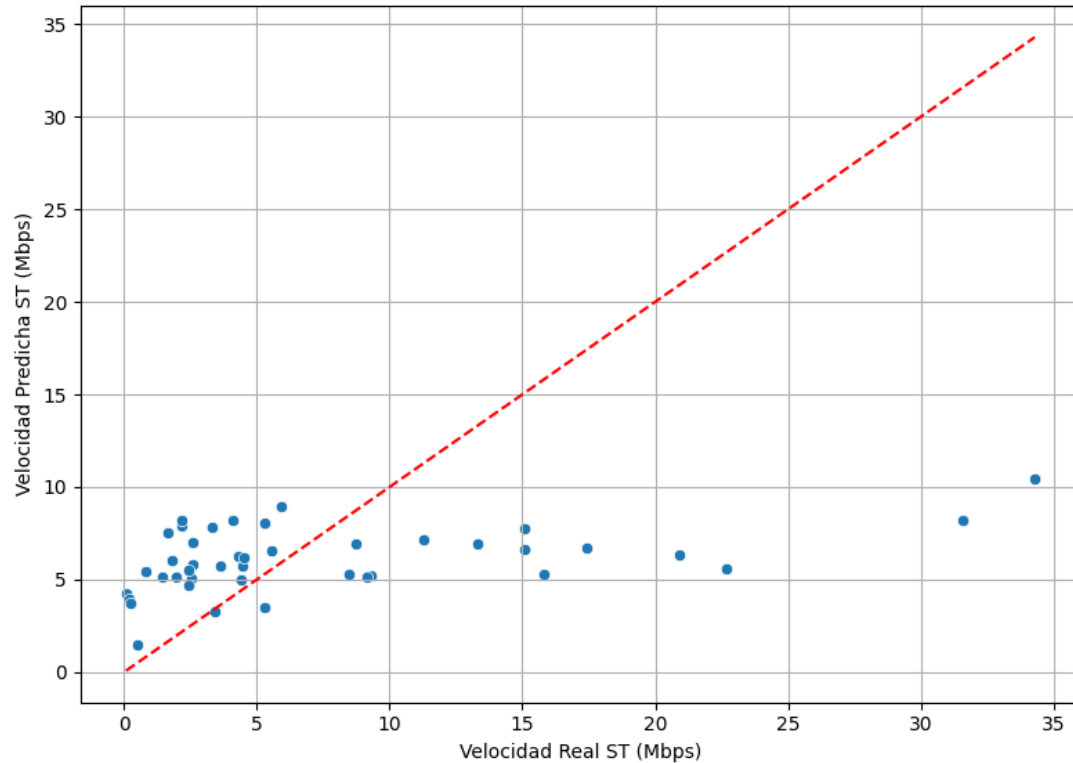


Fig. 4.29 Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Bajada ST

- $R^2 = 0.118$
- $RMSE = 7.574$ Mbps
- Coeficientes: $RSRP = -0.423$, $RSRQ = 1.100$, $RSSI = 0.479$

El gráfico muestra una gran dispersión de los puntos, con tendencia a la subestimación en velocidades altas. El bajo R^2 sugiere que la velocidad de bajada ST no puede ser bien estimada por estos tres parámetros. Los errores nuevamente son evidentes un poco antes de los 10 Mbps, donde el modelo no logra seguir el comportamiento observado.

4.7.2.2. Velocidad de subida medida en Speedtest

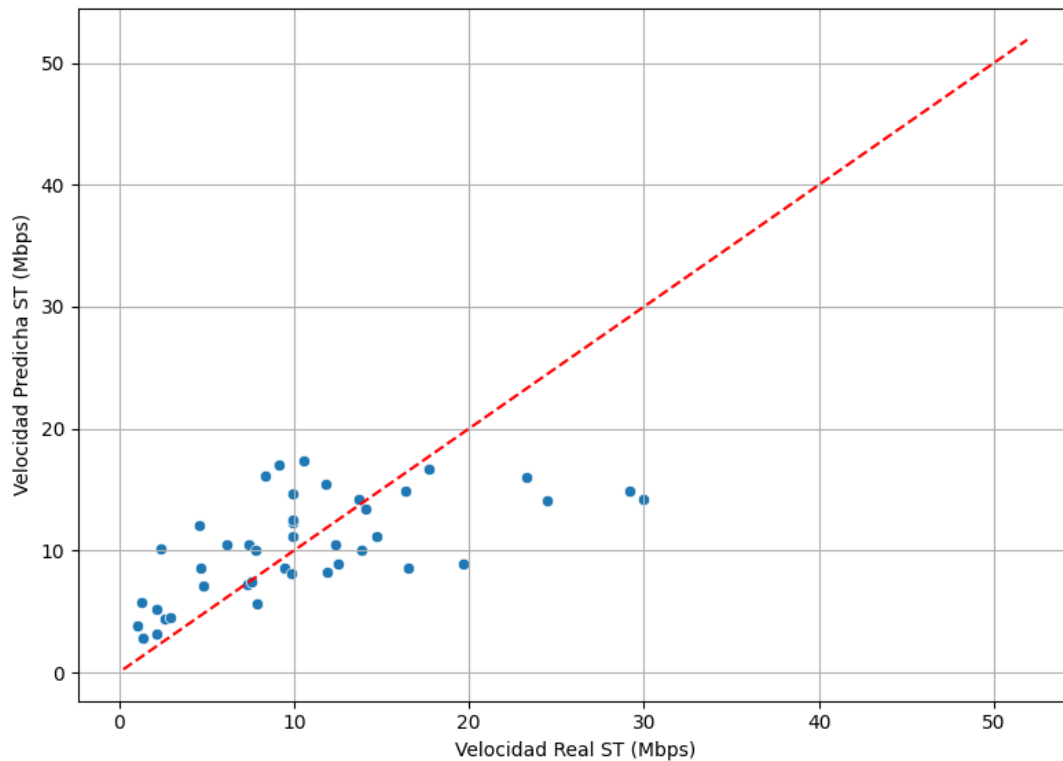


Fig. 4.30 Gráfico de Regresión Múltiple Velocidad de Subida ST

- $R^2 = 0.385$
- $RMSE = 5.562$ Mbps
- Coeficientes: $RSRP = -0.057$, $RSRQ = 0.262$, $RSSI = 0.396$

Este es el modelo con mejor rendimiento entre los cuatro. La dispersión se mantiene dentro de un rango moderado y hay una tendencia lineal visible. Aunque no es una predicción perfecta, el modelo logra reflejar cierta coherencia entre calidad de señal y velocidad de subida. El R^2 aceptable refuerza esta observación.

Si bien el modelo aplicado a la velocidad de subida medida con Speedtest se comporta de manera aceptable, ningún modelo logró superar el umbral de $R^2 = 0.5$, lo que indica que los parámetros físicos de señal no son suficientes por si solos para predecir con precisión el rendimiento de la red. Estos resultados refuerzan lo ya observado en el análisis de correlación y PCA, el comportamiento de la red LTE está influido por múltiples factores, y aunque la calidad de señal es importante, no basta para explicar por completo la variabilidad del rendimiento observado.

4.8. Relación entre Frecuencia y Velocidad en la red LTE

En redes LTE, la banda de frecuencia utilizada puede influir directamente en el rendimiento del servicio, especialmente en lo que respecta a las velocidades alcanzadas. Se busca evaluar si existe relación entre la frecuencia de operación y las velocidades reales registradas con iperf3 en el campus de la Universidad de Concepción.

Para cada punto de medición se registró el parámetro EARFCN, el cual permite identificar la frecuencia de operación en LTE. A partir del EARFCN se determinó la banda LTE correspondiente, así como las frecuencias centrales de downlink (DL) y uplink (UL). Se consideran bandas utilizadas por Entel: 2, 7 y 28.

Tabla 4.8: Frecuencia y Banda asociada a EARFCN utilizados en Entel

EARFCN	Banda LTE	Frecuencia DL (MHz)	Frecuencia UL (MHz)
3100.0	7.0	2655.0	2535.0
1100.0	2.0	1980.0	1900.0
9485.0	28.0	785.5	730.5
693.0	2.0	1939.3	1859.3

Luego, se asociaron estas frecuencias a las velocidades obtenidas mediante iperf3, tanto de bajada como de subida.

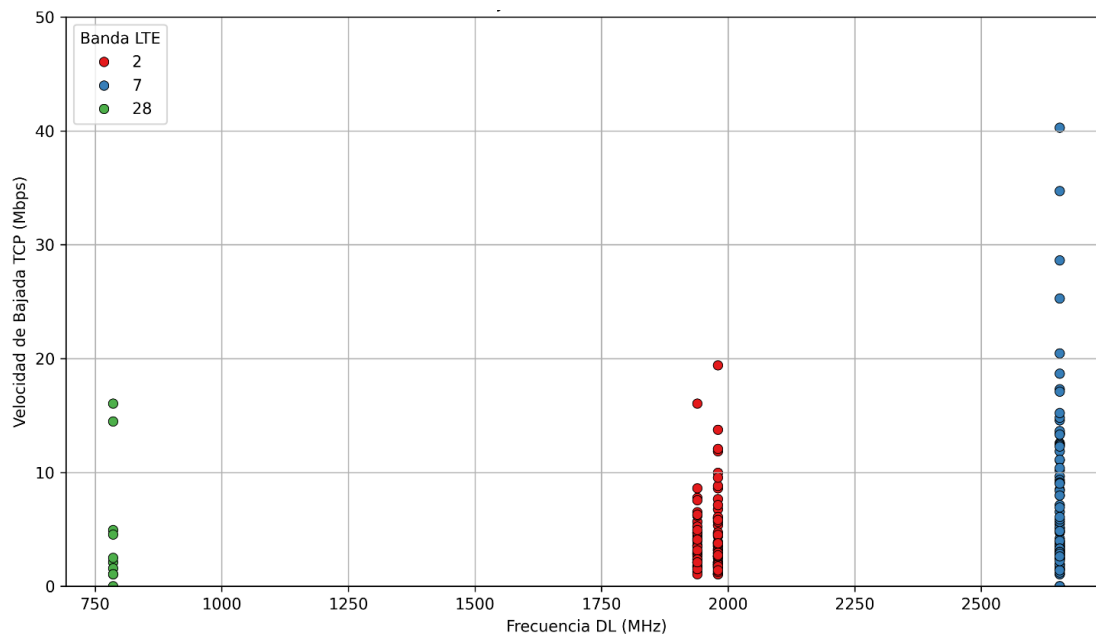


Fig. 4.31 Gráfico de dispersión de la velocidad de bajada iperf3 vs Frecuencia Downlink

En el gráfico se observa que los valores de velocidad medida con iperf3 de bajada tienden a ser mayores cuando se utilizan frecuencias de downlink más altas, particularmente en la

Banda 7 (2600 MHz). Esta banda presenta la mayor dispersión, pero también los valores máximos más altos (algunos superando los 35 Mbps). En contraste, la Banda 2, en el caso de 700 MHz muestra velocidades generalmente más bajas, consistentes con su rol más orientado a cobertura que a capacidad.

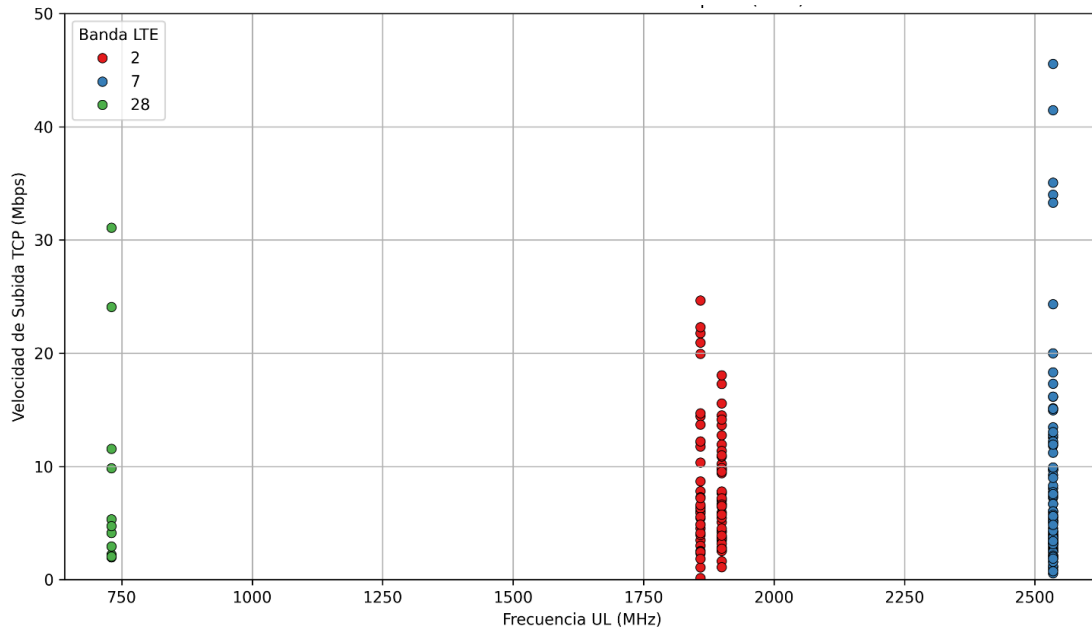


Fig. 4.32 Gráfico de dispersión de la velocidad de subida iperf3 vs Frecuencia Uplink

Al igual que en la bajada, la Banda 7 también presenta velocidades de subida significativamente más altas, incluso alcanzando valores sobre 50 Mbps en algunos puntos. Las velocidades en Bandas 2 y 28 son más moderadas, con una clara concentración de valores bajos en la banda de 700 MHz. El patrón es similar al de bajada, lo que refuerza la hipótesis de que las frecuencias más altas, si bien con menor cobertura, pueden entregar mayores tasas de datos.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la frecuencia utilizada tiene un impacto directo sobre la velocidad alcanzada, siendo la banda 7 la que ofrece mejor rendimiento promedio.

4.9. Análisis de cobertura y movilidad por celda física (PCI y Cell ID)

El análisis a nivel de celda física se abordó considerando dos parámetros clave: el Physical Cell ID (PCI), que identifica de forma lógica cada sector dentro de una celda LTE, y el Cell ID, que representa el identificador físico único de cada celda dentro de la infraestructura del operador.

4.9.1. Distribución de PCI por ruta y horario

Se analizaron las velocidades de bajada y subida medidas por iperf3 agrupadas por PCI y segmentadas por horario (mañana, mediodía, tarde).

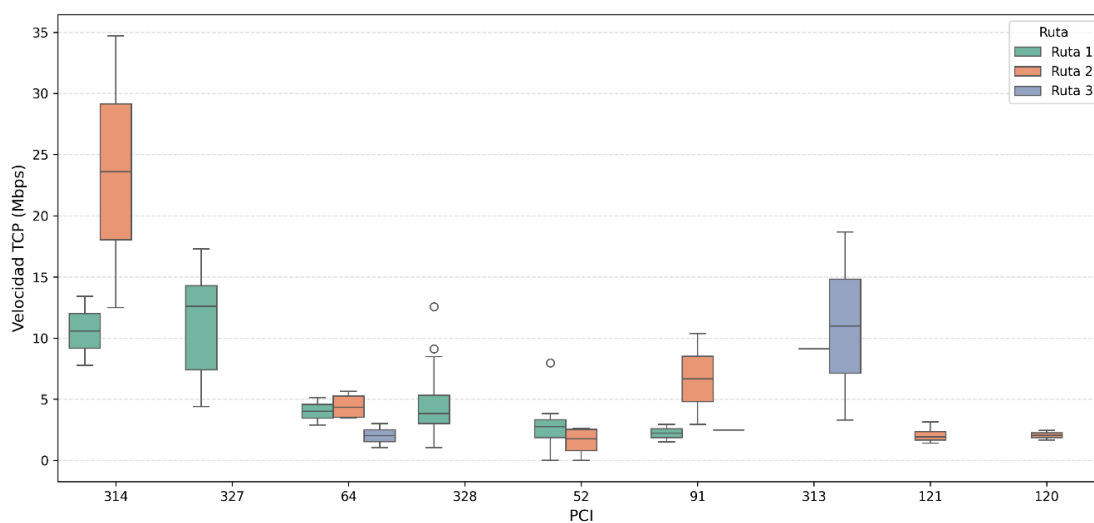


Fig. 4.33 Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de mañana

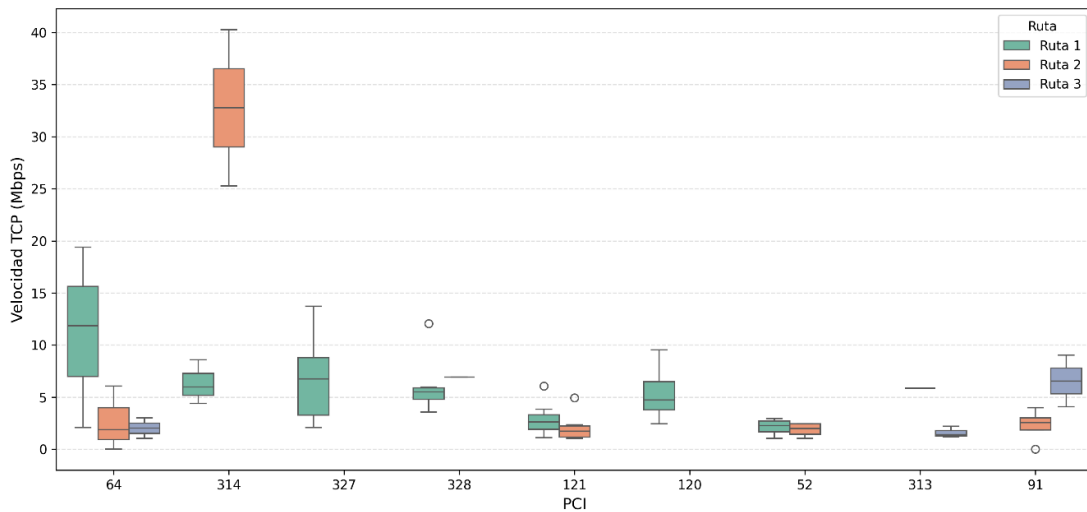


Fig. 4.34 Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de mediodía

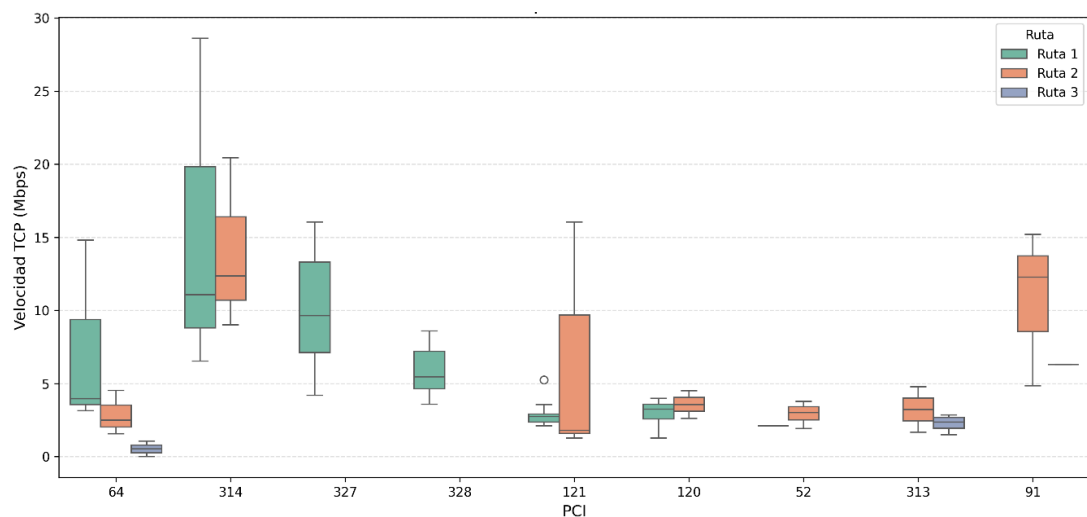


Fig. 4.35 Boxplots de velocidad de bajada TCP (iperf3) por PCI en horario de tarde

Las Fig. 4.33, 4.34 y 4.35 muestran boxplots del rendimiento de velocidad iperf3 de bajada según PCI para cada horario. En la Ruta 1 se observa un rendimiento alto para los PCI 64, 314, 327 y 328. En el caso de la Ruta 2 el rendimiento se observa en los PCI 314 y 91 y en la Ruta 3 el PCI 313.

Ahora, en el horario de la mañana, destacan los PCI 313, 314 y 327, los cuales muestran medianas más elevadas. En contraste, PCI como 121 y 120 presentan velocidades más bajas. Durante el mediodía, PCI 314 y 64 sobresalen con valores medianos superiores. En la tarde, el PCI 314 vuelve a mostrar valores notoriamente superiores en comparación con otros identificadores.

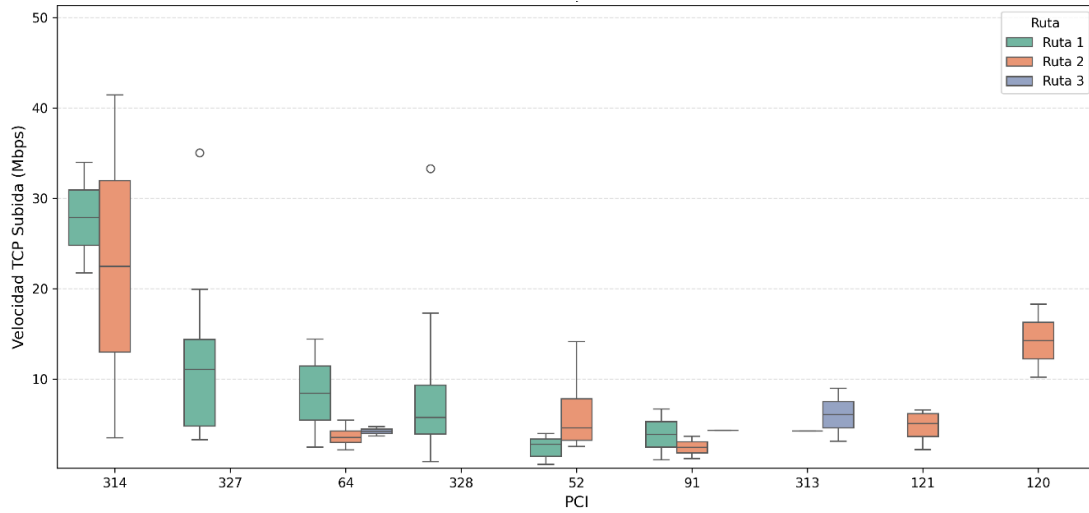


Fig. 4.36 Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de mañana

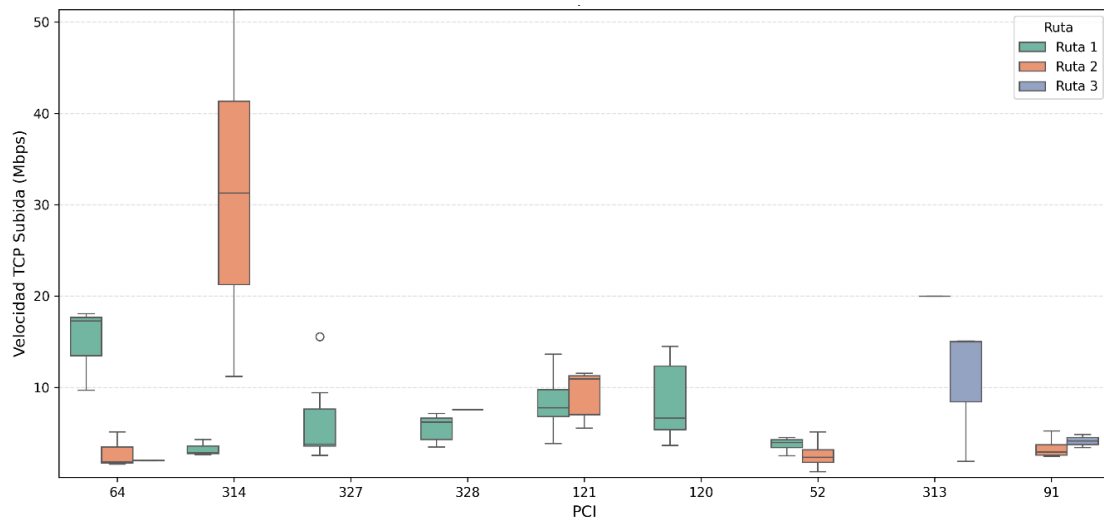


Fig. 4.37 Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de mediodía

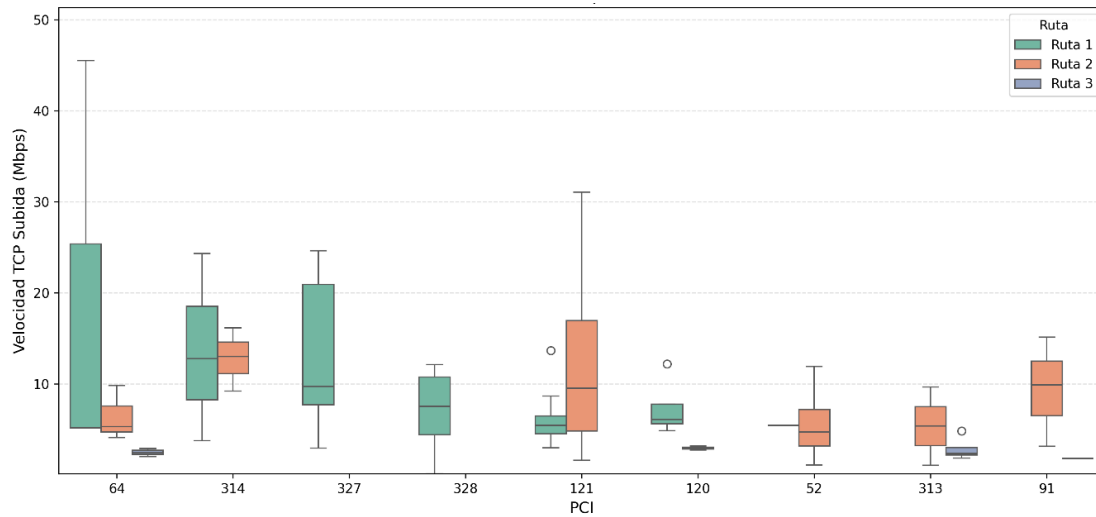


Fig. 4.38 Boxplots de velocidad de subida TCP (iperf3) por PCI en horario de tarde

La Fig. 4.26 repite el análisis anterior, pero esta vez considerando la velocidad de subida iperf3 por PCI. En este caso se observa para la Ruta 1 un mejor rendimiento en las mediciones según el PCI 314, 327 y 64. Para la Ruta 2 se nota un mejor rendimiento en PCI 314 y 121. En el caso de la Ruta 3 destaca el PCI 313.

En la mañana y en el mediodía, el PCI 314 tiene los valores más altos mientras que en la tarde destacan los PCI 121 y 327.

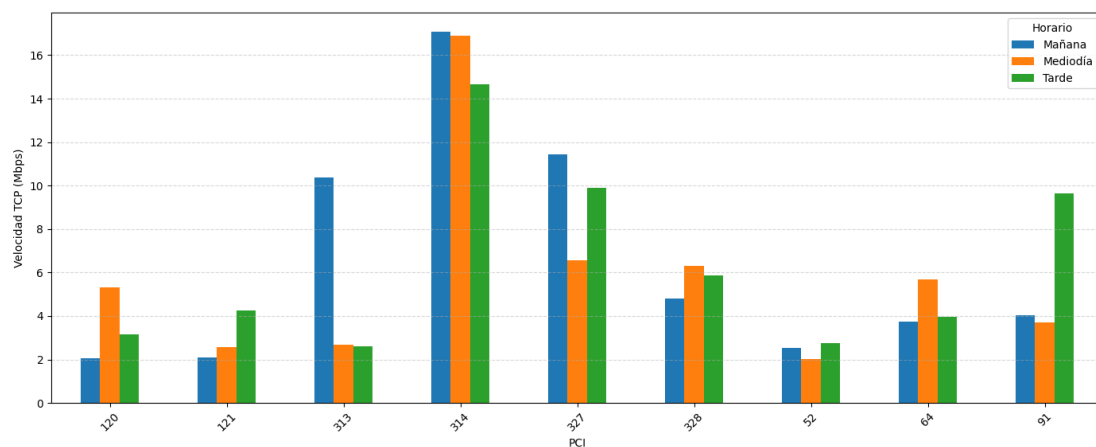


Fig. 4.39 Gráfico de barras de velocidad de bajada por PCI

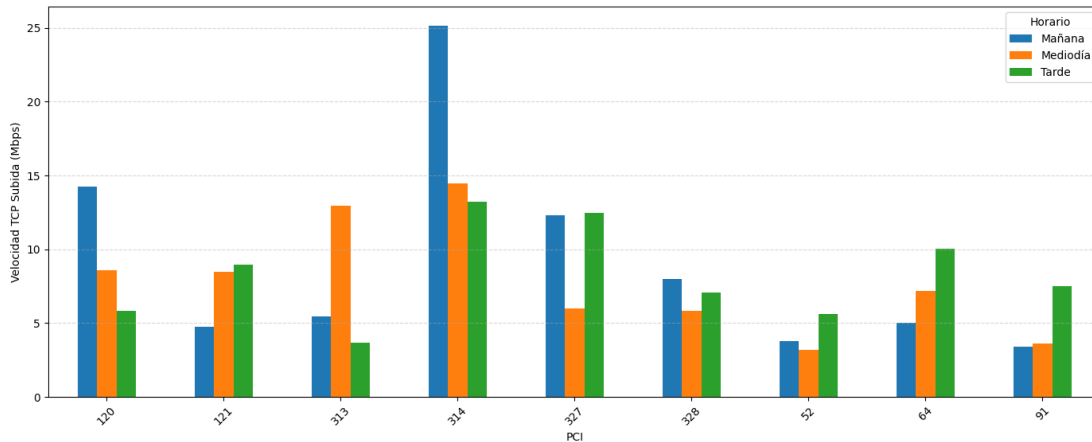


Fig. 4.40 Gráfico de barras de velocidad de subida por PCI

Las Fig. 4.39 y 4.40 presentan gráficos de barras con el promedio de velocidades por PCI considerando todas las rutas y horarios. Se observa que ciertos sectores, como el PCI 314 y 313, destacan con valores promedio significativamente superiores al resto. Por otro lado, PCI como 52, 64 y 121 presentan velocidades medias más bajas, lo que podría estar relacionado con una mayor congestión o una configuración de red que asigna a estos sectores un ancho de banda más restringido.

4.9.2. Análisis de Cell ID

Para complementar el análisis anterior, se incorporó una caracterización basada en el Cell ID, el cual permite observar la red desde una perspectiva física. A partir de los datos registrados, se construyó un mapa georreferenciado (ver Fig 4.28) que muestra la distribución de los puntos de medición coloreados según el Cell ID.

Con el fin de facilitar la interpretación, los Cell ID fueron agrupados por bloques de 20 valores consecutivos, bajo el supuesto técnico de que vienen de la misma torre.

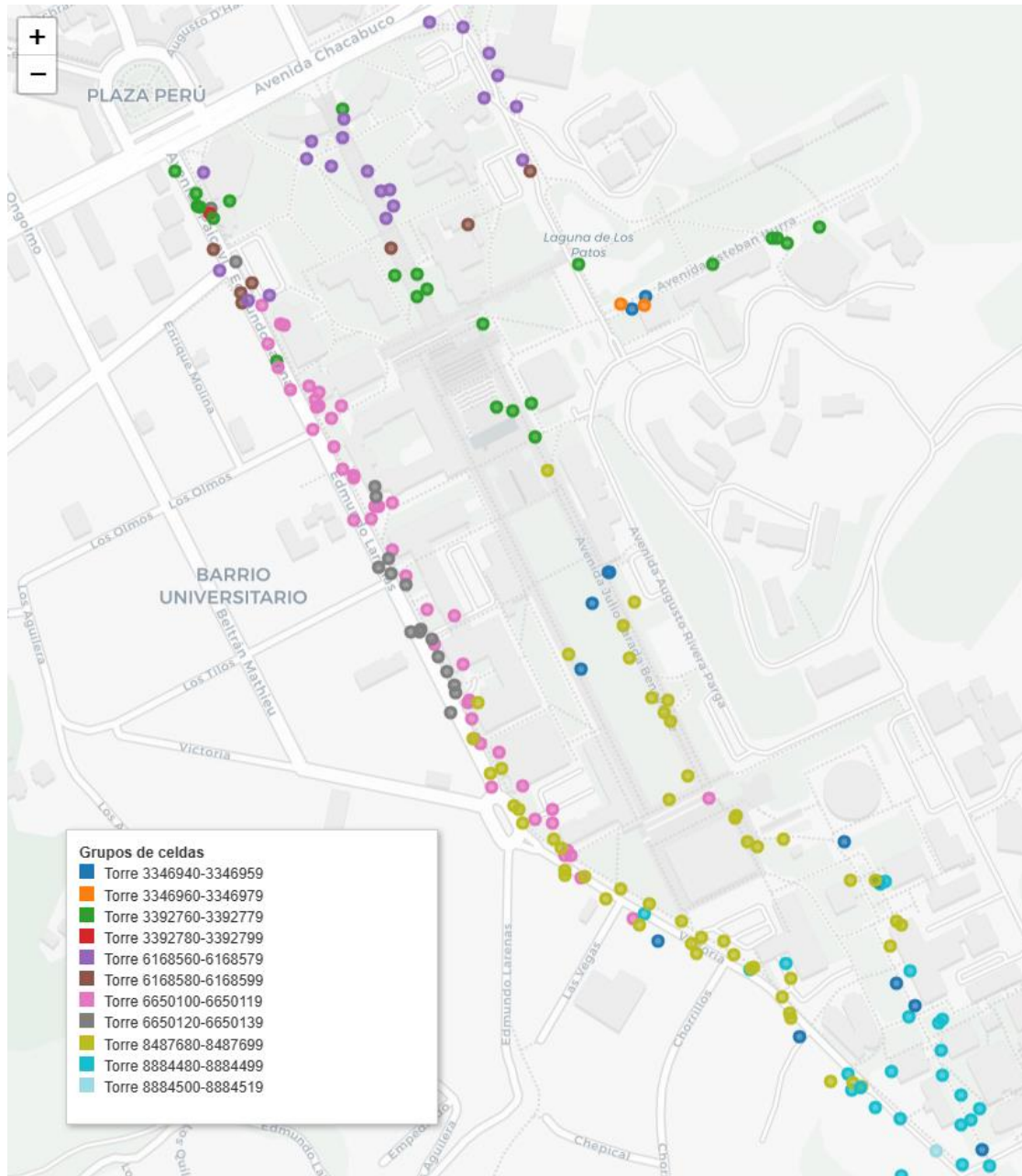


Fig. 4.41 Mapa de Cell ID por punto de medición

Se observa que ciertos grupos presentan una cobertura amplia y continua en zonas específicas del campus. Por ejemplo, el grupo 8487680–8487699 se extiende de forma dominante sobre el eje central y sureste del campus, lo que indica una celda con cobertura extensa o prioritaria. Algo similar ocurre con el grupo 8884480–8884499, que aparece de manera dominante en el final de las Rutas 1 y 2, lo cual sugiere que esta torre ofrece cobertura de fondo o de refuerzo en sectores más periféricos. Un aspecto relevante es la superposición de varios grupos de celdas en ciertas zonas como la Laguna de los Patos, donde hay diferentes Cell ID en puntos

geográficos muy próximos.

Finalmente, destaca la presencia del grupo 3392760–3392779 en gran parte del sector norte del campus, especialmente en los inicios de las rutas 1 y 2, enfocándose en Paicaví lo cual indica que esta celda atiende una zona de alta circulación peatonal.

Tabla 4.9: Agrupación de Cell ID por bloques consecutivos, PCI asociados y rutas donde fueron detectados.

Grupo de Cell ID	Cell ID incluidos	PCI asociados	Rutas
3346940–3346959	3346945	91	R1 Mañana, R2 Mañana, R2 Mediodía, R2 Tarde, R3 Mañana, R3 Mediodía
3346960–3346979	3346961	91	R3 Mediodía, R3 Tarde
3392760–3392779	3392770, 3392773, 3392776	64	R1 Mañana, R1 Mediodía, R1 Tarde, R2 Mañana, R2 Mediodía, R2 Tarde, R3 Mañana, R3 Mediodía, R3 Tarde
3392780–3392799	3392792	64	R1 Mañana
6168560–6168579	6168577, 6168578	313, 314	R1 Mañana, R1 Tarde, R2 Mañana, R2 Mediodía, R2 Tarde, R3 Mañana, R3 Mediodía, R3 Tarde
6168580–6168599	6168584, 6168593, 6168594	313, 314	R1 Mañana, R1 Mediodía, R2 Tarde, R3 Tarde
6650100–6650119	6650113, 6650114, 6650119	327, 328	R1 Mañana, R1 Mediodía, R1 Tarde, R2 Mediodía
6650120–6650139	6650120, 6650129, 6650130	327, 328	R1 Mañana, R1 Mediodía, R1 Tarde
8487680–8487699	8487685, 8487687, 8487688, 8487697, 8487698	120, 121	R1 Mediodía, R1 Tarde, R2 Mañana, R2 Mediodía, R2 Tarde
8884480–8884499	8884481, 8884484	52	R1 Mañana, R1 Mediodía, R2 Mañana, R2 Mediodía, R2 Tarde
8884500–8884519	8884503	52	R1 Tarde

Se observa que ciertos grupos, como 3392760–3392779 y 6168560–6168579, tienen una distribución amplia, apareciendo en las tres rutas y en múltiples horarios. Esto sugiere que dichas celdas pertenecen a torres ubicadas en zonas centrales o con cobertura extensa sobre

el campus. El grupo 3392760–3392779, por ejemplo, incluye tres Cell ID diferentes asociados al PCI 64, cuatro Cell ID si consideramos 3392792 ya que tiene el mismo PCI 64, y están presentes en las nueve combinaciones de ruta y horario, lo que lo posiciona como uno de los sectores más activos y posiblemente con alta carga.

Otros grupos como 6650120–6650139 o 8487680–8487699 presentan también una amplia cobertura, pero restringida principalmente a la Ruta 1 y Ruta 2, lo que indica torres con cobertura sectorial más dirigida.

A continuación, se observan las torres que aparecen en CellMapper donde algunas están relacionadas a Cell ID de la tabla.

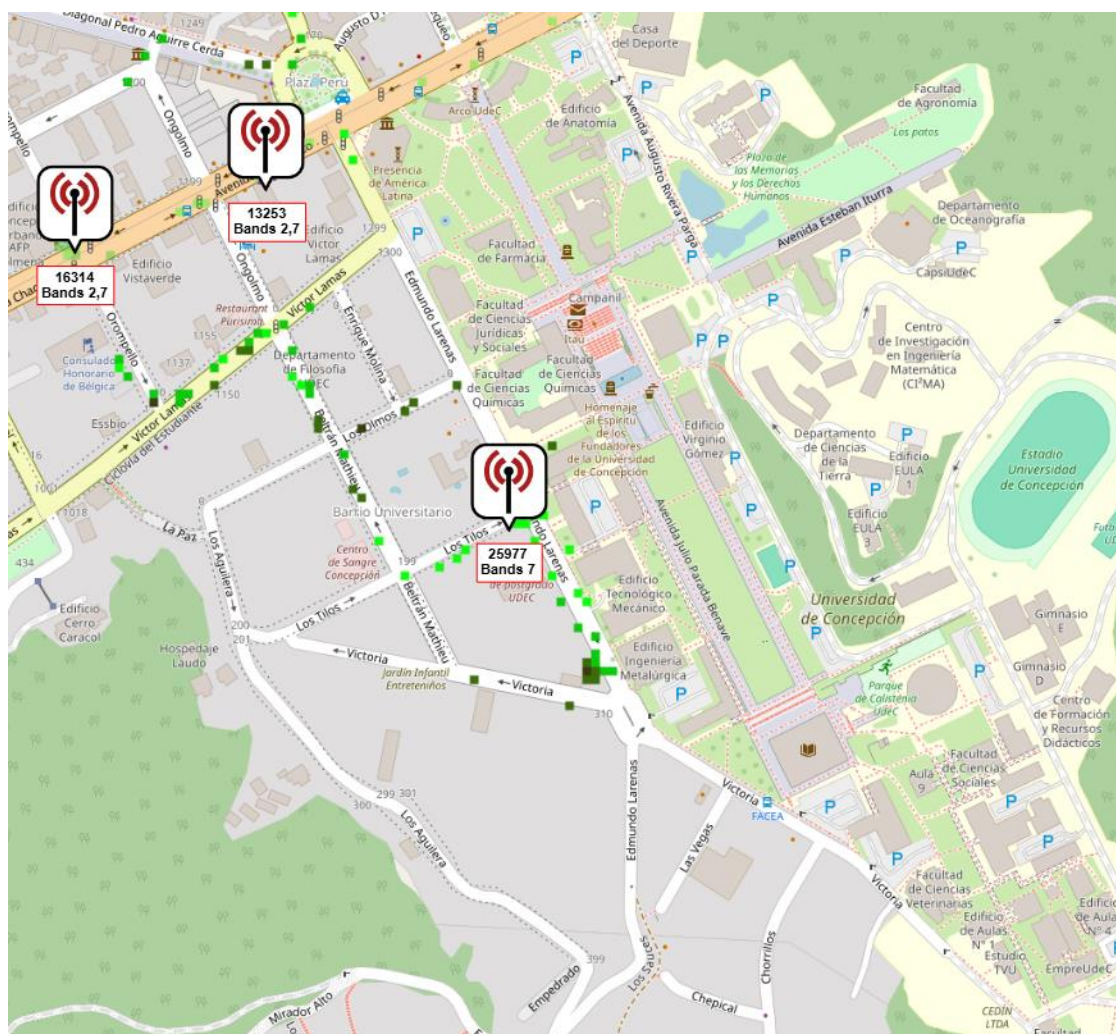


Fig. 4.42 Mapa de Cell ID disponibles en CellMapper.

Parte de los Cell ID (como 6650113 o 3392770) pudieron ser georreferenciados en la plataforma comunitaria CellMapper, identificando al menos tres torres activas en el entorno del campus. Sin embargo, una parte importante de los Cell ID registrados no está disponible en dicha base de datos, lo que limita el alcance de la validación externa. Aun así, la distribución espacial observada en el mapa evidencia zonas de cobertura diferenciadas,

confirmando la existencia de múltiples sectores con roles distintos dentro de la arquitectura de red de Entel.

6650113, 6650114, 6650115 asociados a PCI 327 y 328 corresponden a la torre señalada como 25977 y que abarca la zona entre la Facultad de Ciencias Químicas y el Edificio de Ingeniería Metalúrgica, por la parte de la calle Edmundo Larenas.

3392769, 3392770, 3392776 asociado a PCI 64 corresponden a la torre señalada como 13253 y que abarca la zona del Arco UdeC, el inicio de la calle Edmundo Larenas y la calle Víctor Lamas.

4176386, 4176389, 4176392, 4176402 asociado a PCI 25 corresponden a la torre señalada como 16314 y abarca una zona fuera de las rutas que se analizaron en este estudio, por lo que no se ocuparon estos Cell ID.

4.10. Comparación entre operadores móviles: Entel vs WOM

Esta sección tiene por objetivo comparar el comportamiento de los operadores móviles Entel y WOM bajo condiciones equivalentes, considerando las mismas rutas y horarios que se han visto y analizado en Entel previamente. Dado que WOM no cuenta con mediciones realizadas con iperf3, se consideraron únicamente parámetros comunes entre ambos operadores, como RSRP, RSRQ, RSSI y las velocidades de bajada y subida medidas con Speedtest, aunque para una mayor comparación se incluyeron los valores de velocidad medidos con iperf3 en Entel. El análisis incluyó estadísticas descriptivas, boxplots, correlaciones y, en el caso de WOM, también un modelo de regresión.

4.10.1. Comparación de calidad de señal

Tabla 4.10: Comparación de medias de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario entre WOM y Entel

Ruta	Horario	RSRP WOM (dBm)	RSRP Entel (dBm)	RSRQ WOM (dB)	RSRQ Entel (dB)	RSSI WOM (dBm)	RSSI Entel (dBm)
Ruta 1	Mañana	-97.08	-90.33	-14.08	-13.09	-62.64	-77.7
Ruta 1	Mediodía	-99.8	-78.7	-14.64	-13.6	-67.18	-65.42
Ruta 1	Tarde	-98.3	-78.74	-15.82	-13.69	-61.36	-65.46
Ruta 2	Mañana	-84.32	-90.11	-12.68	-13.63	-57.6	-76.89
Ruta 2	Mediodía	-83.7	-94.1	-13.36	-14.43	-56.0	-79.76
Ruta 2	Tarde	-83.06	-88.67	-13.74	-14.0	-56.92	-75.08
Ruta 3	Mañana	-92.5	-92.0	-13.96	-13.8	-59.02	-78.6
Ruta 3	Mediodía	-100.12	-96.29	-15.14	-14.86	-64.96	-82.14
Ruta 3	Tarde	-94.82	-95.29	-14.28	-14.43	-59.68	-81.57

Se aprecia que Entel presenta mejores valores de RSRP en la Ruta 1 y en horarios de la Ruta 3, destacando la diferencia en la Ruta 1 en los horarios de mediodía y tarde, donde alcanza valores de -78.7 dBm. En cuanto a RSRQ, los valores se mantienen en un rango similar para ambos operadores. Para RSSI, WOM reporta los mejores valores, lo cual podría deberse a mayor potencia total transmitida, aunque no necesariamente implica una mejor calidad efectiva.

Tabla 4.11: Desviación estándar de RSRP, RSRQ y RSSI por ruta y horario entre WOM y Entel

Ruta	Horario	RSRP WOM	RSRP Entel	RSRQ WOM	RSRQ Entel	RSSI WOM	RSSI Entel
Ruta 1	Mañana	9.63	9.27	2.59	1.56	7.37	8.57
Ruta 1	Mediodía	12.19	9.79	2.83	2.0	2.75	8.99
Ruta 1	Tarde	10.46	10.42	2.4	1.95	7.57	9.63
Ruta 2	Mañana	15.79	10.75	1.95	2.01	9.73	9.69
Ruta 2	Mediodía	14.55	10.56	2.16	1.94	7.74	10.13
Ruta 2	Tarde	15.6	8.91	2.05	2.21	9.14	8.14
Ruta 3	Mañana	7.06	13.73	1.5	1.64	3.68	12.36
Ruta 3	Mediodía	8.73	11.57	1.46	1.57	8.08	10.38
Ruta 3	Tarde	6.74	11.43	2.11	1.9	4.53	9.5

Al analizar la variabilidad, se observa que WOM presenta una mayor dispersión en RSRP, particularmente en las rutas 1 y 2, lo que sugiere una cobertura menos homogénea, mientras que Entel muestra mayor variabilidad en RSSI. Esto sugiere que Entel ofrece una cobertura más homogénea, mientras que WOM presenta un comportamiento más irregular.

4.10.2. Comparación de velocidades de transmisión

Se presentan los promedios de velocidades de bajada y subida, comparando las mediciones de velocidad de Entel y WOM.

Tabla 4.12: Comparación de media de velocidades de bajada y subida por ruta y horario entre Entel (iperf3 y Speedtest) y WOM (Speedtest)

Ruta	Horario	Bajada iperf3 Entel	Bajada ST Entel	Bajada ST WOM	Subida iperf3 Entel	Subida ST Entel	Subida ST WOM
Ruta 1	Mañana	6.04	6.91	8.84	8.66	12.37	15.29
Ruta 1	Mediodía	5.24	5.26	3.30	7.11	10.69	6.19
Ruta 1	Tarde	6.65	7.5	6.92	9.81	11.94	21.14
Ruta 2	Mañana	5.59	6.15	18.61	7.47	7.27	23.70
Ruta 2	Mediodía	5.51	4.96	2.88	8.5	8.5	7.34
Ruta 2	Tarde	6.24	7.26	7.42	8.78	10.01	9.59
Ruta 3	Mañana	5.7	6.59	3.45	4.97	9.71	12.41
Ruta 3	Mediodía	3.14	4.19	3.26	6.3	4.08	9.96
Ruta 3	Tarde	2.34	3.56	4.40	2.6	5.74	14.88

En general, WOM logra valores competitivos e incluso superiores a los de Entel en algunos

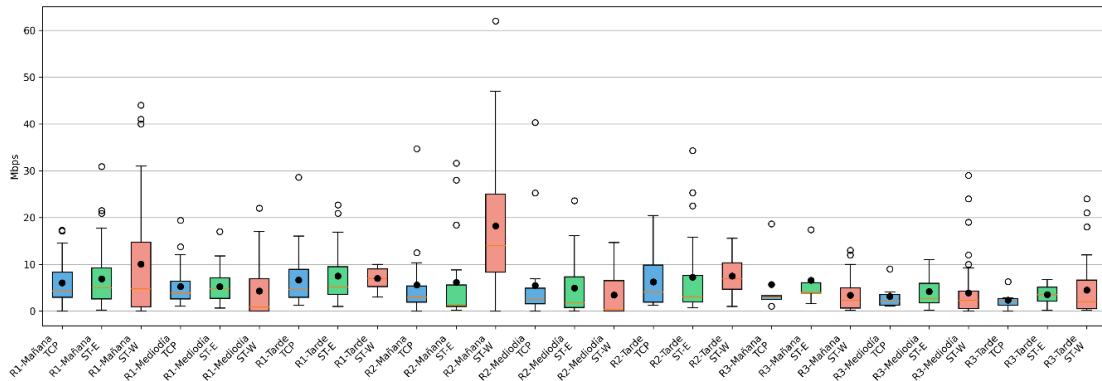
horarios de las rutas. Por ejemplo, destaca el valor de la velocidad ST de WOM en la Ruta 2, en el horario de la mañana donde alcanza 18.61 Mbps en bajada y 23.70 Mbps en subida, superando ampliamente a Entel en ese horario.

Sin embargo, en otros tramos como el horario del mediodía para las Rutas 1 y 3, las velocidades de WOM disminuyen. Esto indica que WOM es capaz de ofrecer un muy buen rendimiento en condiciones puntuales.

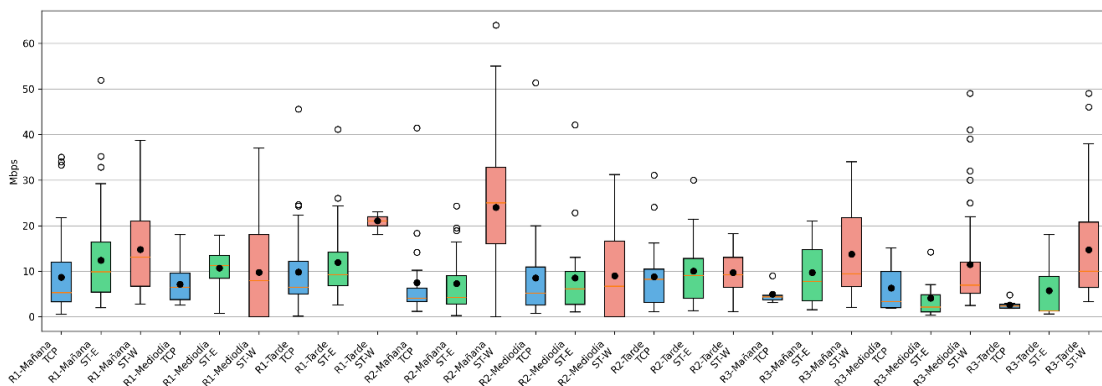
Tabla 4.13: Desviación estándar de velocidades por ruta y horario entre WOM y Entel

Ruta	Horario	Bajada iperf3 Entel	Bajada ST Entel	Bajada ST WOM	Subida iperf3 Entel	Subida ST Entel	Subida ST WOM
Ruta 1	Mañana	4.46	6.22	11.29	8.59	10.01	9.75
Ruta 1	Mediodía	3.82	3.28	6.44	4.13	4.13	8.92
Ruta 1	Tarde	5.56	5.55	2.21	8.74	7.9	1.39
Ruta 2	Mañana	7.79	9.39	14.65	9.29	7.2	13.38
Ruta 2	Mediodía	9.56	6.17	4.71	10.92	9.25	7.97
Ruta 2	Tarde	5.68	8.89	4.06	7.34	7.22	4.38
Ruta 3	Mañana	7.3	6.25	3.40	2.32	8.07	8.78
Ruta 3	Mediodía	2.81	4.0	5.18	6.05	5.0	8.60
Ruta 3	Tarde	1.99	2.35	6.07	1.05	7.43	11.22

El comportamiento previamente visto queda reforzado por la Tabla 4.13 que muestra, en la mayoría de los casos, valores más altos alcanzados por WOM, lo que confirma una menor consistencia en su desempeño. Entel, si bien no alcanza siempre los máximos de WOM, ofrece un servicio más estable a lo largo del tiempo y en las distintas rutas.



(a) Velocidad de bajada

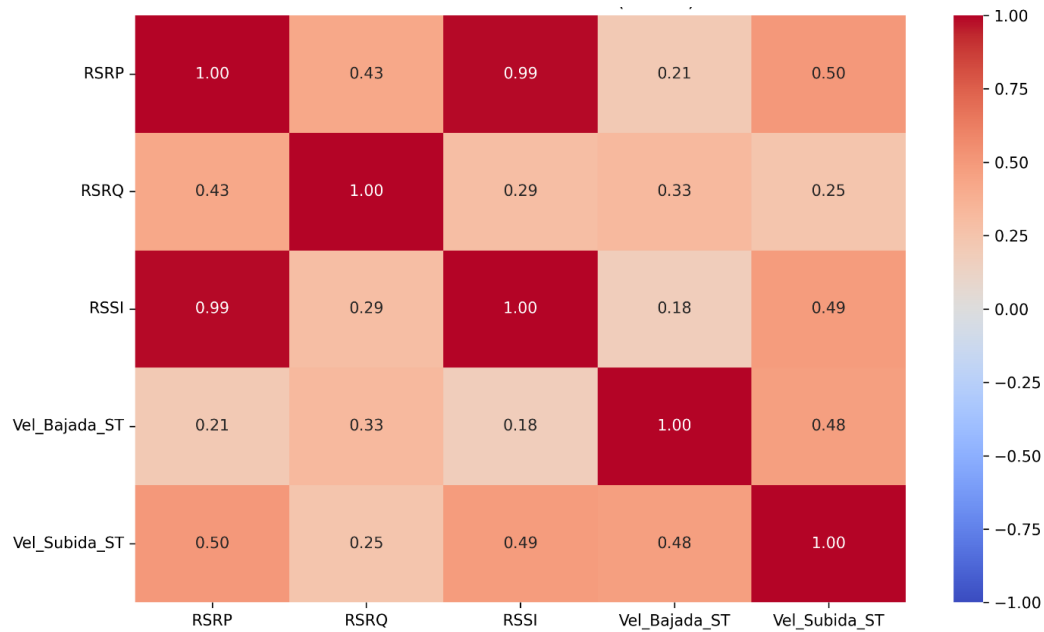


(b) Velocidad de subida

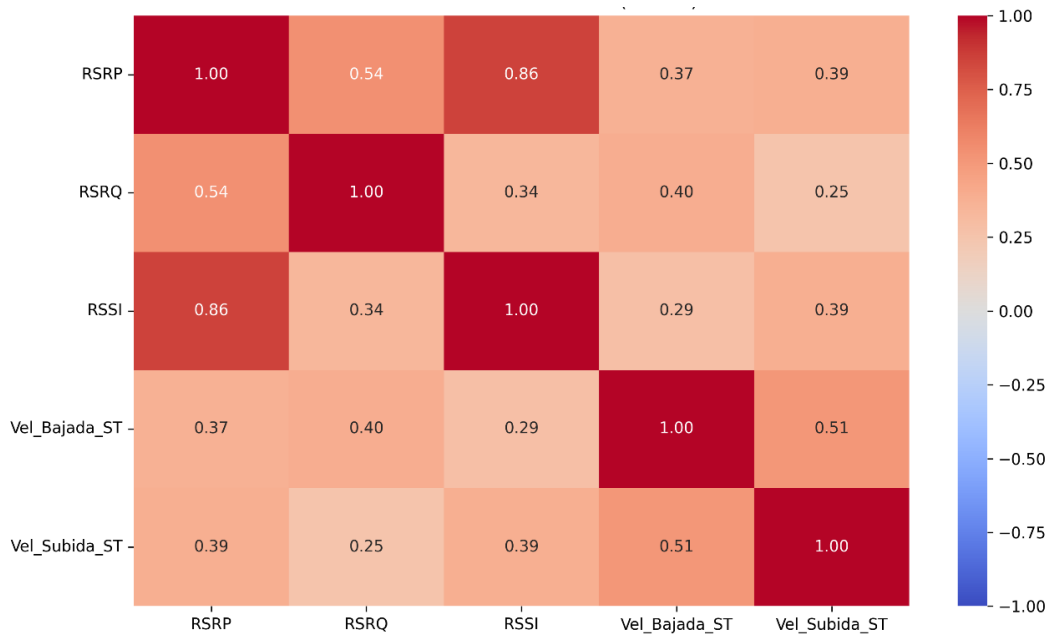
Fig. 4.43 Boxplots comparativos de velocidad Entel vs WOM

Los boxplots refuerzan la observación de las tablas, en donde WOM es la que presenta mayor cantidad de outliers hacia arriba, y sus cajas son más largas por lo que indican mayor dispersión. Entel muestra distribuciones más compactas, especialmente en bajada, aunque sin alcanzar los máximos de WOM en varios tramos. WOM supera a Entel en algunas condiciones específicas, pero Entel ofrece un comportamiento más estable.

4.10.3. Correlación entre parámetros comunes



(a) Entel



(b) WOM

Fig. 4.44 Matrices de correlación por operador

En las matrices de correlación, se aprecia que WOM presenta correlaciones moderadas entre los parámetros de señal y las velocidades medidas en Speedtest. Tanto la bajada como la subida muestran valores de 0.39-0.40 con estos parámetros, lo que indica un comportamiento más lineal que en Entel, el cual relaciona mejor estos parámetros con la velocidad de subida,

pero los de bajada son muy bajos.

En general, nuevamente las correlaciones refuerzan que la calidad de señal no garantiza velocidades altas.

4.10.4. Análisis de regresión para WOM

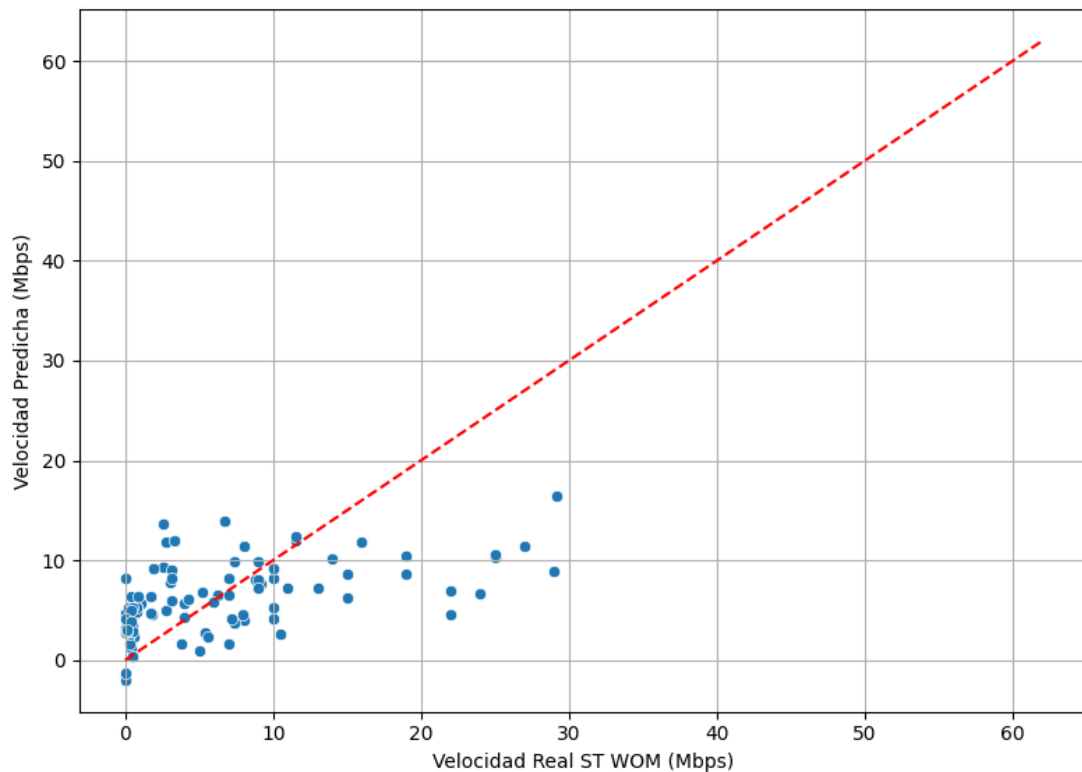


Fig. 4.45 Gráfico de Regresión en el operador WOM

- $R^2 = 0.260$
- RMSE = 6.422 Mbps
- Coeficientes: RSRP = 0.190, RSRQ = 0.895, RSSI = -0.057

El modelo tiene baja capacidad predictiva para WOM. Si bien RSRQ aporta algo de valor, los otros dos parámetros no mejoran sustancialmente la predicción. Esto refuerza lo observado en Entel: los parámetros tradicionales de señal no son suficientes por sí solos para predecir velocidades de bajada de forma confiable.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Sumario

Las mediciones realizadas permitieron observar con claridad como varía el comportamiento de la red LTE del operador Entel, incluyendo una comparación con el operador WOM, bajo condiciones reales y controladas dentro del campus de la Universidad de Concepción.

Respecto a la calidad de señal, Entel mostró los mejores promedios de RSRP y RSRQ, lo que sugiere una mayor homogeneidad en la cobertura, en donde se mostraron las zonas que se pueden considerar buenas o críticas a lo largo de las rutas. WOM destacó en sus niveles de RSSI más altos, posiblemente influenciados por ruido o interferencias en lugar de una señal más robusta. En términos de variabilidad, se observaron comportamientos más estables en la red de Entel, tanto en parámetros físicos como en velocidades.

El análisis por horario reveló que las mediciones realizadas durante la mañana tendieron a mostrar mejores valores de velocidad, mientras que fue el peor horario en los análisis de calidad de señal. Para estos destacó el horario del mediodía.

Las correlaciones entre calidad de señal y velocidad fueron moderadas o débiles, y no se observó una relación lo suficientemente fuerte como para decir que el rendimiento se predice solo con estos parámetros. A pesar de la cercanía al valor 0, la latencia con la velocidad tiene una leve correlación negativa, lo que sugiere que una menor velocidad podría significar una alta latencia.

Las herramientas analíticas aplicadas, como PCA y clustering, facilitaron la relación e identificación de patrones de comportamiento, mientras que los modelos de regresión pusieron en evidencia la limitada capacidad predictiva de los indicadores físicos de señal.

5.2. Conclusión

Este estudio permitió realizar una caracterización profunda del comportamiento de la red LTE de Entel en el campus de la Universidad de Concepción, mediante campañas de medición en terreno con un conjunto amplio de herramientas de análisis estadístico, geoespacial y multivariado. Los objetivos propuestos se cumplieron, tanto generales como específicos, al lograr evaluar comparativamente la calidad de señal y el rendimiento de la red en distintas rutas y horarios.

Se realizaron más de 200 mediciones distribuidas en tres rutas del campus y tres horarios distintos en el operador Entel, sumadas a 400 mediciones previas hechas en WOM. Dentro de una sola medición se capturaron variables clave como RSRP, RSRQ, RSSI, velocidad de bajada y de subida (iperf3 y Speedtest), latencia, jitter, frecuencia, PCI, Cell ID y coordenadas GPS, por lo que se contó con una numerosa cantidad de parámetros para poder evaluar la red LTE de la mejor manera.

Los datos fueron limpiados de valores atípicos, estandarizados y organizados por ruta, horario y operador, permitiendo su análisis estadístico y multivariado en Python.

Esto facilitó su análisis mediante boxplots, histogramas y mapas de calor, donde se observaron diferencias significativas: la mayor velocidad se registró en la mañana, la mejor calidad de señal al mediodía, y la mejor estabilidad en la tarde. La Ruta 1 presentó el mejor desempeño global, mientras que la Ruta 3 fue consistentemente crítica. Por ejemplo, la diferencia de RSRP entre rutas llegó hasta los 18 dBm, y la velocidad de bajada promedio en la Ruta 1 por Speedtest fue más del doble que en la Ruta 3.

El uso de técnicas multivariadas como análisis de correlación, PCA y clustering permitió estudiar la interacción entre variables. Los resultados confirmaron que no existe un único factor determinante del rendimiento. El PCA reveló componentes asociados a la calidad de señal y a la estabilidad, sin una dominancia clara. El clustering (K-means) permitió identificar zonas con comportamiento óptimo, intermedio o crítico, destacando nuevamente la Ruta 1 como la más favorable, y la Ruta 3 como la de peor desempeño.

Se compararon métricas comunes (RSRP, RSRQ, RSSI, velocidad) en igualdad de condiciones entre los operadores Entel y WOM. Entel mostró mayor estabilidad y cobertura homogénea, mientras que WOM presentó mayor variabilidad y dispersión, con velocidades máximas puntuales pero menos consistentes.

Se evidenció que las bandas más altas (como la Banda 7) ofrecieron mayor velocidad. Además, el estudio de PCI y Cell ID permitió asociar celdas específicas a distintos niveles de rendimiento, destacando, por ejemplo, el PCI 314 con mejores velocidades promedio, y el Cell ID 6650113, ubicado en una torre identificada con CellMapper que se encuentra muy

cerca de la Facultad de Ingeniería, cubriendo parte importante de la Ruta 1.

En resumen, todos los objetivos específicos fueron alcanzados mediante una metodología sólida y un enfoque técnico multidimensional. Los resultados evidencian que el comportamiento de la red no depende solo de la calidad de señal, sino de múltiples factores combinados. Esto valida el uso de técnicas multivariadas para el análisis y diagnóstico de redes móviles en entornos reales, además de herramientas replicables para futuros estudios de calidad de servicio en redes móviles.

5.3. Trabajo a Futuro

- Incluir mediciones de redes 5G utilizando los mismos recorridos para evaluar mejoras intergeneracionales.
- Incorporar métricas de carga de red en tiempo real con el fin de estudiar la congestión de usuarios en la calidad de servicio.
- Ampliar el estudio a espacios interiores como salas, bibliotecas o laboratorios, donde las condiciones son distintas.
- Explorar modelos predictivos que puedan captar mejor la complejidad del entorno.
- Realizar encuestas de percepción de usuario, para contrastar la experiencia subjetiva con los indicadores técnicos registrados.

Bibliografía

- [1] Simpson, O., & Sun, Y. (2018). LTE RSRP, RSRQ, RSSNR and local topography profile data for RF propagation planning and network optimization in an urban propagation environment. *Data in brief*, 21, 1724-1737.
- [2] Imoize, A. L., & Adegbite, O. D. (2018). Measurements-based performance analysis of a 4G LTE network in and around shopping malls and campus environments in Lagos Nigeria. *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, 14(2), 208.
- [3] Putra, G. M., Budiman, E., Malewa, Y., Cahyadi, D., Taruk, M., & Hairah, U. (2021, April). 4G LTE Experience: Reference signal received power, noise ratio and quality. In 2021 3rd East Indonesia Conference on Computer and Information Technology (EIConCIT) (pp. 139-144). IEEE.
- [4] Raza, S. N. (2012). LTE performance study (Master's thesis).
- [5] Hassan, R. S., Rahman, T. A., & Abdulrahman, A. Y. (2014). LTE coverage network planning and comparison with different propagation models. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 12(1), 153-162.
- [6] Elsherbiny, H., Nagib, A. M., Abou-zeid, H., Abbas, H. M., Hassanein, H. S., Nouredin, A., ... & Boudreau, G. (2020, December). 4G LTE network data collection and analysis along public transportation routes. In *GLOBECOM 2020-2020 IEEE Global Communications Conference* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Elnashar, A., & El-Saidny, M. A. (2013). Looking at LTE in practice: A performance analysis of the LTE system based on field test results. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 8(3), 81-92.
- [8] Manap, Z., Zain, A. S. M., Said, R. M., & Balakirisnan, S. S. (2020). Analysis of 4G mobile network coverage in UTeM technology campus. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 18(2), 882-889.
- [9] Krawczeniuk, N. (2019). Analysis of LTE network RF performance in a dense urban environment.

- [10] Kurnaz, C., Kola, A. F., & Esenalp, M. O. (2023). Performance analysis and modeling based on LTE-A field measurements: a city center example. *International Journal of Information Technology*, 15(4), 1919-1925.
- [11] Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile (SUBTEL), “SUBTEL define nuevos estándares de calidad para el servicio de acceso a Internet”, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.subtel.gob.cl/subtel-define-nuevos-estandares-de-calidad-para-el-servicio-de-acceso-a-internet/>
- [12] Entel Chile, “Planes de Internet Móvil – Entel”, [En línea]. Disponible en: <https://www.entel.cl/planes/internet-movil>
- [13] Manoranjitham, T., Mohanty, A., & Misra, S. (2019). Performance testing of 4G (LTE) networks in SRM University Kattankulathur new campus. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8(8S), 46-51.
- [14] Imoize, A. L., Orolu, K., & Atayero, A. A. A. (2020). Analysis of key performance indicators of a 4G LTE network based on experimental data obtained from a densely populated smart city. *Data in brief*, 29, 105304.
- [15] Akselrod, M., Becker, N., Fidler, M., & Luebben, R. (2017, September). 4G LTE on the road-what impacts download speeds most?. In *2017 IEEE 86th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall)* (pp. 1-6). IEEE.