



DEPARTAMENTO DE
INGENIERÍA ELÉCTRICA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

PROPUESTA DE MODELOS ESTADÍSTICOS PARA CONEXIONES INALÁMBRICAS EN EL MARCO DE LA LEY 21.046

POR

Rodrigo Owen Andrés Hernández Aguayo

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

Sebastián Eugenio Godoy Medel, Ph.D.

Concepción,
06 de enero de 2026

© 2026 Rodrigo Owen Andrés Hernández Aguayo

© 2026 Rodrigo Owen Andrés Hernández Aguayo

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

A mi madre, mi pareja y mis amigos...

Resumen

La presente memoria tiene como objetivo proponer un método estadístico para determinar la velocidad mínima garantizada en redes móviles 4G, en el contexto de la Ley 21.046, mediante el uso de modelos de distribución de velocidad y detectores de Tasa de Falsa Alarma Constante CFAR aplicados a mediciones en terreno. Para ello, se realizó una campaña de recolección de datos de velocidad de subida y bajada utilizando la aplicación Drive Test UdeC y un dispositivo fijo en la ciudad de Concepción, ejecutando pruebas en protocolo TCP y UDP estandarizadas en redes 4G y 5G. Tras un proceso de depuración y clasificación de los registros, se evaluó el ajuste de distribuciones paramétricas clásicas mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov en distintos niveles de desagregación. Adicionalmente, se diseñó un experimento controlado con un dispositivo fijo en 4G para aislar la variabilidad del canal, modelando la velocidad como una señal determinista con ruido aditivo y aplicando un algoritmo CFAR sobre los histogramas resultantes para estimar probabilidades de detección y definir umbrales operativos.

Los resultados evidenciaron que el throughput móvil presenta un comportamiento multimodal y una alta variabilidad que impide su modelado mediante una distribución única simple, rechazándose sistemáticamente las hipótesis paramétricas tradicionales. No obstante, en el escenario controlado se constató que velocidades objetivo del orden de 10 Mbps en subida y bajada en servidores nacionales se sostienen con alta probabilidad, mientras que en el enlace de subida surgen limitaciones a partir de los 40-45 Mbps, lo que refleja un diseño de red asimétrico favorable al enlace descendente. Se concluye que el enfoque basado en detectores CFAR permite definir umbrales de velocidad mínima garantizada estadísticamente robustos y adaptados a las condiciones del experimento, constituyendo una contribución metodológica significativa para la fiscalización técnica de la calidad de servicio móvil bajo la normativa vigente, al ofrecer una alternativa objetiva frente a la evaluación basada únicamente en promedios temporales.

Abstract

The objective of this thesis is to propose a statistical method for determining the guaranteed minimum speed in 4G mobile networks, within the context of Law 21.046, through the use of speed distribution models and Constant False Alarm Rate (CFAR) detectors applied to field measurements. To this end, a data collection campaign for upload and download speeds was conducted using the Drive Test UdeC application and a fixed device in the city of Concepción, executing standardized TCP and UDP protocol tests on 4G and 5G networks. Following a process of data cleaning and classification, the fit of classical parametric distributions was evaluated using the Kolmogorov-Smirnov test at various levels of disaggregation. Additionally, a controlled experiment was designed with a fixed 4G device to isolate channel variability, modeling speed as a deterministic signal with additive noise and applying a CFAR algorithm to the resulting histograms to estimate detection probabilities and define operational thresholds.

The results evidenced that mobile throughput presents multimodal behavior and high variability, preventing its modeling through a single simple distribution, with traditional parametric hypotheses being systematically rejected. However, in the controlled scenario, it was found that target speeds of around 10 Mbps in uplink and downlink on national servers are sustained with high probability, whereas limitations arise in the uplink starting at 40-45 Mbps, reflecting an asymmetric network design favoring the downlink. It is concluded that the approach based on CFAR detectors allows for the definition of statistically robust guaranteed minimum speed thresholds adapted to the radio conditions of the experiment, constituting a significant methodological contribution to the technical supervision of mobile service quality under current regulations, by offering an objective alternative to evaluation based solely on temporal averages.

Agradecimientos

A lo largo de mi vida he tenido la fortuna de encontrarme con personas maravillosas que me han ayudado a ser mejor persona y a forjarme como profesional. Sería imposible mencionarlas a todas sin escribir otra tesis, por lo que me quedaré con quienes han sido más trascendentales en este camino.

En primer lugar, quiero agradecer a mi madre, Margarita del Carmen Aguayo Huenchumán, quien desde pequeño me alentó a seguir mis sueños y metas. Su apoyo incondicional y su ejemplo han sido fundamentales para formar al hombre que soy hoy. A ella le debo todo, y este trabajo es fruto de su esfuerzo y sacrificio constantes. Mamá, esta tesis es por ti.

Expreso también mi profunda gratitud a mis profesores de Telecomunicaciones. Ellos me formaron como profesional y como persona, combinando la excelencia de sus clases con consejos de vida y una vocación admirable para resolver dudas y acompañar la formación de los profesionales del futuro.

Agradezco sinceramente al Dr. Sebastián Eugenio Godoy Medel por la confianza depositada en mí y por ser el “delta de Dirac” que me impulsó a alcanzar mis metas y a sacar el máximo de mis capacidades. Su apoyo constante, sus enseñanzas y sus consejos de vida en cada conversación han sido un pilar en este proceso. Gracias por las mañanas de café y resolver dudas. Me siento verdaderamente orgulloso de la formación recibida y del profesor guía que tuve en mi tesis.

Gracias a todos mis compañeros del proyecto “ESTUDIO DE METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CÁLCULO DE INDICADORES EN REDES INALÁMBRICAS EN EL MARCO DE LA LEY 21.046” OT 2024-347-11 y, en especial, al jefe de proyecto, Dr. Sergio Sobarzo Guzmán, por confiar en mí e impulsar mis habilidades profesionales en trabajos críticos.

Quiero agradecer a mis compañeros y compañeras de Telecom por todos los momentos compartidos. La vida universitaria fue mucho más amena gracias a su compañía y confianza. Gracias por el apañe, las risas y el apoyo durante toda la carrera. Al fin estoy terminando esta lucha.

Siempre estaré agradecido de mi gigante hijo gatuno, Peter, por acompañarme en los momentos de soledad y traspasos de estudio y escritura. Por ayudarme a distraerme después de horas de trabajo y estudio.

Doy gracias a Dios por mantenerme firme durante todo este proceso. Solo Él conoce las dificultades que se presentaron en el camino, pero gracias a su guía la victoria hoy se ve cercana.

Finalmente, quiero agradecer a mi pareja, Francisca María José Barría Bohle, quien me ha acompañado en gran parte de mi formación y me ha impulsado a tomar oportunidades académicas que por mí mismo jamás me habría planteado. Gracias por ser el pilar fundamental de mi vida y por tener la paciencia de acompañarme en todo el proceso de redacción de esta tesis. Gracias por preocuparte por mí y ayudarme a mantenerme en pie. Parte importante de este trabajo también es tuya, gracias a tu confianza y apoyo incondicional.

Índice General

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Índice de Figuras	IX
Índice de Tablas	XIII
1. Introducción	1
1.1. Trabajos previos	2
1.1.1. Distribución de velocidades en redes móviles	2
1.1.2. Mediciones a gran escala de throughput 4G/5G	2
1.1.3. Pruebas de normalidad y ajuste de distribuciones	3
1.1.4. Variabilidad del canal y fading	3
1.2. Normas y leyes	4
1.2.1. Ley 21.046 (Chile, 2017)	4
1.2.2. Ley 31.207 (Perú, 2021)	4
1.2.3. Europa y otros países	5
1.3. Definición del problema	5
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo general	6
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. Metodología	7
1.6. Alcances y limitaciones	8
1.6.1. Alcances	8

1.6.1.1.	¿Qué cubre el trabajo?	8
1.6.1.2.	Resultados esperados:	9
1.6.1.3.	Condiciones y supuestos	9
1.6.1.4.	Contexto de aplicación	9
1.6.2.	Limitaciones	10
1.6.2.1.	Aspectos que no se abordan	10
1.6.2.2.	Restricciones técnicas o prácticas	10
1.6.2.3.	Incertidumbres	10
1.6.2.4.	Generalización limitada	10
2.	Marco Teórico	11
2.1.	Fundamentos de la Interfaz de Radio	11
2.1.1.	Acceso Múltiple y Modulación (OFDMA)	11
2.1.2.	Estructura de Trama y Asignación de Recursos	12
2.1.3.	Velocidades Teóricas vs. Reales	13
2.1.3.1.	Tecnología 4G LTE	13
2.1.3.2.	Tecnología 5G NR	13
2.2.	Evolución de las redes de acceso móvil	14
2.3.	Parámetros de Quality of Experience (QoE)	14
2.4.	Capacidad de la red	15
2.5.	Ley 21.046 y la velocidad mínima garantizada	15
2.6.	Variabilidad estadística del throughput móvil	16
2.7.	Herramientas de medición y conjunto de datos	16
2.8.	Métodos estadísticos de ajuste y validación	16
2.9.	Teoría de detección y detectores CFAR	17
3.	Desarrollo	19
3.1.	Introducción	19
3.2.	Filtrado de datos	20
3.3.	Distribución de las mediciones	21
3.3.1.	Mediciones globales	21
3.3.2.	Mediciones desagregadas por tecnología	22
3.3.3.	Mediciones desagregadas por rango horario	24
3.3.4.	Mediciones desagregadas por teléfono	25

3.3.5. Mediciones desagregadas por banda	26
3.3.6. Discusión de resultados	27
3.4. KS test	28
3.4.1. Test KS globales	29
3.4.2. Test KS por tecnología	30
3.4.3. Test KS por rango horario	30
3.4.4. Test KS por teléfono	30
3.5. Test KS por banda de frecuencia	31
3.5.1. Discusión de resultados	31
3.6. Target UDP	33
4. Resultados	38
4.1. Introducción	38
4.2. Dispositivo fijo	39
4.2.1. Internacional	39
4.2.2. Nacional	40
4.3. Probabilidad de detección CFAR	45
4.4. Análisis de resultados	47
5. Conclusiones	48
5.1. Sumario	48
5.2. Conclusión	49
5.3. Trabajo a futuro	50
Bibliografía	56
Appendices	57
A. ANEXO: Histogramas	58
A.1. Histogramas desagregados por rango horario	59
A.2. Histogramas desagregados por teléfono	62
A.3. Histogramas desagregados por banda de frecuencia	65
A.4. Histogramas de velocidad objetivo para servidor UdeC nacional	67
B. ANEXO: Pruebas de Kolmogorov-Smirnov (KS)	74
B.1. Resultados prueba KS	74

B.1.1. Test KS globales	74
B.1.2. Test KS por tecnología	75
B.1.2.1. 4G	75
B.1.2.2. 5G	76
B.1.3. Test KS por rango horario	77
B.1.3.1. Rango 00:00 a 09:00	77
B.1.3.2. Rango 09:00 a 18:00	78
B.1.3.3. Rango 18:00 a 00:00	79
B.1.4. Test KS por teléfono	80
B.1.4.1. 2312DRAABG	80
B.1.4.2. 2312DRA50G	81
B.1.4.3. SM-S928B	82
B.1.4.4. Motorola Edge 30 Pro	82
B.1.5. Test KS por banda de frecuencia	83
B.1.6. Banda 700	83
B.1.7. Banda 1900	83
B.1.7.1. Banda AWS	84
B.1.8. Banda 2600	85

Índice de Figuras

2.1. Estructura de la red de recursos LTE.	12
2.2. Representación visual del algoritmo CFAR de promedio de celdas. . . .	18
3.1. Mapa de mediciones de velocidad de internet con la aplicación Drive Test en la ciudad de Concepción.	20
3.2. Histogramas generales de las mediciones realizadas a los servidores con (a) 155 mediciones, (b) 461 mediciones, (c) 777 mediciones y (d) 81 mediciones.	22
3.3. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por tecnología 4G con (a) 44 mediciones, (b) 98 mediciones, (c) 351 mediciones y (d) 47 mediciones.	23
3.4. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por tecnología 5G con (a) 111 mediciones, (b) 369 mediciones, (c) 426 mediciones y (d) 34 mediciones.	24
3.5. Velocidad versus horario para todas las mediciones en general (Nacional e Internacional) en subida (izquierda) y bajada (derecha).	25
3.6. Dispositivo fijo instalado para la medición de velocidades objetivo al servidor UdeC Nacional.	34
3.7. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor ISP2 Internacional.	35
3.8. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.	35
3.9. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.	36

3.10. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 100 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.	36
4.1. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor Internacional.	39
4.2. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor Internacional.	39
4.3. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor Internacional.	40
4.4. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 100 Mbps en servidor Internacional.	40
4.5. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor Nacional.	41
4.6. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor Nacional.	42
4.7. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 40 Mbps en servidor Nacional.	42
4.8. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 45 Mbps en servidor Nacional.	43
4.9. Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 85 Mbps en servidor Nacional.	43
4.10. Boxplot de distrobución de detecciones vs Velocidad objetivo.	44
4.11. Probabilidad de detección vs Velocidad objetivo en servidor nacional para subida y bajada.	45
A.1. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 00:00 a 09:00 con (a) 11 mediciones, (b) 50 mediciones y (c) 85 mediciones.	59
A.2. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 09:00 a 18:00 con (a) 122 mediciones, (b) 305 mediciones, (c) 81 mediciones y (d) 503 mediciones.	60
A.3. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 18:00 a 00:00 con (a) 22 mediciones, (b) 106 mediciones y (c) 189 mediciones.	61

A.4. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono 2312DRAABG con (a) 19 mediciones, (b) 254 mediciones, (c) 291 mediciones y (d) 33 mediciones.	62
A.5. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono 2312DRA50G con (a) 44 mediciones, (b) 98 mediciones, (c) 199 mediciones y (d) 47 mediciones.	63
A.6. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono SM-S928B con (a) 168 mediciones y (b) 109 mediciones. .	64
A.7. Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono motorola edge 30 pro con (a) 73 mediciones y (b) 87 mediciones.	64
A.8. Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 700 MHz. .	65
A.9. Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 1900 MHz. .	66
A.10. Histograma de las mediciones realizadas en la banda AWS de 1700/2100 MHz.	66
A.11. Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 2600 MHz. .	67
A.12. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor UdeC Nacional.	67
A.13. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor UdeC Nacional.	68
A.14. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 20 Mbps en servidor UdeC Nacional.	68
A.15. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 30 Mbps en servidor UdeC Nacional.	69
A.16. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 40 Mbps en servidor UdeC Nacional.	69
A.17. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 45 Mbps en servidor UdeC Nacional.	70
A.18. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor UdeC Nacional.	70
A.19. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 55 Mbps en servidor UdeC Nacional.	71
A.20. Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 60 Mbps en servidor UdeC Nacional.	71

A.21.Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 65 Mbps en servidor UdeC Nacional.	72
A.22.Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 75 Mbps en servidor UdeC Nacional.	72
A.23.Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 85 Mbps en servidor UdeC Nacional.	73

Índice de Tablas

3.1. Bandas de frecuencia utilizadas por los operadores móviles en Chile para la tecnología 4G.	26
3.2. Resumen de resultados del test de Kolmogorov-Smirnov global	29
B.1. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC nacional	74
B.2. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC internacional	74
B.3. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 1 nacional	75
B.4. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 2 internacional	75
B.5. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC nacional en tecnología 4G	75
B.6. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC internacional en tecnología 4G	75
B.7. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 1 nacional en tecnología 4G	76
B.8. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 2 internacional en tecnología 4G	76
B.9. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC nacional en tecnología 5G	76
B.10. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC internacional en tecnología 5G	76
B.11. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 1 nacional en tecnología 5G	77
B.12. Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 2 internacional en tecnología 5G	77

B.13. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 00-09 h	77
B.14. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 00-09 h	77
B.15. Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 00-09 h .	78
B.16. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 09-18 h	78
B.17. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 09-18 h . . .	78
B.18. Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 09-18 h .	78
B.19. Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en 09-18 h	79
B.20. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 18-24 h	79
B.21. Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 18-24 h . . .	79
B.22. Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 18-24 h .	79
B.23. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor UdeC nacional	80
B.24. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor UdeC internacional	80
B.25. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor ISP 1 nacional	80
B.26. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor ISP 2 internacional	81
B.27. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRA50G en servidor UdeC nacional	81
B.28. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRA50G en servidor UdeC internacional	81
B.29. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRA50G en servidor ISP 1 nacional	81
B.30. Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRA50G en servidor ISP 2 internacional	82
B.31. Test de Kolmogorov–Smirnov para SM-S928B en servidor UdeC internacional	82
B.32. Test de Kolmogorov–Smirnov para SM-S928B en servidor ISP 1 nacional	82
B.33. Test de Kolmogorov–Smirnov para motorola edge 30 pro en servidor UdeC nacional	82
B.34. Test de Kolmogorov–Smirnov para motorola edge 30 pro en servidor ISP 1 nacional	83
B.35. Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B700	83

B.36.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B1900	83
B.37.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en banda AWS	84
B.38.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en banda AWS	84
B.39.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda AWS	84
B.40.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en banda AWS	84
B.41.Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B2600	85

Siglas

CFAR Constant False Alarm Rate

CRA Continuous Rate Assignment

ISP Internet Service Provider

LTE Long Term Evolution

MCS Modulation and Coding Scheme

MHT Mean Holding Time

MIMO Multiple Input Multiple Output

NR New Radio

NSA Non-Stand Alone

OFDMA Orthogonal Frequency Division Multiple Access

PRB Physical Resource Block

QoE Quality of Experience

QoS Quality of Service

RE Resource Element

SA Stand Alone

SCS Subcarrier Spacing

TTI Transmission Time Interval

Capítulo 1

Introducción

Las redes móviles se han convertido en el pilar del acceso a Internet para gran parte de la población. En Chile, según estadísticas recientes de la Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), en 2024 se alcanzaron 26.220.026 usuarios abonados a redes móviles, equivalente a una penetración de 130,15 clientes por cada 100 habitantes [1]. Esto evidencia no sólo la alta dependencia de la población respecto a los datos móviles, sino también que el acceso a internet móvil es actualmente considerado una necesidad esencial para las personas.

La evolución de las redes móviles ha estado marcada por saltos generacionales que han redefinido la experiencia del usuario. La transición de 3G a 4G LTE (Long Term Evolution) supuso un cambio radical en la experiencia de usuario. Mientras 3G se orientaba a servicios multimedia de navegación web y videollamadas [2], [3], 4G fue diseñada específicamente para entregar altas velocidades con baja latencia, habilitando servicios de streaming de video en alta definición, videoconferencias y videojuegos en línea [2], [4]. Este hito marcó el comienzo de una dependencia tecnológica sin precedentes.

La llegada de la quinta generación (5G NR) profundiza este efecto. La literatura académica define 5G no como un avance incremental, sino como un “cambio de paradigma mayor” que rompe la compatibilidad con generaciones anteriores [5]. Este cambio se articula en torno a objetivos de ingeniería sumamente ambiciosos, un aumento de hasta 1000 veces en la capacidad de área, una tasa de datos de 100 Mbps para el 95 % de los usuarios (tasa de borde de celda) y una latencia de aproximadamente 1 ms.

A medida que estas tecnologías se masifican y la sociedad depende de ellas para aplicaciones críticas, crece la exigencia social y regulatoria por recibir un servicio estable y acorde a lo contratado. Chile respondió a esa demanda con la Ley 21.046 de Velocidad Mínima Garantizada, que obliga a los proveedores de internet a asegurar, en conexiones fijas, al menos el 95 % de la velocidad prometida en horario de alto tráfico y el 98 % en horario bajo [6]. Aunque el reglamento operativo se centra hoy en servicios fijos, la lógica de transparencia y protección al consumidor interpela directamente a las redes móviles, donde la variabilidad radioeléctrica puede generar brechas aún mayores entre velocidad contratada y la percibida por el usuario.

Para extender los principios de la ley al ámbito inalámbrico es indispensable describir estadísticamente el comportamiento real de la velocidad de subida y bajada bajo distintas condiciones de señal, congestión y entorno. La literatura internacional muestra que estas variables siguen distribuciones fuertemente asimétricas y dependen de factores como la hora del día, la tecnología de acceso o el tipo de dispositivo, lo que exige modelos probabilísticos multivariados capaces de capturar esa complejidad.

1.1. Trabajos previos

1.1.1. Distribución de velocidades en redes móviles

Varios estudios han encontrado que las tasas de datos móviles agregadas no siguen una distribución normal, sino aproximadamente log-normal. Gast [7] señala que múltiples trabajos previos reportan que las velocidades promedio en redes celulares se ajustan bien a una distribución log-normal. Esto refleja la naturaleza altamente variable del throughput móvil, influido por factores de propagación e interferencia.

1.1.2. Mediciones a gran escala de throughput 4G/5G

Qian [8] llevó a cabo un estudio masivo de medición de ancho de banda en redes 4G, 5G y WiFi, recopilando más de 23,6 millones de tests de velocidad en cuatro meses. Encontraron que, si bien 5G ofrece mayores velocidades peak, la mejora real en throughput frente a 4G depende de factores como el ancho de banda de canal disponible,

los dispositivos de los usuarios, la inversión en infraestructura de los ISP, la asignación y migración de recursos de radio, y los avances recientes en tecnología celular. Sus resultados evidencian la gran variabilidad del rendimiento celular, registraron descensos en la velocidad promedio de 4G en 2021 respecto a 2020, atribuibles a cambios en la red y la carga [8]. Estudios así permiten caracterizar estadísticamente la distribución de velocidades de acceso móvil en condiciones reales.

1.1.3. Pruebas de normalidad y ajuste de distribuciones

La literatura muestra un uso extendido de pruebas de bondad de ajuste, como Kolmogorov-Smirnov (K-S), para modelar métricas en redes. Wan [9] analizó el tráfico de vídeo en banda ancha y emplearon la prueba K-S para encontrar la mejor distribución para el throughput de video, identificando que un modelo Pareto generalizado ajustaba mejor los datos reales (con el menor estadístico K-S y p-value aceptable). Así mismo, Ojuh & Isabona (2021) evaluaron ocho distribuciones de probabilidad para tasas de llamadas caídas semanales en una red móvil, combinando pruebas K-S, Chi-cuadrado y Anderson-Darling. Concluyeron que la distribución log-logística era la óptima para modelar la tasa de drops, al presentar los mejores puntajes en las pruebas de bondad de ajuste [10]. Estos trabajos refuerzan la importancia de aplicar pruebas de normalidad/no normalidad al throughput u otros KPI, ya que a menudo la suposición de normalidad es incorrecta.

1.1.4. Variabilidad del canal y fading

En entornos inalámbricos, las rápidas fluctuaciones de la señal (fading) añaden variabilidad significativa al throughput. Clásicamente, en ausencia de línea de vista, la envolvente de la señal sigue una distribución de Rayleigh, mientras que con un componente directo fuerte sigue una Rice (Rician) [11]. Esto implica que la potencia recibida y la tasa instantánea pueden variar aleatoriamente debido al multipath. Un documento técnico de COST 231 describe que en condiciones NLOS (sin línea de vista) la amplitud de la señal exhibe distribución Rayleigh, mientras que en escenarios con línea de vista clara se aproxima a Rice, evidenciando las fluctuaciones rápidas típicas del fading pequeño a escala [11]. Para el throughput, esto se traduce en que

mediciones instantáneas pueden diferir mucho de los promedios. De hecho, estudios de campo en LTE han mostrado que medidas estáticas de velocidad pueden no ser representativas debido a patrones de fading de pequeña escala; es preferible emplear mediciones dinámicas o promedios temporales para una evaluación consistente [12]. En resumen, la variabilidad del canal provoca que el rendimiento inalámbrico sea altamente aleatorio, requiriendo modelos estadísticos para describir la distribución del throughput.

1.2. Normas y leyes

1.2.1. Ley 21.046 (Chile, 2017)

Chile fue pionero al promulgar la Ley N°21.046 que “establece la obligación de una velocidad mínima garantizada de acceso a Internet” [6]. Tras cinco años de tramitación legislativa, entró en vigencia en 2018 con el objetivo principal de proporcionar a los consumidores una herramienta objetiva para verificar la velocidad de Internet contratada. En esencia, la ley modifica la Ley General de Telecomunicaciones para obligar a los ISP a asegurar un porcentaje de la velocidad promedio ofertada. En la práctica, el reglamento técnico fija que, para servicios de internet fijo (redes cableadas), el usuario debe recibir al menos un 95 % de la velocidad contratada en horario punta y un 98 % en horas valle [13]. La ley también creó un Organismo Técnico Independiente (OTI) encargado de medir las velocidades de los usuarios mediante un sistema unificado y emitir informes certificadores. De esta forma, si un cliente comprueba (vía la app oficial VMG Chile) que su velocidad promedio está por debajo de lo garantizado, puede interponer reclamos formales e incluso solicitar compensaciones.

1.2.2. Ley 31.207 (Perú, 2021)

Perú siguió los pasos de Chile con una legislación propia. En junio de 2021 se aprobó la Ley N°31207, que obligó a los operadores peruanos a garantizar al menos el 70 % de la velocidad contratada en servicios de internet de banda ancha [14]. Esta ley entró plenamente en vigor el 3 de diciembre de 2022, tras un periodo de adecuación otorgado por el regulador OSIPTEL. En términos prácticos, si un abonado contrataba 100 Mbps,

ahora debe recibir al menos 70 Mbps (antes el mínimo era 40 % = 40 Mbps) [14]. La regulación peruana abarca tanto redes fijas como móviles, según precisó el Ministerio de Transporte y Comunicaciones, el umbral del 70 % aplica a “internet de banda ancha”, definido desde 2022 como conexiones superiores a 20 Mbps en fijo o 5 Mbps en móvil.

1.2.3. Europa y otros países

La Unión Europea, en el Reglamento (UE) 2015/2120 de neutralidad de la red, obligó a los ISPs a especificar en los contratos la velocidad mínima, máxima, y normalmente disponible de las conexiones. En España y otros países de la UE se suele informar una velocidad mínima garantizada como compromiso contractual, aunque no siempre con fuerza legal de sanción. Un documento reciente del BEREC (2024) señala que algunas definiciones de “acceso adecuado” incluyen un “throughput garantizado” no menor al 20 % de la velocidad máxima anunciada [15].

En el Reino Unido, Ofcom implementó un código de prácticas voluntario en el cual los proveedores deben proporcionar estimaciones realistas de velocidad y permitir la rescisión de contrato sin penalización si las velocidades caen persistentemente por debajo de un cierto mínimo [16].

1.3. Definición del problema

La garantía de la velocidad mínima contemplada en la Ley 21.046 requiere contrastar periódicamente la velocidad de subida y bajada que experimenta el usuario con un porcentaje fijo de la velocidad contratada. Mientras en las redes fijas la dispersión temporal y espacial de las mediciones es relativamente acotada, en las redes móviles la velocidad es una variable aleatoria altamente dependiente de condiciones radioeléctricas cambiantes como el fading, interferencia, carga de la celda, movilidad y pérdidas de penetración [17]. Así, la velocidad medida en 4G/5G puede oscilar enormemente en la misma celda a lo largo del día.

La consecuencia inmediata de lo anterior es la dificultad para asegurar de forma permanente los niveles de desempeño prometidos a los usuarios. Esto ha generado una necesidad urgente de contar con estadísticas de calidad claras, objetivas y validadas

que permitan evaluar el servicio de Internet móvil de manera consistente. Disponer de indicadores estandarizados de rendimiento tales como, velocidad de subida y bajada, latencia, tasa de pérdida de paquetes, entre otros, son cruciales para diagnosticar problemas, comparar el desempeño entre operadores y orientar mejoras en la experiencia de los usuarios.

La fiscalización actual se basa en comparar promedios simples de ventanas de aproximadamente 30 minutos con el umbral legal. Sin embargo, promediar mediciones móviles heterogéneas puede enmascarar períodos de incumplimiento y no refleja la naturaleza estadística del canal.

Considerando el contexto expuesto, surge la necesidad de desarrollar modelos estadísticos de velocidad confiables que permitan evaluar objetivamente la calidad del servicio móvil en Chile. Con esto se abordan nuevas herramientas para que los proveedores de servicios de Internet (ISP) puedan evaluar el QoS entregada a los usuarios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Proponer un método estadístico para determinar la velocidad mínima garantizada en redes móviles 4G, utilizando modelos de distribución de velocidad y detectores CFAR aplicados a mediciones en terreno en el marco de la Ley 21.046, con el fin de definir umbrales de velocidad que respalden la fiscalización y la evaluación objetiva de la calidad de servicio móvil en Chile.

1.4.2. Objetivos específicos

- Revisar bibliografía internacional sobre modelos estadísticos de velocidad inalámbrica.
- Procesar y depurar datos de velocidad de subida y bajada obtenidos mediante mediciones en terreno con la aplicación Drive Test UdeC, asegurando su

consistencia y representatividad para el análisis estadístico.

- Desarrollar y ajustar modelos estadísticos que representen el comportamiento real de la velocidad de conexión móvil, y formular sobre ellos reglas de decisión para detectar incumplimientos de umbrales de velocidad.
- Evaluar el cumplimiento de la Ley 21.046 mediante la aplicación de los modelos estadísticos desarrollados y de detectores CFAR, identificando velocidades objetivo que puedan considerarse velocidades mínimas garantizadas en escenarios 4G concretos.

1.5. Metodología

OE1: Revisar bibliografía internacional sobre modelos estadísticos de velocidad inalámbrica.

1. **Revisión teórica y antecedentes:** Consultar bases de datos académicas como IEEE Xplore, ScienceDirect y Scopus para encontrar artículos técnicos relevantes que definan y validen métricas técnicas (latencia, jitter, throughput, pérdida de paquetes, etc).

OE2: Procesar y depurar datos de velocidad de subida y bajada obtenidos mediante mediciones en terreno con la aplicación Drive Test UdeC, asegurando su consistencia y representatividad para el análisis estadístico.

1. **Fuente de datos:** Descargar los datos de medición de velocidad de Internet realizados con la App “Drive Test UdeC” con propósito del proyecto “ESTUDIO DE METODOLOGÍA DE MEDICIÓN Y CÁLCULO DE INDICADORES EN REDES INALÁMBRICAS EN EL MARCO DE LA LEY 21.046”; Explicar brevemente cómo funciona la aplicación.
2. **Carga de datos:** Importar los datos descargados en un archivo con extensión .json a una base de datos “MongoDB Compass” para la correcta visualización de estos.
3. **Filtrar datos:** Eliminar y filtrar datos atípicos; Clasificar datos utilizando el lenguaje de programación Python con el IDE “Visual Studio Code”; Uso de

estadística descriptiva para resumir las características principales.

4. **Generación de gráficos:** Generar gráficos, histogramas, matrices de correlación y analizar los datos obtenidos de forma visual.

OE3: Desarrollar y ajustar modelos estadísticos que representen el comportamiento real de la velocidad de conexión móvil, y formular sobre ellos reglas de decisión para detectar incumplimientos de umbrales de velocidad.

1. **Exploración inicial:** Histogramas, diagramas Q-Q y densidades kernel para detectar asimetría y colas pesadas; Pruebas de normalidad y de heterocedasticidad.
2. **Modelos de distribución marginal:** Ajuste de log-normal, Gamma y Rayleigh por máxima verosimilitud; selección mediante AIC y test Kolmogorov-Smirnov; Cálculo de percentiles 5, 50 y 95 por zona y franja horaria.
3. **Modelo CFAR:** Aplicar un umbral de detección de Constant False Alarm Rate (CFAR) a mediciones con velocidad objetivo variable.

OE4: Evaluar el cumplimiento de la Ley 21.046 mediante la aplicación de los modelos estadísticos desarrollados y de detectores CFAR, identificando velocidades objetivo que puedan considerarse velocidades mínimas garantizadas en escenarios 4G concretos.

1. **Validez técnica:** Verificar la robustez estadística de los indicadores.
2. **Validez práctica:** Evaluar mediante aplicación a datos reales capturados en Concepción.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1. Alcances

1.6.1.1. ¿Qué cubre el trabajo?

Se modela estadísticamente la velocidad de subida y bajada en redes 4G y 5G de la ciudad de Concepción, empleando Drive Test UdeC como herramienta de medición activa y un dispositivo fijo el cual permite tomar mediciones de forma automática en

un lugar determinado. Las mediciones emplean flujos *iperf3* de 10 segundos con una muestra cada 1 segundo y un conjunto depurado de mediciones válidas distribuidas en servidores nacionales e internacionales.

1.6.1.2. Resultados esperados:

1. Modelos de distribución (log-normal, Gamma, Rayleigh) ajustados por máxima verosimilitud y validados con la prueba KS por tecnología, zona y rango horario.
2. Estadísticos de velocidad y márgenes de cumplimiento legal comparables con la Ley 21.046.
3. Repositorio MongoDB con los datos filtrados, scripts en Python y tablas/figuras.
4. Umbral de detección de velocidad de internet para distintos Targets UDP.

1.6.1.3. Condiciones y supuestos

- Escenario urbano y denso urbano; medidas entre diciembre de 2024 y diciembre de 2025 con smartphones comerciales y un dispositivo fijo, sin tráfico paralelo de usuario en los dispositivos.
- Las mediciones suponen que los nodos de red mantienen configuración estándar y que la congestión observada representa condiciones típicas de la zona de estudio.
- El tiempo de muestra (10 s) es suficiente para aproximar la tasa estacionaria de cada prueba de velocidad.

1.6.1.4. Contexto de aplicación

Fiscalización regulatoria y benchmarking de operadores móviles frente a la Ley 21.046, así como apoyo a planes de mejora de cobertura y capacidad en entornos urbanos con alta densidad de usuarios.

1.6.2. Limitaciones

1.6.2.1. Aspectos que no se abordan

- No se consideran tecnologías previas (2G/3G) o futuras evoluciones (5G SA, 6G).
- No se estudia el impacto de políticas de *traffic shaping* ni de planes comerciales contratados por los usuarios.

1.6.2.2. Restricciones técnicas o prácticas

- La campaña se limita a las mediciones realizadas para el proyecto y un área geográfica acotada (Parque Ecuador, Av. O'Higgins y Campus UdeC en Concepción).
- Sólo se dispone de cuatro servidores de prueba y de los modelos de teléfono presentes en la muestra; cambios de hardware o de versión de la red podrían alterar los resultados.
- Recursos computacionales limitado a equipos personales y licencias de software libre (Python, MongoDB); no se usa equipamiento de laboratorio de alto costo.

1.6.2.3. Incertidumbres

- Variabilidad inherente al canal radio (fading, movilidad) y al *scheduling* de la red[17] que puede introducir sesgos entre mediciones consecutivas.
- Posibles errores de GPS o de sincronización de reloj del dispositivo durante la recolección de datos.

1.6.2.4. Generalización limitada

Los resultados son estrictamente válidos para redes 4G/5G en zonas urbanas chilenas con morfología y densidad de usuarios similares a la de Concepción; extrapolar a zonas rurales o a otras ciudades requiere nuevas campañas de medición y ajustes de modelo adicionales.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Fundamentos de la Interfaz de Radio

Para comprender la variabilidad estocástica del *throughput* analizada en esta tesis, es necesario describir los mecanismos de asignación de recursos en la capa física de las redes móviles modernas. Tanto LTE como NR basan su transmisión en técnicas multiportadora que dividen el canal en recursos de tiempo y frecuencia.

2.1.1. Acceso Múltiple y Modulación (OFDMA)

La base tecnológica de 4G y 5G es el Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) en el enlace descendente. Esta técnica divide el ancho de banda disponible (por ejemplo, 20 MHz) en múltiples subportadoras ortogonales estrechas.

- En 4G, el espaciado entre subportadoras (SCS) es fijo en $\Delta f = 15$ kHz [18].
- En 5G, se introduce el concepto de numerologías flexibles (μ), donde el SCS escala como $2^\mu \cdot 15$ kHz. Esto permite adaptar la red a distintos escenarios. Un SCS mayor (30 o 60 kHz) reduce la duración del símbolo, disminuyendo la latencia [19].

El uso de OFDMA permite mitigar el desvanecimiento selectivo en frecuencia, ya que el *scheduler* puede asignar al usuario solo aquellas frecuencias donde el canal presenta buena calidad, maximizando así la eficiencia espectral.

2.1.2. Estructura de Trama y Asignación de Recursos

La velocidad percibida por el usuario depende directamente de la cantidad de recursos radioeléctricos que la red le asigna dinámicamente. La unidad fundamental de asignación es el Bloque de Recursos Físicos o Physical Resource Block (PRB) por sus siglas en inglés.

- El Resource Element (RE) es la unidad mínima, compuesta por una subportadora en frecuencia y un símbolo OFDM en el tiempo.
- El PRB agrupa 12 subportadoras consecutivas (180 kHz de ancho de banda). El *scheduler* de la estación base (eNodeB en 4G o gNodeB en 5G) decide cuántos PRBs asigna a cada usuario en cada instante de tiempo [20].
- El Transmission Time Interval (TTI) es la granularidad temporal con la que se toman las decisiones de planificación.
 - En LTE, el TTI estándar es de 1 ms (un subframe).
 - En 5G, la estructura de *slot* flexible permite TTIs mucho más cortos (por ejemplo, 0.125 ms), lo que es crucial para servicios de baja latencia..

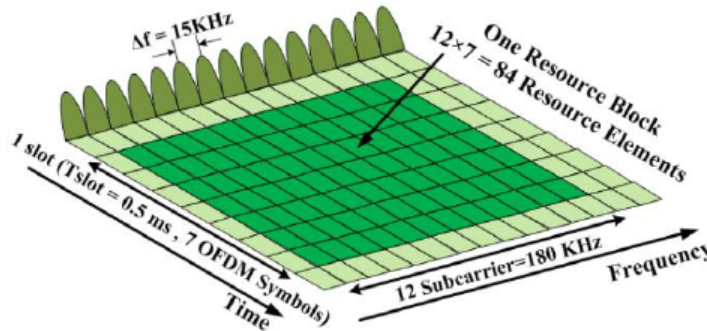


Fig. 2.1: Estructura de la red de recursos LTE.

La figura 2.1, extraída de [21], muestra gráficamente la estructura de la red de recursos LTE. Esta estructura discreta explica por qué la velocidad instantánea (R) varía abruptamente. R es función lineal del número de PRBs asignados (N_{PRB}) en un TTI específico, modulado por la eficiencia espectral (η) del esquema de modulación y codificación (MCS):

$$R(t) \approx N_{PRB}(t) \cdot BW_{PRB} \cdot \eta(SINR) \quad (2.1)$$

Dado que N_{PRB} depende de la carga de la celda (cuántos usuarios compiten por recursos), la velocidad resultante es una variable aleatoria, tal como se modela en el Capítulo 3.

2.1.3. Velocidades Teóricas vs. Reales

Es fundamental distinguir entre la capacidad de canal de Shannon y las tasas máximas definidas por el estándar 3GPP.

2.1.3.1. Tecnología 4G LTE

En su versión base (Release 8), con un ancho de banda de 20 MHz, modulación 64-QAM y configuración MIMO 2x2, la tasa máxima teórica de bajada es de aproximadamente 150 Mbps. Con la evolución a LTE-Advanced (agregación de portadoras y MIMO 4x4), se pueden superar teóricamente a 1 Gbps. Sin embargo, en condiciones de carga real y borde de celda, las tasas típicas oscilan entre 10 y 40 Mbps [22].

2.1.3.2. Tecnología 5G NR

La quinta generación introduce el uso de bandas altas (mmWave) y MIMO masivo.

- Sub-6 GHz (C-Band): Es el escenario predominante. Con anchos de banda de 50-100 MHz, las tasas peaks pueden alcanzar 1-2 Gbps.
- mmWave: Permite anchos de banda de hasta 400 MHz, logrando tasas sobre 10 Gbps.

A pesar de estos máximos teóricos, la Ley 21.046 exige garantizar un porcentaje de la velocidad promedio. Dado que la asignación de PRBs (y por ende la velocidad) varía cada milisegundo (TTI) según el algoritmo de *scheduling*, la medición de cumplimiento normativo se convierte en un problema de estimación estadística sobre un proceso estocástico.

2.2. Evolución de las redes de acceso móvil

El tráfico mundial de datos y los servicios de baja latencia han impulsado una transición acelerada de 3G a 4G Long Term Evolution (LTE) y, más recientemente, a 5G New Radio (NR). Estudios comparativos destacan que 4G fue la primera generación verdaderamente optimizada para datos, mientras que 5G amplía la capacidad peak y reduce la latencia para habilitar realidad virtual y comunicaciones masivas máquina-máquina [3], [5].

2.3. Parámetros de Quality of Experience (QoE)

Para una correcta evaluación del servicio, es fundamental distinguir entre la Calidad de Servicio (QoS) y la Calidad de Experiencia (QoE). Mientras que la QoS se refiere al rendimiento técnico y objetivo de la red medido a través de parámetros de ingeniería, la QoE representa la aceptabilidad general del servicio tal como es percibida subjetivamente por el usuario final. Existe una relación causal inherente entre ambas, las variaciones en las métricas de QoS (causa) determinan directamente el nivel de satisfacción o QoE (efecto) [4], [23].

Los indicadores técnicos de QoS más relevantes que impactan en esta percepción son:

- Throughput (T): volumen de datos útil transmitido por unidad de tiempo.
- Latencia (L) y Jitter (J): el retardo en la entrega de paquetes y la variación temporal de dicho retardo, respectivamente.
- Pérdida de paquetes (PL): proporción de paquetes transmitidos que no logran llegar a su destino.
- Mean Holding Time (MHT): tiempo promedio de ocupación de los recursos de red o duración efectiva de la sesión.

Estos parámetros se asocian intrínsecamente a la experiencia del usuario. Específicamente, el MHT actúa como un indicador indirecto de la QoE, el cual implica una degradación severa en el *throughput* o una latencia excesiva incrementan la probabilidad de abandono temprano por parte del usuario, reduciendo así la duración

efectiva de la sesión [24].

2.4. Capacidad de la red

La capacidad nominal de un enlace físico (NomCap) se define como la tasa máxima teórica soportada por la capa física [25]. La RFC 5136 formaliza la distinción entre capacidad, rendimiento (*throughput*) y buena-puesta (*goodput*) [25].

En el dominio de radiofrecuencia, la capacidad efectiva depende del Modulation and Coding Scheme (MCS) asignado, del Continuous Rate Assignment (CRA) y de las condiciones estocásticas del canal, como el *fading* rápido y el *shadowing* log-normal [17].

Adicionalmente, el uso de técnicas de múltiples antenas o Multiple Input Multiple Output (MIMO) resulta determinante para la capacidad final del sistema. Estas técnicas explotan el dominio espacial mediante dos mecanismos:

- **Diversidad espacial:** mejora la confiabilidad del enlace combatiendo el desvanecimiento, lo que estabiliza el *throughput* en bordes de celda.
- **Multiplexación espacial:** permite transmitir múltiples flujos de datos paralelos (*layers*) sobre el mismo recurso de tiempo-frecuencia, incrementando la capacidad de forma lineal respecto al número de antenas [5].

2.5. Ley 21.046 y la velocidad mínima garantizada

La Ley 21.046 obliga a los proveedores fijos a entregar $\geq 95\%$ de la velocidad contratada en hora punta y $\geq 98\%$ en hora valle [6]. Su eventual extensión a redes móviles exige modelos estadísticos que consideren la fuerte variabilidad radioeléctrica, la movilidad y la carga instantánea de la celda.

2.6. Variabilidad estadística del throughput móvil

Mediciones reales muestran distribuciones asimétricas y con colas pesadas; log-normal, Gamma y mezclas han sido usadas para modelarlas [17], [26]. En enlaces semi-estacionarios, la velocidad puede modelarse como

$$S(t) = S_{\text{obj}} + n(t) \quad (2.2)$$

donde S_{obj} es la velocidad fijada y $n(t) \approx$ ruido gaussiano de media 0 y varianza σ^2 .

2.7. Herramientas de medición y conjunto de datos

La App Drive Test UdeC ejecuta iperf3 para generar flujos TCP/UDP de 10 ssegundos y registrar una muestra $\mathbf{T}$ cada 1 segundo. Los datos se filtran y se cargan en MongoDB para análisis. iPerf3 es un estándar de facto para medición activa de ancho de banda [27].

2.8. Métodos estadísticos de ajuste y validación

Se emplea estimación por máxima verosimilitud para obtener los parámetros de las distribuciones y se selecciona el modelo óptimo mediante el criterio AIC. Posteriormente, la bondad de ajuste se contrasta con la prueba de Kolmogorov-Smirnov (KS), una prueba no paramétrica que cuantifica la distancia entre la distribución empírica de la muestra y la distribución de referencia acumulada. Su estadístico está definido por:

$$D = \sup_x |S_N(x) - F_0(x)|, \quad (2.3)$$

donde:

- $S_N(x)$ es la función de distribución acumulada empírica de la muestra de tamaño N , calculada como la proporción de observaciones menores o iguales a x .

- $F_0(x)$ corresponde a la función de distribución acumulada teórica especificada bajo la hipótesis nula (H_0).

Bajo H_0 , el estadístico D posee una distribución libre de parámetros, lo que permite calcular valores críticos independientes de la forma específica de la distribución probada [28]. Resultados parciales para distintos servidores y tecnologías se documentan en Tablas B.1–B.12.

2.9. Teoría de detección y detectores CFAR

El problema de verificar si una velocidad de conexión cumple con un mínimo garantizado puede formularse, desde la perspectiva de la teoría de detección, como una prueba de hipótesis binaria. En este marco, la detección consiste en decidir si una muestra de señal observada corresponde solo a ruido (o interferencia) o a la presencia de un objetivo de interés sumado a ese ruido. La regla de decisión óptima (criterio de Neyman-Pearson) busca maximizar la probabilidad de detección (P_D) para una probabilidad de falsa alarma (P_{FA}) fija, comparando la amplitud de la señal con un umbral de detección T [29].

Sin embargo, en entornos reales de radar y comunicaciones, la potencia del ruido o interferencia rara vez es conocida y constante. Si se utiliza un umbral fijo calculado para un nivel de ruido supuesto, un aumento real en la potencia de interferencia provocará un incremento drástico en la tasa de falsas alarmas. Para resolver esto, se emplean procesadores de Tasa de Falsa Alarma Constante (CFAR, Constant False Alarm Rate), los cuales ajustan adaptativamente el umbral de detección basándose en estimaciones locales del nivel de ruido [29].

El algoritmo más común es el CFAR de Promedio de Celdas (CA-CFAR). En este esquema, la estimación de la potencia de interferencia en la celda bajo prueba (CUT, Cell Under Test) se obtiene promediando la potencia de un conjunto de celdas de referencia vecinas (celdas de entrenamiento) que se asume contienen solo ruido. Para evitar que la energía del propio objetivo contamine esta estimación, se suelen dejar “celdas de guard” inmediatas a la CUT que no se incluyen en el promedio [29].

La figura 2.2 [30] muestra gráficamente cómo se aplica el algoritmo de CFAR.

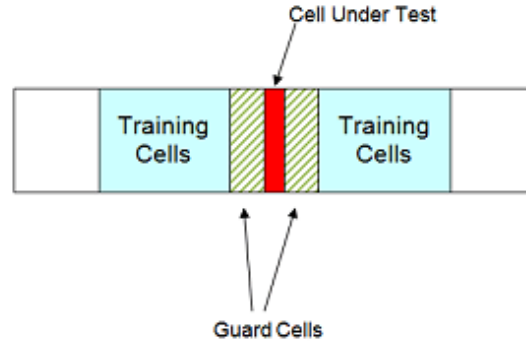


Fig. 2.2: Representación visual del algoritmo CFAR de promedio de celdas.

Matemáticamente, el umbral adaptativo T se calcula multiplicando la estimación del nivel de ruido local P_n por una constante de escala α .

$$T = \alpha \cdot P_n \quad (2.4)$$

El factor α se determina en función de la probabilidad de falsa alarma deseada (P_{FA}) y del número de celdas de referencia utilizadas N . Para un detector cuadrático y ruido gaussiano complejo, la relación viene dada por:

$$P_{FA} = \left(1 + \frac{\alpha}{N}\right)^{-N} \quad (2.5)$$

o equivalentemente,

$$\alpha = N \left(P_{FA}^{-\frac{1}{N}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

En este contexto, la aplicación de un detector CA-CFAR permite definir dinámicamente si una medición de velocidad cumple con la condición de “señal detectada” frente a la variabilidad del canal móvil. De este modo, se asegura que la tasa de error al declarar el cumplimiento del umbral se mantenga controlada y constante, independientemente de las fluctuaciones de potencia o congestión momentánea de la red.

Capítulo 3

Desarrollo

3.1. Introducción

Los datos presentados en esta investigación pertenecen al proyecto de “Estudio de metodología de medición y cálculo de indicadores en redes inalámbricas en el marco de la Ley 21.046”, OT 2024-347-11 a cargo del docente Dr. Sergio Sobarzo Guzmán. En ella se realizaron mediciones de velocidad de internet móvil con la aplicación “Drive Test” desarrollada por el académico para la toma de datos del proyecto. Las mediciones de internet móvil fueron realizadas por integrantes del equipo de trabajo junto con estudiantes asistentes remunerados específicamente para esta tarea.

La campaña de medición se llevó a cabo durante finales del 2024 e inicios del 2025 en el centro de la ciudad de Concepción, cubriendo los sectores Parque Ecuador, avenida O’Higgins y el Campus de la Universidad de Concepción. El trabajo de campo fue realizado por miembros del equipo y por estudiantes contratados como encuestadores. En total se recopilaron 6.501 mediciones, cuyo despliegue espacial se muestra en la Figura 3.1.

La base de datos resultante incluye, entre otras variables, la velocidad de descarga (Mbps), velocidad de subida (Mbps), intensidad de señal RSRP (dBm), calidad de señal RSRQ (dB), banda de operación, hora del día, tecnología, posición GPS y modelo de dispositivo.

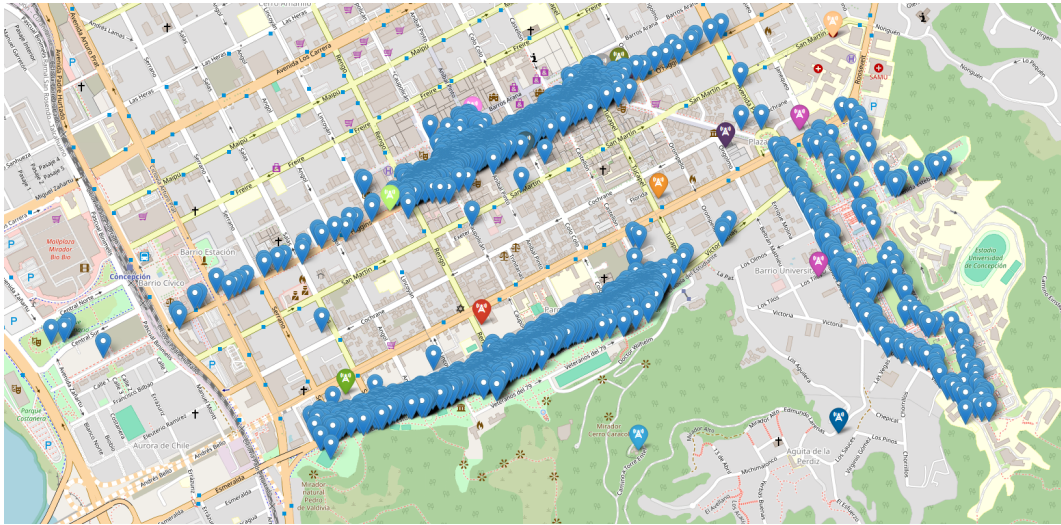


Fig. 3.1: Mapa de mediciones de velocidad de internet con la aplicación Drive Test en la ciudad de Concepción.

La base de datos se presenta en un formato de archivo .json la cual se cargó en *MongoDB Compass* para su visualización y estudio de la estructura de guardado con el propósito de posteriormente ser procesado con Python para la generación de tablas y gráficos representativos.

3.2. Filtrado de datos

Debido a que el estudio incluyó mediciones en redes WiFi y móviles, se procedió a filtrar los datos para la correcta visualización de estos. Razón por la cual, de los 6501 datos medidos en primera instancia, se descartaron aquellos que se realizaron en la versión Alpha de la aplicación debido a que se requerían ajustes de esta misma. Así, se cuentan con 4855 mediciones desde la versión de app 1.0.3.

Posteriormente, se filtraron por mediciones realizadas exclusivamente en redes móviles, obteniendo un número de 4379 mediciones para finalmente, eliminar datos con errores y vectores vacíos. Los datos quedaron compuestos por un total de 1474 mediciones válidas.

En la base de datos se encuentran mediciones en 4 servidores principales:

- Servidor Nacional UdeC: 155 mediciones.

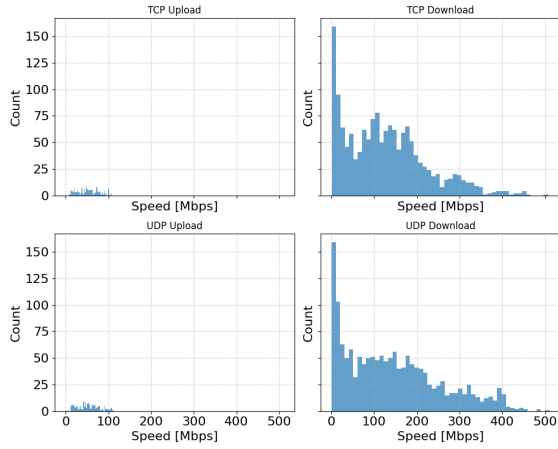
- Servidor Internacional UdeC (latencia): 461 mediciones.
- Servidor nacional ISP 1: 777 mediciones.
- Servidor Internacional ISP 2: 81 mediciones.

La caracterización de las mediciones se realizará filtrando por cada uno de estos servidores.

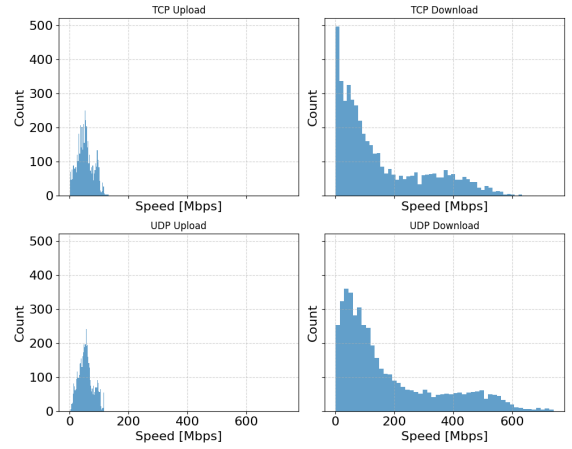
3.3. Distribución de las mediciones

3.3.1. Mediciones globales

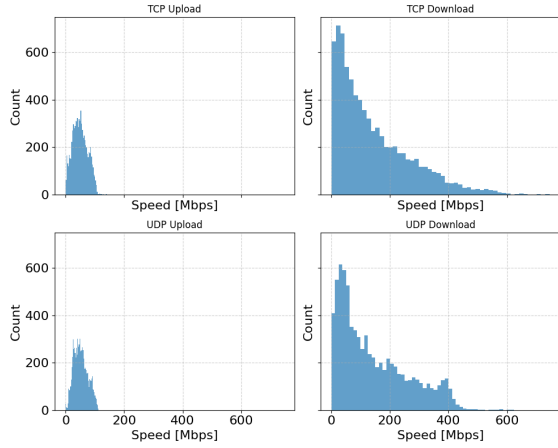
Al momento de realizar una medición con la app a alguno de los servidores mencionados anteriormente, la prueba ejecuta a través de `iperf3` mediciones de velocidad en los protocolos TCP y UDP en subida y bajada en intervalos de 1 segundo con una duración de 10 segundos (10 muestras). Para conocer la distribución de las mediciones se pueden observar los histogramas de las figuras 3.2.



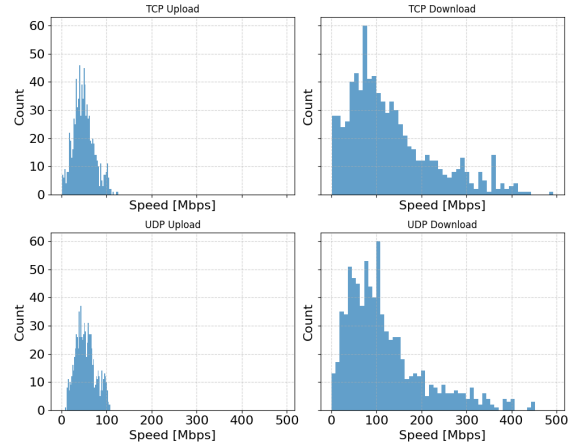
(a) Servidor UdeC Nacional.



(b) Servidor UdeC Internacional.



(c) Servidor ISP 1 Nacional.



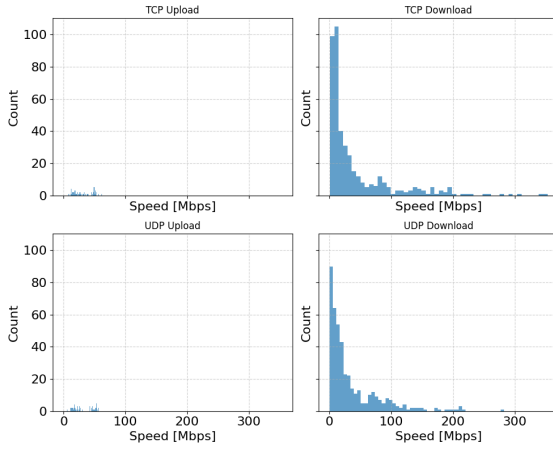
(d) Servidor ISP 2 internacional.

Fig. 3.2: Histogramas generales de las mediciones realizadas a los servidores con (a) 155 mediciones, (b) 461 mediciones, (c) 777 mediciones y (d) 81 mediciones.

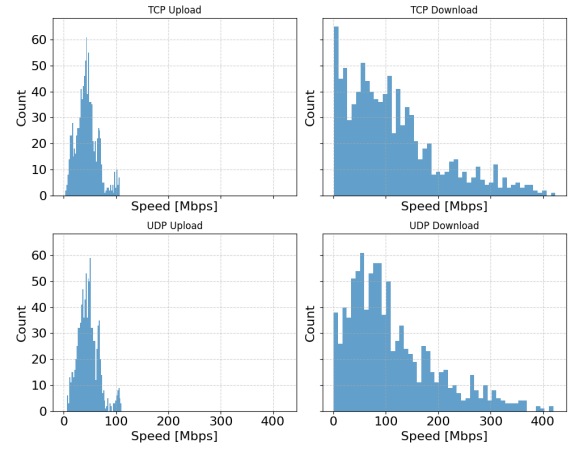
Los histogramas representados en la figura toman cada una de las muestras obtenidas en los 10 segundos de la medición.

3.3.2. Mediciones desagregadas por tecnología

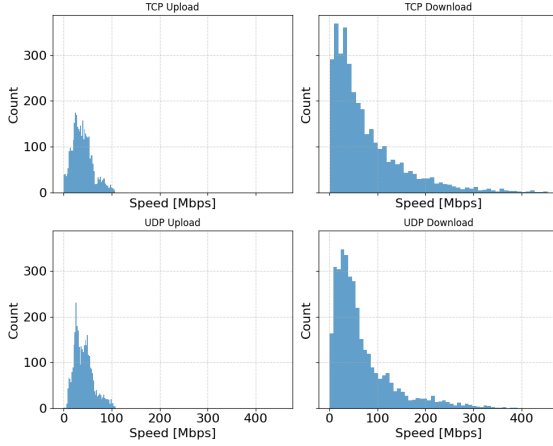
En la base de datos se cuenta con mediciones realizadas en tecnología 4G y 5G, por lo tanto, se pueden mostrar sus distribuciones en las siguientes figuras:



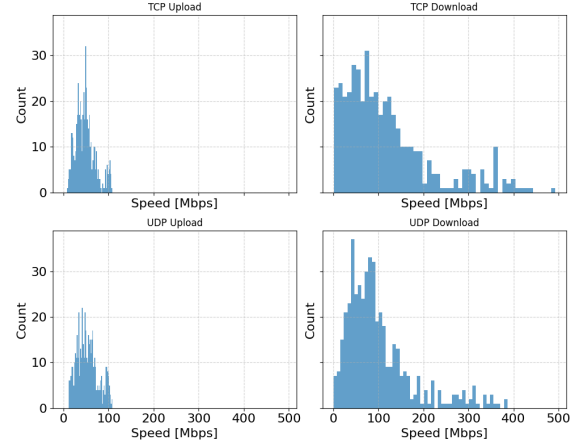
(a) Servidor UdeC Nacional.



(b) Servidor UdeC Internacional.



(c) Servidor ISP 1 Nacional.



(d) Servidor ISP 2 Internacional.

Fig. 3.3: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por tecnología 4G con (a) 44 mediciones, (b) 98 mediciones, (c) 351 mediciones y (d) 47 mediciones.

En la figura 3.3 se puede observar que para el protocolo TCP y UDP en subida su distribución se puede representar con la suma de múltiples gaussianas, mientras que en el protocolo TCP y UDP de descarga nacional se observa una distribución similar a una Gamma.

Para la tecnología 5G en la figura 3.4 se observa una distribución compuesta de suma de múltiples Gaussianas incluso para subida nacional.

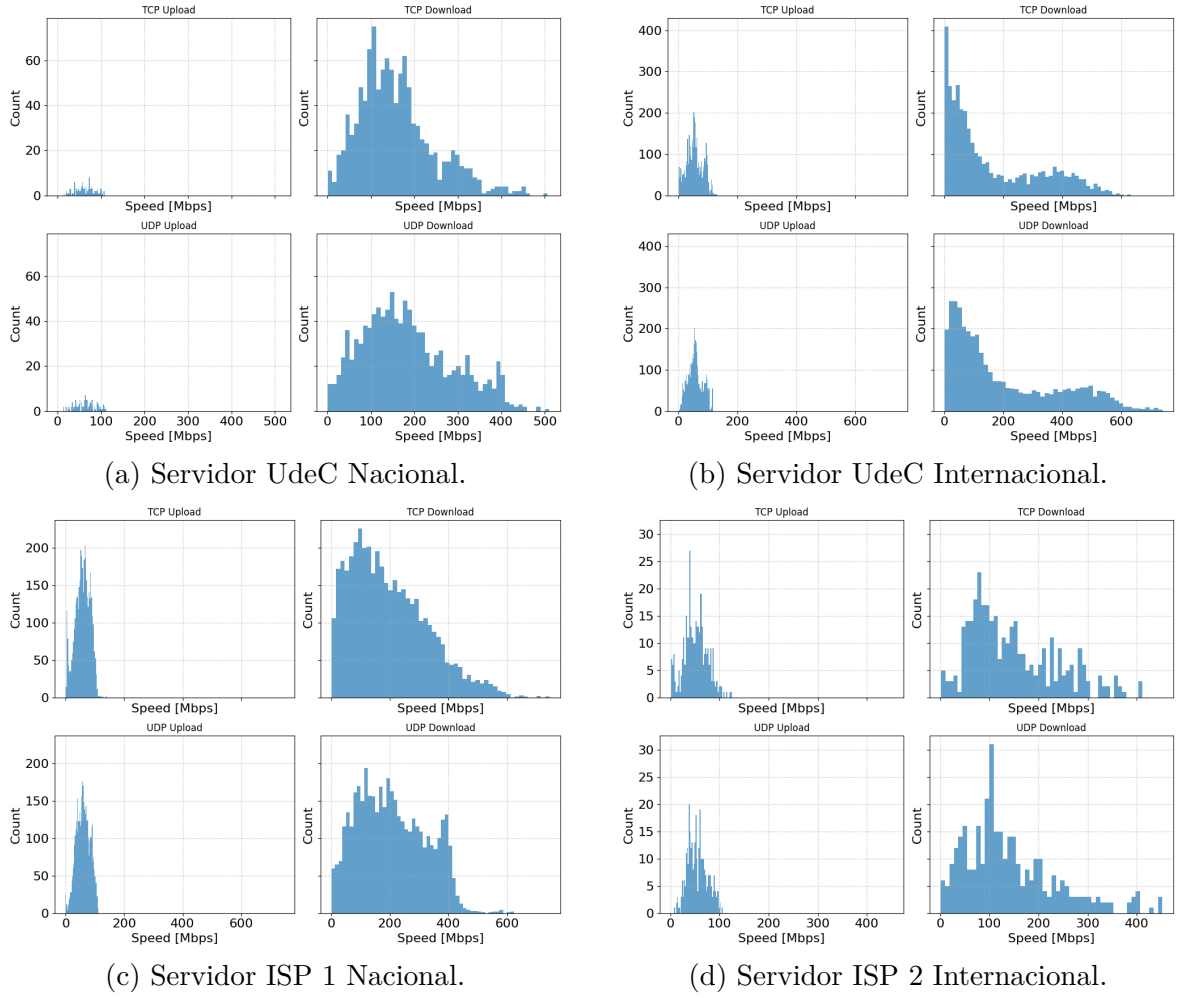


Fig. 3.4: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por tecnología 5G con (a) 111 mediciones, (b) 369 mediciones, (c) 426 mediciones y (d) 34 mediciones.

3.3.3. Mediciones desagregadas por rango horario

En la figura 3.5 se muestra el valor promedio del vector de velocidad respecto al horario en el que se hizo la medición en formato de 24 horas, abarcando fechas del 08/03/2025 hasta el 15/05/2025. Se observa que no se realizaron mediciones en la madrugada alrededor de las 3:00 hasta las 7:00, pero los demás horarios presentan mediciones consistentes. Además, se observa que en horarios desde las 20:00 a las 3:00 es donde se alcanzan mayores velocidades, de esto se infiere que se pueden obtener velocidades mayores cuando hay menos usuarios activos en la red.

Para poder desagregar respecto a rangos horarios es necesario crear grupos representativos. Estos se crearon a partir de supuestas actividades diarias.

- 00:00 a 09:00 Horario de bajo tráfico.
- 09:00 a 18:00 - Horario de alto tráfico - Jornadas laborales.
- 18:00 a 00:00 - Horario de tráfico medio, retorno de las personas a sus hogares.

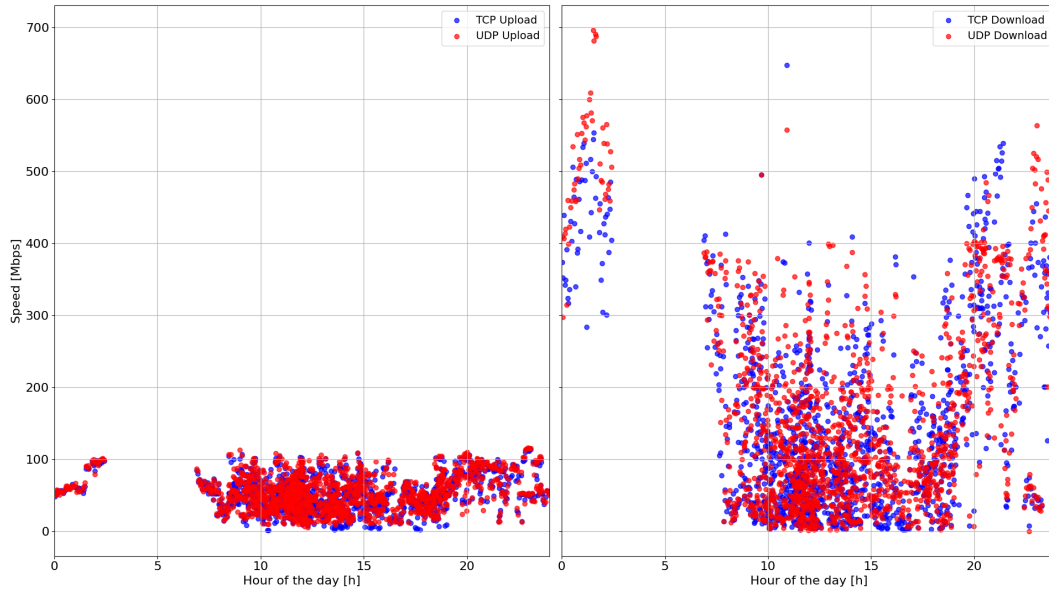


Fig. 3.5: Velocidad versus horario para todas las mediciones en general (Nacional e Internacional) en subida (izquierda) y bajada (derecha).

En las figuras A.1 a A.3 se muestran los histogramas desagregados por los grupos horarios mencionados. En particular, la figura A.1 del rango horario de 00:00 a 09:00 horas no presenta mediciones en el servidor de ISP 2 internacional.

Se puede observar que las distribuciones de los histogramas se comportan de forma similar para los 2 primeros rangos, en cambio, para los rangos de 18:00 a 00:00 se muestra más desordenado, lo que indicaría la posibilidad de suma de múltiples Gaussianas.

3.3.4. Mediciones desagregadas por teléfono

Debido al amplio despliegue de personas para realizar mediciones, estas se hicieron con variados modelos de teléfonos los cuales se detallan a continuación:

- 2312DRAABG: 597 mediciones.
- 2312DRA50G: 388 mediciones.
- SM-S928B: 272 mediciones.
- Motorola Edge 30 Pro: 160 mediciones.
- SM-A045M: 37 mediciones.
- SM-A055M: 9 mediciones.
- SM-S921B: 7 mediciones.
- 2109119DG: 3 mediciones.
- SM-S938B: 1 mediciones.

Para encontrar de qué forma se distribuyen los datos de acuerdo al modelo de teléfono utilizado, se muestran los histogramas de los 4 primeros teléfonos con más mediciones (figura A.4 - A.7).

Respecto a las figuras se puede observar que al desagregar los histogramas por modelo de teléfono no se puede encontrar una distribución única gaussiana en los datos.

3.3.5. Mediciones desagregadas por banda

En Chile, las redes 4G operan principalmente en las bandas de 700 MHz, 1900 MHz, 2600 MHz y AWS 1700/2100 MHz, según el resumen de frecuencias por operador reportado en [31].

Tabla 3.1: Bandas de frecuencia utilizadas por los operadores móviles en Chile para la tecnología 4G.

Operador	Banda 4G [MHz]
Claro	B2 (1900), B7 (2600), B28 (700)
Movistar	B2 (1900), B7 (2600), B28 (700)
Entel	B2 (1900), B7 (2600), B28 (700)
WOM	B4 (1700/2100)

Para analizar la distribución estadística de las mediciones, se desagregaron los datos según las cuatro bandas de frecuencia 4G utilizadas en Chile, resumidas en la Tabla 3.1.

En las Figuras A.8–A.11 se muestran los histogramas de velocidad segmentados por banda de operación. En todos los casos, las distribuciones de throughput TCP y UDP presentan una clara asimetría hacia la derecha, con colas largas en descarga, coherente con un comportamiento aproximadamente log-normal de las tasas de datos.

Al comparar las bandas bajas (por ejemplo, B700) con las bandas altas (B1900 y B2600), se observa que las primeras concentran la mayor parte de sus realizaciones en rangos de velocidad intermedios, con menor dispersión, mientras que las bandas altas exhiben velocidades pico más elevadas y una varianza significativamente mayor, especialmente en tráfico de descarga UDP. Esto sugiere que las bandas altas ofrecen un mayor potencial de capacidad, a costa de una mayor variabilidad temporal del throughput.

En subida, para todas las bandas la distribución de velocidades se mantiene más acotada y con valores máximos sensiblemente menores que en descarga, lo que confirma la asimetría estructural de las redes 4G a favor del canal descendente. Estas diferencias estadísticas entre bandas resultan consistentes con el dimensionamiento radio y la asignación de ancho de banda en las redes comerciales analizadas.

3.3.6. Discusión de resultados

Desde la figura 3.2 en adelante se intentó encontrar gráficamente la distribución de los datos a partir de la desagregación de distintos parámetros. La multimodalidad observada en los histogramas sugiere que el throughput móvil es una variable aleatoria mixta, influenciada fuertemente por el scheduler de la red, lo cual explica el rechazo sistemático de la hipótesis nula en los tests KS". Recordando que comprender la distribución estadística de las variables medidas es un paso imprescindible antes de aplicar cualquier procedimiento inferencial. Esto se debe a que un amplio número de métodos clásicos se desarrollan sobre supuestos explícitos acerca de la forma de la distribución (normal, gaussiana, gamma, etc.). Cuando tales supuestos no se cumplen, las estimaciones pueden volverse sesgadas, las probabilidades de error alterarse y, por ende, las conclusiones del estudio resultar engañosas. Además, conocer la forma de la distribución facilita la detección de valores atípicos, la elección de transformaciones

adecuadas y la selección de métodos robustos o no paramétricos cuando la dispersión o la asimetría son notorias.

Dentro de las herramientas disponibles para contrastar una distribución teórica o para comparar dos muestras independientes se encuentra el test de Kolmogórov-Smirnov (KS). El test KS presentado en detalle por Massey, se define a partir del estadístico mostrado en la ecuación 2.3.

Una característica esencial del contraste es que su distribución nula es *distribution-free*, lo cual indica que depende sólo del tamaño muestral N y no de la forma concreta de $F_0(x)$. Gracias a esta propiedad, los valores críticos tabulados (Tabla 1 de Massey) permiten calcular p -valores exactos sin estimar parámetros adicionales, lo que hace viable el test incluso con muestras pequeñas. Además, el KS conserva toda la información de cada observación al no requerir agrupar datos; esto evita la pérdida de potencia que afecta a la prueba χ^2 cuando se emplean pocos intervalos. El propio Massey muestra que, a igualdad de nivel de significación, el KS detecta discrepancias más pequeñas entre distribuciones que la prueba χ^2 y proporciona un límite inferior analítico para la potencia, facilitando el cálculo del tamaño muestral necesario en la fase de diseño experimental [28].

Conocer la distribución de las velocidades y contrastarla con el test KS aporta rigor a la interpretación de los resultados. Permite justificar la capacidad de aplicar métodos paramétricos posteriores, delimitar con objetividad la presencia de anomalías y respaldar las comparaciones entre escenarios de red o modelos de dispositivo. De este modo, se garantiza que las conclusiones extraídas acerca del rendimiento y la calidad de servicio se apoyen en evidencias estadísticas sólidas y no en supuestos implícitos o visualizaciones aisladas.

3.4. KS test

Para poder conocer las distribuciones de los datos se aplicó la prueba KS de mano de la biblioteca *scipy* [32] en Python, la cual trae la prueba KS implementada. Se probaron las siguientes distribuciones:

- Nomal

- Gamma
- Rayleigh
- Log-Normal

En la prueba KS, el resultado se reporta como rechazo (R) o no rechazo (NR) de la hipótesis nula H_0 . Un NR indica que los datos son compatibles con H_0 , lo que indica que no existe evidencia suficiente para concluir que H_0 sea falsa. Esto no implica que H_0 sea verdadera; solo que, con la información disponible y al nivel de significancia $\alpha = 0,05$ (95 % de confianza), la discrepancia observada no es lo bastante grande como para rechazarla.

3.4.1. Test KS globales

Las tablas completas se encuentran en el anexo B.1 - B.4.

Tabla 3.2: Resumen de resultados del test de Kolmogorov-Smirnov global

Servidor	Rechazo	No rechazo
UdeC Nacional	62.50 %	37.5 %
UdeC Internacional	100 %	0 %
ISP 1 Nacional	100 %	0 %
ISP 2 Internacional	81.25 %	18.75 %

Respecto a las tablas se puede observar que solo para el servidor UdeC Nacional para el protocolo TCP y UDP en subida no se rechaza la hipótesis de la distribución normal, gamma y rayleigh, con mayor valor p en la distribución normal. En cambio, para los demás servidores se rechazan todas las hipótesis de distribuciones.

En todos los casos, la hipótesis nula H_0 corresponde a que las mediciones de velocidad siguen la distribución teórica considerada (Normal, Gamma o Rayleigh). En la tabla, “rechaz” indica que, para el nivel de significancia fijado, la prueba KS entrega evidencia suficiente para descartar esa distribución como modelo adecuado; en cambio, “no rechazo” significa que los datos son compatibles con la distribución propuesta, es decir, no se encontró evidencia estadística para invalidar H_0 , aunque esto no implica demostrar que el ajuste sea perfecto.

3.4.2. Test KS por tecnología

En esta sección se evalúa el ajuste estadístico de las tasas de transferencia separando las mediciones en las tecnologías 4G y 5G. Los resultados (tablas B.5–B.12) indican que, aunque 5G presenta velocidades máximas más altas y una dispersión mayor, el comportamiento cualitativo del KS es similar en ambas tecnologías: predominan los rechazos de los modelos simples y sólo se obtienen algunos no rechazos en condiciones de menor variabilidad. Esto sugiere que el cambio de tecnología modifica la escala de las velocidades, pero no simplifica la forma de la distribución del throughput.

3.4.3. Test KS por rango horario

Al aplica el test de Kolmogorov–Smirnov a las mediciones desagregadas por ranngo horario. Se evalúa el ajuste en los intervalos 00–09 h, 09–18 h y 18–24 h. Los resultados, presentados en las tablas B.13–B.22, muestran un patrón similar al análisis global: se observan múltiples rechazos de las distribuciones simples, con algunos casos de no rechazo en horarios de menor carga. Esto indica que la variabilidad temporal del tráfico introduce cambios en la forma de la distribución, pero no modifica el hecho de que el throughput es difícil de describir mediante un único modelo paramétrico.

3.4.4. Test KS por teléfono

De manera análoga, se aplicó la prueba KS a las mediciones desagregadas por modelo de teléfono. Las tablas B.23–B.34 resumen los resultados. En general, se observan diferencias en el valor del estadístico KS entre equipos, lo que refleja el impacto del hardware y del stack de protocolos en el rendimiento medido. Sin embargo, el patrón global se mantiene: las distribuciones simples son frecuentemente rechazadas, con algunos no rechazos puntuales en escenarios menos variables, por lo que el efecto del terminal no cambia la dificultad de ajustar el throughput a un modelo único.

3.5. Test KS por banda de frecuencia

Finalmente, se evalúa el ajuste estadístico de las tasas de transferencia separando las mediciones por banda de frecuencia. Los resultados detallados se presentan en las tablas B.35-B.41 y muestran el mismo patrón que en las desagregaciones anteriores. En la mayoría de los casos se rechazan las distribuciones paramétricas simples, con algunos no rechazos aislados en escenarios de menor variabilidad (principalmente subida). Esto confirma que, aun fijando la banda de operación, el throughput móvil mantiene un comportamiento multimodal y difícil de modelar con una única distribución teórica.

3.5.1. Discusión de resultados

Los contrastes de Kolmogórov–Smirnov aplicados a los datos globales (Tabla B.1 a B.4) muestran un patrón consistente. Fuera de la subida TCP/UDP del servidor UdeC Nacional, todas las combinaciones servidor-protocolo rechazan las cuatro distribuciones propuestas (Normal, Gamma, Rayleigh y Log-normal). Cuando el análisis se desagrega por tecnología (Tablas B.5-B.12) o por franja horaria (Tablas B.13-B.22), el comportamiento se acentúa. Sólo en contadas celdas el valor-p supera 0,05, y estas ocurren precisamente en segmentos con muestras muy pequeñas o en los canales de subida, donde la variabilidad es menor.

Al segmentar por modelo de teléfono (Tablas B.23-B.34) la situación es aún más drástica, la multiplicidad de combinaciones dispositivo-servidor hace que prácticamente todas las hipótesis se rechacen.

Existen varias razones de fondo que explican la imposibilidad de encontrar una “distribución única” que describa las velocidades observadas. En primer lugar, la velocidad efectiva de un enlace móvil está condicionada por la naturaleza altamente aleatoria del canal radioeléctrico (fading rápido, interferencia inter-celda, pérdidas de penetración, cambios de modulación y codificación), estas se superponen continuamente, generando colas pesadas y distribuciones claramente multimodales. A esto se suma la heterogeneidad ambiental y de carga, las mediciones se realizaron en horarios, ubicaciones y niveles de congestión muy distintos, de modo que las variaciones provocadas por la red (scheduling y asignación de recursos) se mezclan con las del

propio canal físico, rompiendo cualquier intento de estacionariedad.

En segundo lugar, el propio proceso de desagregación merma la potencia estadística del KS. Cuanto más fina es la segmentación (tecnología, hora o teléfono), más pequeños son los subconjuntos analizados y más inestables resultan los estimadores de escala; incluso cuando el test no rechaza H_0 , la conclusión se apoya en muestras escasas y no puede generalizarse. Finalmente, los distintos chipsets y algoritmos de control de potencia que implementan los teléfonos añaden otra capa de variabilidad. Al agrupar dispositivos con lógicas de transmisión dispares, se obtiene una mezcla que no se asemeja a ninguna distribución paramétrica sencilla.

Estas evidencias tienen implicaciones directas para el modelado posterior. Los supuestos paramétricos clásicos (normalidad de residuales, homocedasticidad) no se cumplen y emplearlos conduciría a intervalos de confianza demasiado optimistas. En su lugar, resulta más apropiado adoptar modelos de mezcla o enfoques no paramétricos, por ejemplo estimaciones de densidad mediante kernels o percentiles empíricos móviles. En el contexto regulatorio, describir el desempeño mediante percentiles (p5, p50, p95) por celda y franja horaria ofrece una caracterización robusta y evita imponer una forma teórica única que los datos, por su naturaleza mixta y altamente variable, no pueden soportar.

El análisis exploratorio de los datos reveló una alta complejidad que impide el ajuste de distribuciones simples. El rechazo sistemático de la hipótesis nula en las pruebas KS demuestra que el throughput en redes móviles urbanas no se comporta como una variable aleatoria estacionaria simple, sino como un proceso estocástico mixto influenciado fuertemente por la movilidad y la asignación dinámica de recursos. Esta evidencia obliga a cambiar el enfoque del problema, dado que no es posible ajustar una única curva de distribución para predecir el comportamiento en todo momento, resulta más robusto evaluar el cumplimiento normativo mediante un enfoque de detección de anomalías. Sin embargo, para validar la eficacia de un detector, es requisito fundamental caracterizar primero el “ruido base” del sistema en ausencia de la incertidumbre introducida por el desplazamiento del usuario.

Para reducir al mínimo las fuentes de variabilidad y validar un modelo de referencia, se diseñó un experimento en un entorno controlado que permite reinterpretar el problema desde otra perspectiva. Partiendo del ejemplo de un dado, la probabilidad de obtener

cualquiera de sus caras sigue una distribución uniforme con $P(X) = \frac{1}{6}$; sin embargo, si se analiza el evento $X > k$, con $k = 0, 1, \dots, 5$ éste se distribuye de forma lineal con la ecuación $P(X > k) = \frac{6-k}{6}$ [33]. En el caso de variables aleatorias continuas con distribución uniforme, un razonamiento análogo lleva a un modelo de Bernoulli. Al observar el mismo experimento bajo un criterio distinto, la distribución estadística desde la que se miran los datos cambia [33]. De este modo, el problema de estimar una velocidad promedio se puede reformular como decidir si la velocidad satisface o no la velocidad mínima garantizada por el operador, lo que se traduce en un problema binario de detección respecto de un umbral de acceso a Internet [33]. Es por esto que se propone analizar un nuevo set de datos desde un enfoque en el cual se fija una velocidad objetivo en el protocolo UDP donde se busca limitar lo máximo posible el número de variables ambientales en juego. Para ello se estableció un dispositivo fijo compuesto por una Raspberry Pi 4 Model B que realiza mediciones de velocidad de internet en un punto fijo a través de un modem 4G. En ella se ajustan intervalos de medición con el objetivo de medir las 24 horas y se fijan velocidades objetivo variadas.

3.6. Target UDP

Con el fin de aislar la variabilidad inherente al canal móvil y validar la hipótesis de detección planteada, se diseñó un experimento en condiciones de canal estacionario. Se implementó un nodo de medición estático (Dispositivo Fijo) que opera sobre la red móvil 4G, permitiendo fijar variables críticas como la ubicación, la celda servidora y la antena.

Este escenario controlado busca emular una señal determinista embebida en ruido, permitiendo verificar si, al eliminar la movilidad, el detector es capaz de distinguir correctamente entre el cumplimiento de la velocidad objetivo y las fluctuaciones naturales de la carga de la red.



Fig. 3.6: Dispositivo fijo instalado para la medición de velocidades objetivo al servidor UdeC Nacional.

Utilizando el dispositivo fijo (Fig. 3.6) se llevaron a cabo dos campañas de medición. En la primera se registraron 11463 muestras entre el 29/05/2025 y el 16/07/2025, en distintas ubicaciones de la ciudad de Concepción, realizando una medición cada 5 minutos y fijando velocidades objetivo de 1, 10, 50 y 100 Mbps hacia el servidor ISP 2 Internacional. En la segunda campaña, realizada en el laboratorio de Optrónica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, se obtuvieron 1189 mediciones entre el 24/11/2025 y el 09/11/2025, también con un intervalo de 5 minutos, dirigidas a un servidor UdeC Nacional y con velocidades objetivo de 1, 10, 20, 30, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 75 y 85 Mbps (Fig. A.12–A.23), posicionando el dispositivo para obtener una potencia RSRP de aproximadamente -80 dBm. Este diseño experimental busca identificar el punto de quiebre en la detección de la velocidad objetivo.

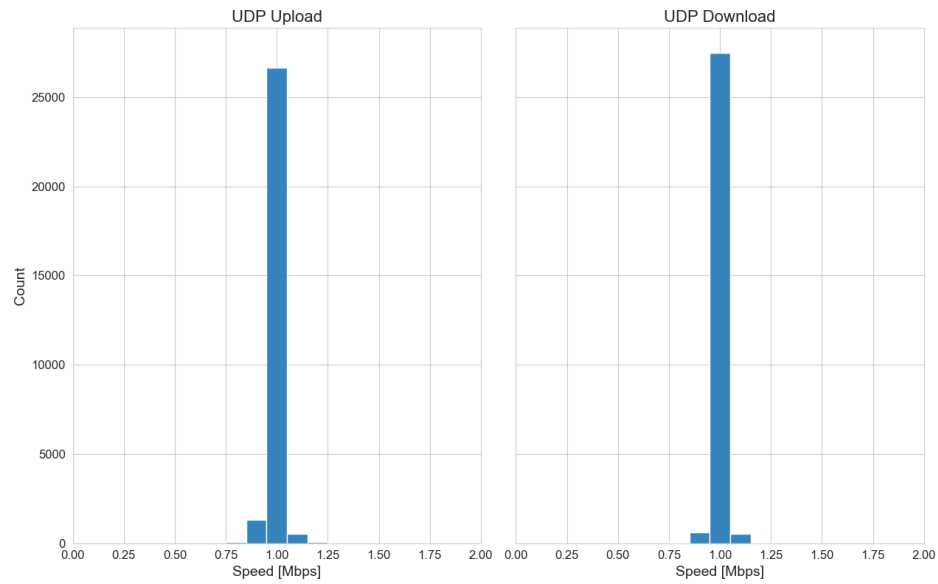


Fig. 3.7: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor ISP2 Internacional.

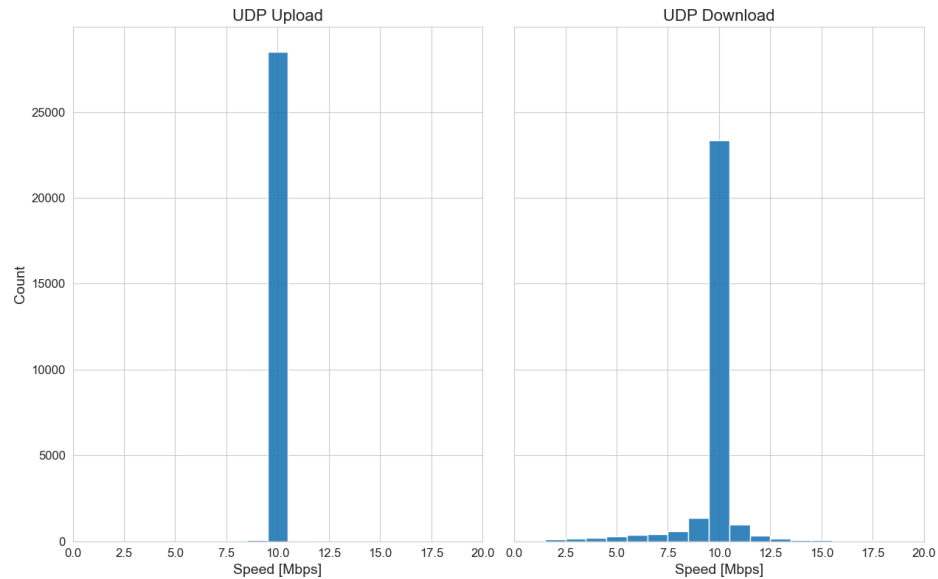


Fig. 3.8: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.

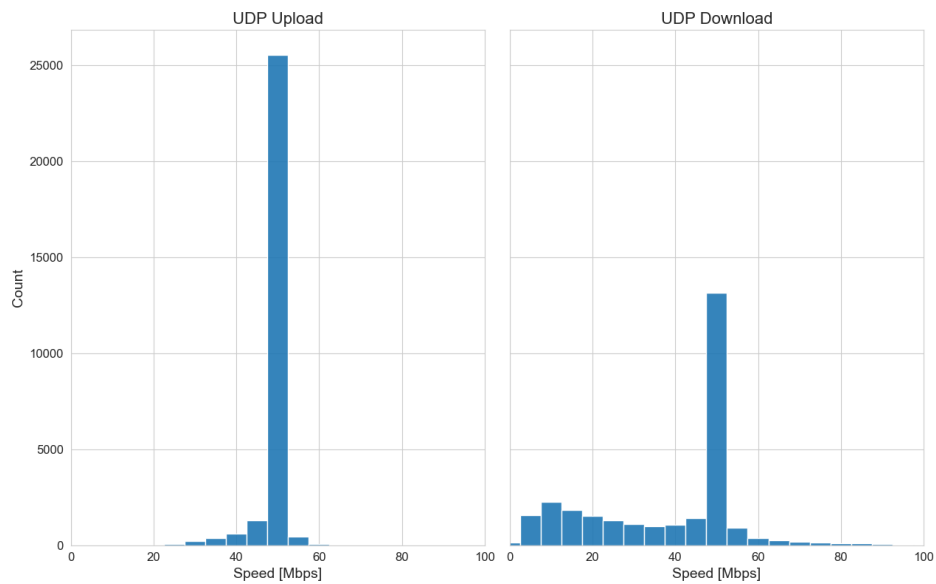


Fig. 3.9: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.

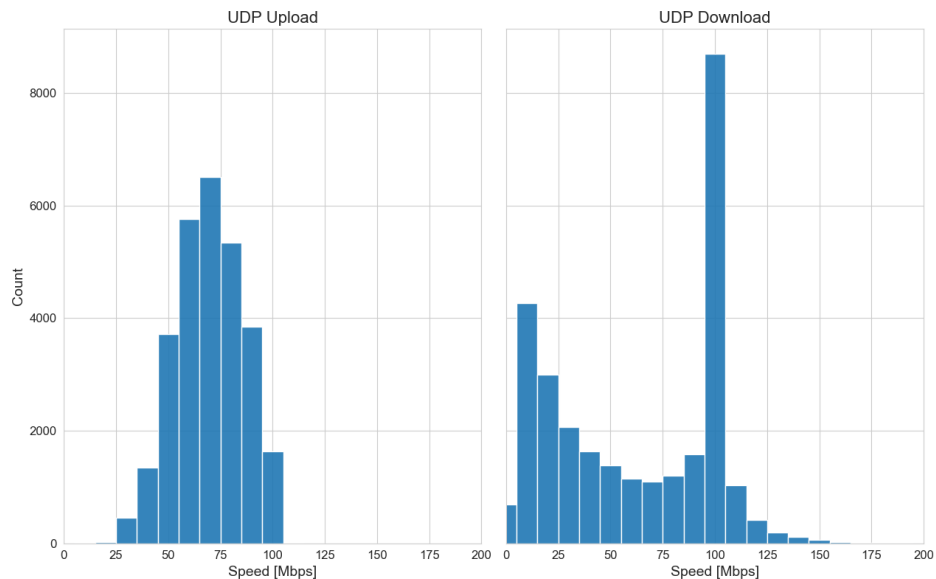


Fig. 3.10: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 100 Mbps en servidor ISP 2 Internacional.

Mantener constantes la ubicación, la antena, la potencia de transmisión y la ruta IP permitió que la variabilidad residual se redujera casi exclusivamente a la dinámica del canal radioeléctrico y a la carga instantánea de la celda.

Los histogramas resultantes muestran un *lóbulo central* pronunciado alrededor de la velocidad objetivo, especialmente claro en los perfiles de 1 y 10 Mbps (Fig. 3.7 y 3.8). La dispersión es casi simétrica y sus colas descienden con pendiente similar a la de una gaussiana; a 50 y 100 Mbps aparece un leve sesgo a la izquierda, coherente con la mayor probabilidad de saturación de recursos de radio a tasas altas. Estos indicios respaldan el modelo de la ecuación 2.2, donde S_{obj} es la velocidad fijada y $n(t)$ es un ruido aditivo gaussiano de media cero cuya desviación estándar σ^2 refleja el estado momentáneo de la red. El planteamiento es verosímil porque la velocidad instantánea se calcula como promedio de miles de subportadoras OFDMA; la combinación de muchas fluctuaciones pequeñas tiende a normalizarse según el Teorema Central del Límite.

Dentro de las ventajas del modelo de señal embebida en ruido gaussiano se tiene que esta permite estimar la relación señal-ruido $\text{SNR} = S_{\text{obj}}/\sigma$ y derivar intervalos de confianza para la velocidad percibida. Además de facilita la detección de degradaciones como un problema de decisión binaria: basta comparar cada muestra con $S_{\text{obj}} - k\sigma$ para fijar una tasa de falsa alarma.

En cuanto a las limitaciones se tiene que el ruido no es completamente blanco, existen correlaciones a escala de segundos (TTI) y de minutos (fluctuaciones de carga). Un muestreo cada cinco minutos mitiga, pero no elimina esa dependencia. También las colas derechas en los perfiles de 50 y 100 Mbps indican eventos extra-gaussianos (p. ej. *handover* o *scheduler starvation*). Estas pueden modelarse con una mezcla gaussiana o bien recortando tales colas al estimar σ .

El modelo es válido sólo para el enlace y la célula evaluados. Al extrapolarlo a otras zonas será necesario recalibrar σ , ya que éste recoge tanto la calidad radio global como la política de reparto de recursos.

En síntesis, abordar los registros *Target UDP* como una señal determinista embebida en ruido gaussiano describe adecuadamente la variabilidad residual bajo condiciones fijas y ofrece una herramienta práctica para fijar umbrales de cumplimiento de la Ley 21.046. A escala de red completa, este enfoque deberá hibridarse con modelos de mezcla o totalmente no-paramétricos para reflejar la pluralidad de escenarios observados en las pruebas de Kolmogórov–Smirnov anteriores.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Introducción

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de las campañas de medición de velocidad en redes móviles 4G, tanto hacia un servidor nacional como hacia un servidor internacional, utilizando tráfico UDP de subida y bajada. El objetivo principal de este análisis es explorar la factibilidad de emplear detectores de tasa de falsa alarma constante (CFAR, Constant False Alarm Ratio) para identificar, de manera estadísticamente controlada, un umbral de velocidad mínima garantizada en el contexto de la Ley 21.046. Para ello, se variaron sistemáticamente las velocidades objetivo de los flujos UDP y se evaluó la capacidad del detector CFAR para reconocer cuándo el sistema es capaz de sostener dichas velocidades en condiciones reales de operación.

Es importante destacar que los resultados presentados en este capítulo se centran en el escenario de Dispositivo Fijo. Esta decisión metodológica responde a la necesidad, identificada en el capítulo anterior, de validar la estabilidad del detector CFAR en un entorno donde el canal radioeléctrico presenta una varianza acotada. Demostrar la convergencia del detector en este escenario “ideal” es el paso previo y necesario para establecer la viabilidad técnica de su uso en fiscalizaciones masivas o en movimiento.

4.2. Dispositivo fijo

4.2.1. Internacional

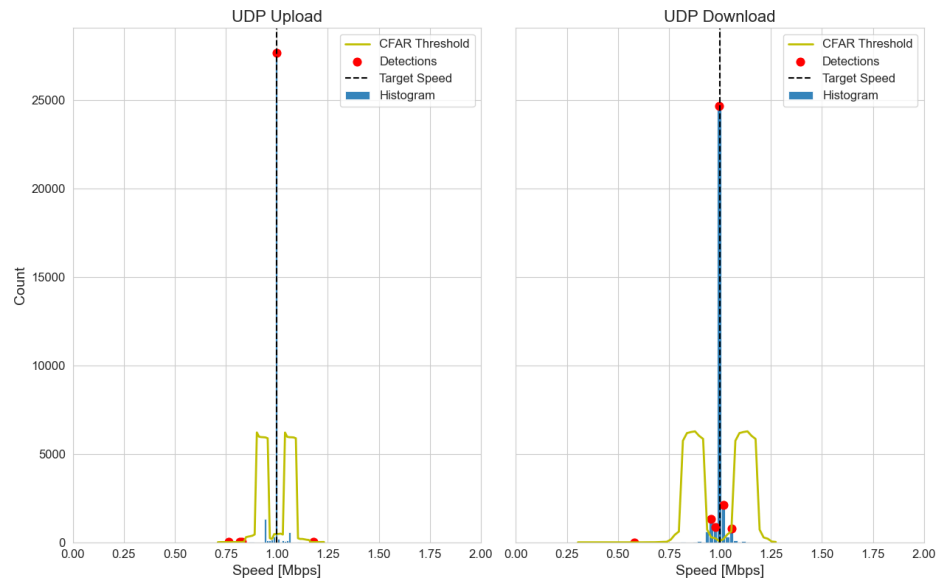


Fig. 4.1: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor Internacional.

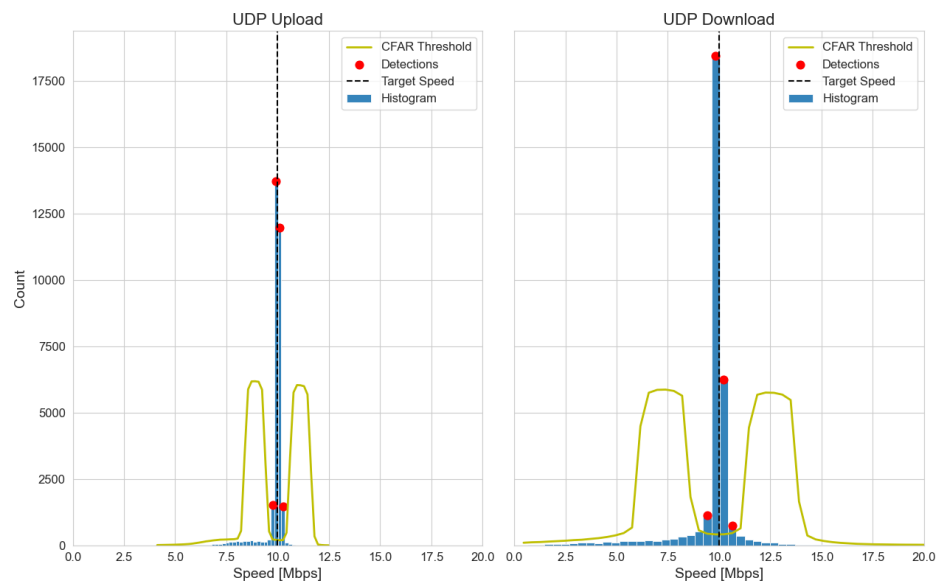


Fig. 4.2: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor Internacional.

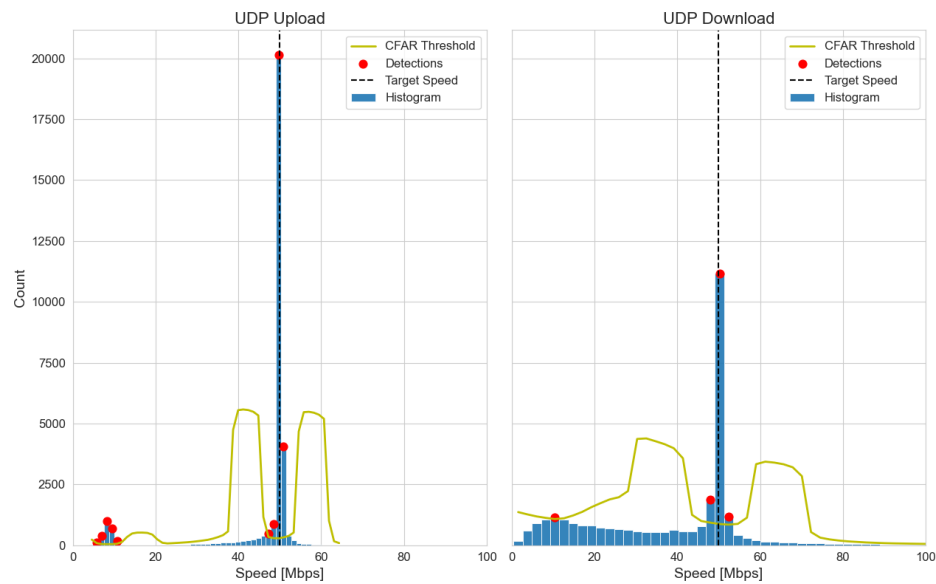


Fig. 4.3: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor Internacional.

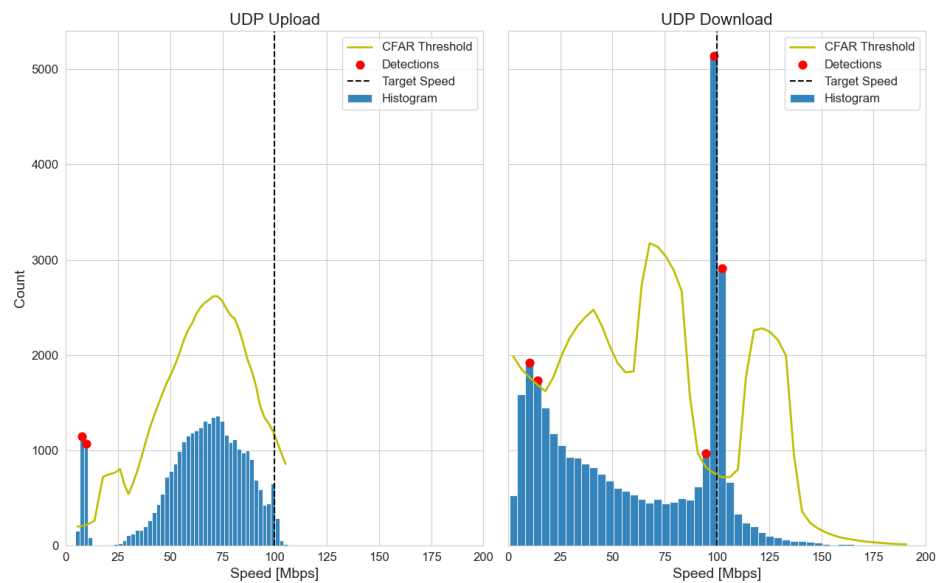


Fig. 4.4: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 100 Mbps en servidor Internacional.

4.2.2. Nacional

En el caso del servidor nacional, los resultados muestran que para velocidades objetivo moderadas el detector CFAR es capaz de identificar de forma consistente los intervalos

en los que la red sostiene la tasa configurada. Por ejemplo, para un target de 1 Mbps (fig. 4.5) en subida, la probabilidad de que una muestra de velocidad pertenezca al rango objetivo (definido como $[0,995, 1,005]$ Mbps) es elevada, mientras que la probabilidad de detección CFAR se mantiene en un valor acotado, acorde a la tasa de falsas alarmas definida. Al combinar ambas métricas, la probabilidad condicional $P(\text{target}|\text{detección})$ alcanza valores cercanos a un cuarto de las detecciones totales, lo que indica que una fracción significativa de las decisiones del detector corresponden efectivamente a velocidades dentro del rango deseado. Este comportamiento sugiere que, en el escenario nacional, la red es capaz de aproximarse de manera razonable al valor nominal del target para este nivel de exigencia.

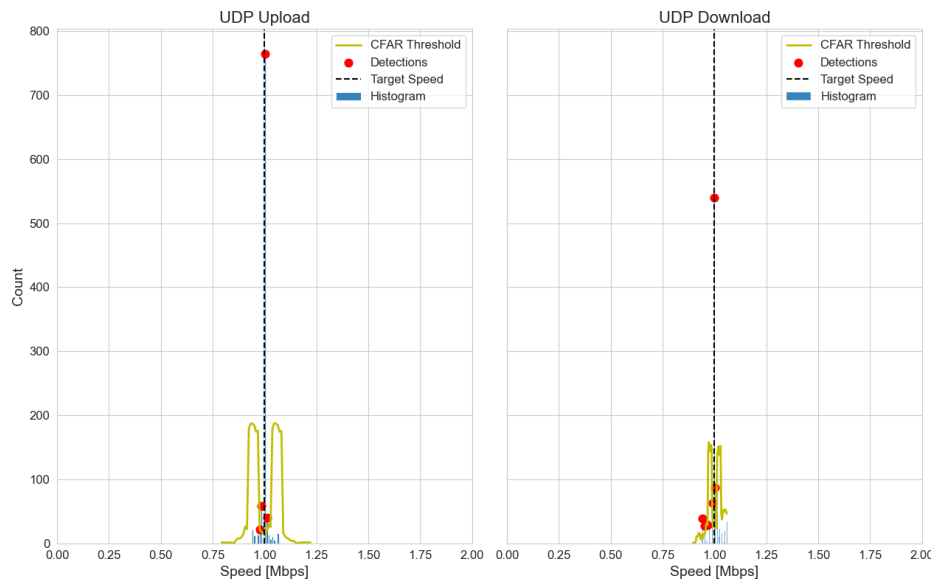


Fig. 4.5: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor Nacional.

A medida que se incrementa la velocidad objetivo, se observa una disminución progresiva de la proporción de muestras que caen dentro del rango de target y, en consecuencia, una reducción de la probabilidad condicional $P(\text{target}|\text{detección})$. Aunque el CFAR mantiene una tasa de falsas alarmas nominalmente constante, la red entra con mayor frecuencia en estados donde la velocidad medida es inferior al valor objetivo. Esto se refleja en un “desplazamiento” del histograma de velocidades hacia valores más bajos y en un aumento relativo de detecciones que no corresponden a velocidades propiamente garantizadas. Esta tendencia es clave para delimitar, en el caso nacional, el rango de

velocidades objetivo que pueden ser razonablemente consideradas como candidatas a VMG bajo los criterios estadísticos propuestos.

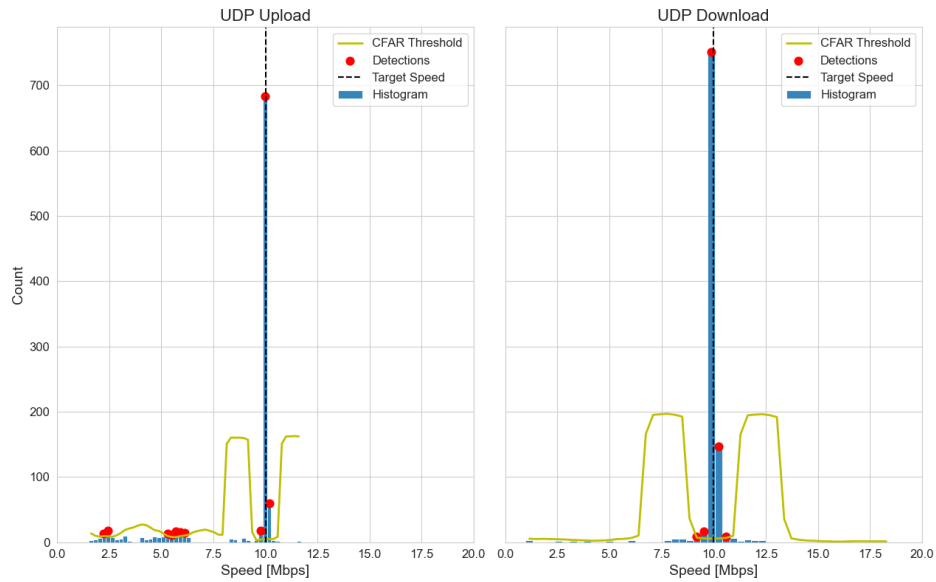


Fig. 4.6: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor Nacional.

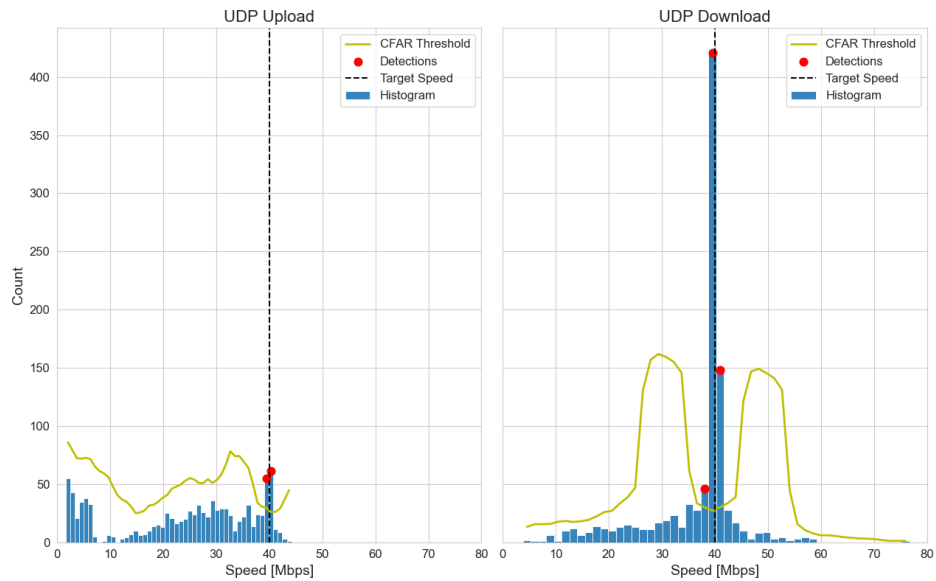


Fig. 4.7: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 40 Mbps en servidor Nacional.

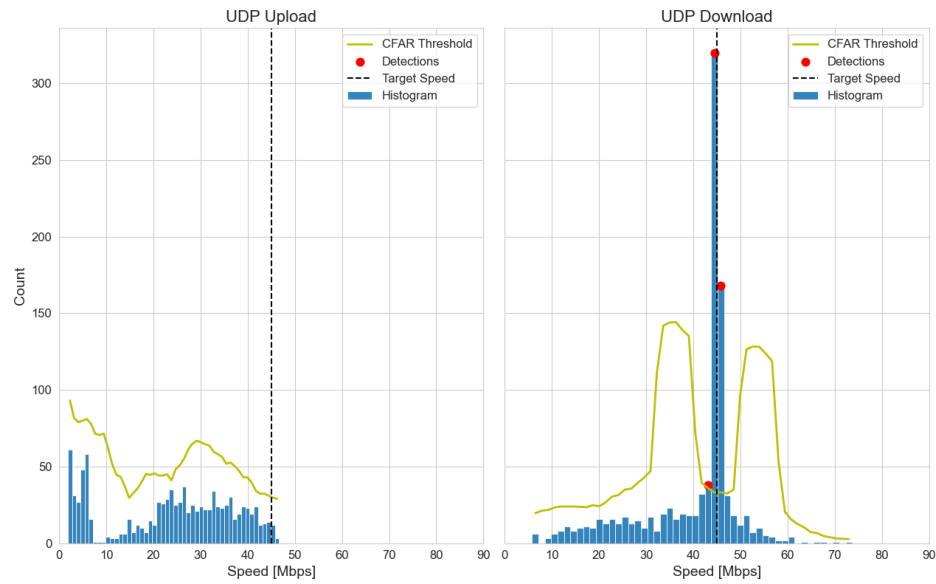


Fig. 4.8: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 45 Mbps en servidor Nacional.

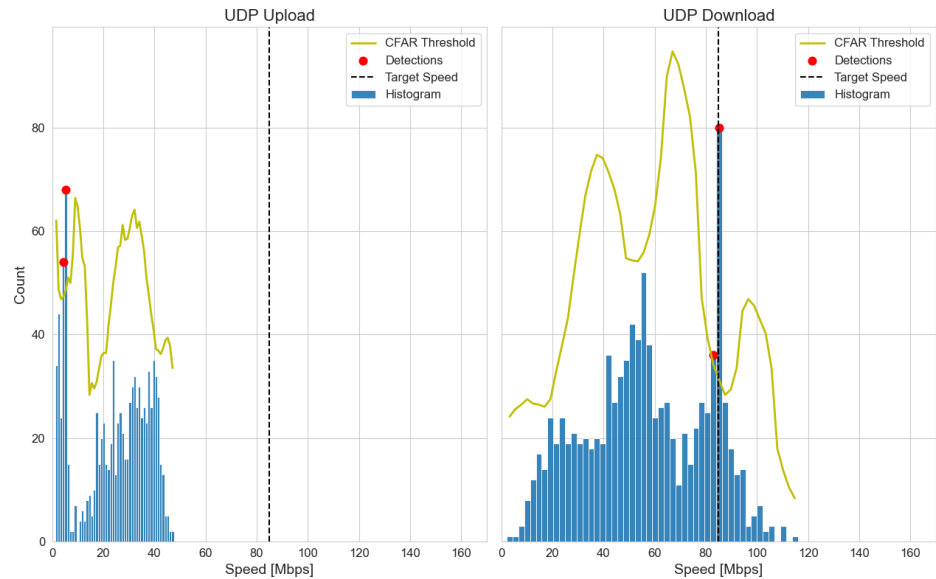


Fig. 4.9: Detección CFAR con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 85 Mbps en servidor Nacional.

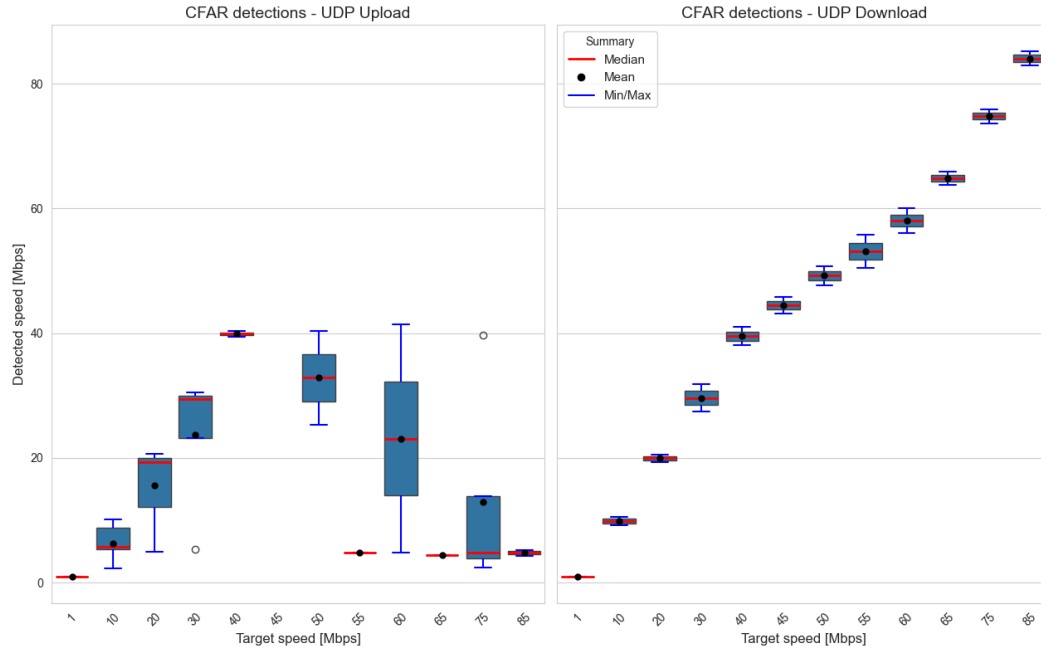


Fig. 4.10: Boxplot de distribución de detecciones vs Velocidad objetivo.

En la figura 4.10 se presenta la distribución de las tasas de detección obtenidas a partir del umbral CFAR para las diferentes velocidades objetivo. Para cada velocidad se consideran todas las detecciones asociadas y se construye un diagrama de cajas en el que los “bigotes” corresponden al valor mínimo y máximo observados, mientras que el rectángulo central representa los percentiles asociados al boxplot (cuartiles). La línea roja dentro de cada caja indica la mediana de la tasa de detección, y el marcador negro corresponde al valor promedio calculado para esa misma velocidad objetivo.

Se observa que, en el tráfico de subida, la tasa de transferencia no supera los 45 Mbps, lo que evidencia una limitación significativa de capacidad en uplink. Por el contrario, el tráfico de descarga exhibe un comportamiento aproximadamente lineal con la velocidad objetivo y con baja dispersión estadística, lo que refleja una mayor estabilidad del canal descendente en redes 4G. Este resultado es consistente con el dimensionamiento habitual de las redes celulares comerciales, en las que los operadores priorizan los recursos de downlink para atender la mayor demanda de tráfico en sentido descendente.

4.3. Probabilidad de detección CFAR

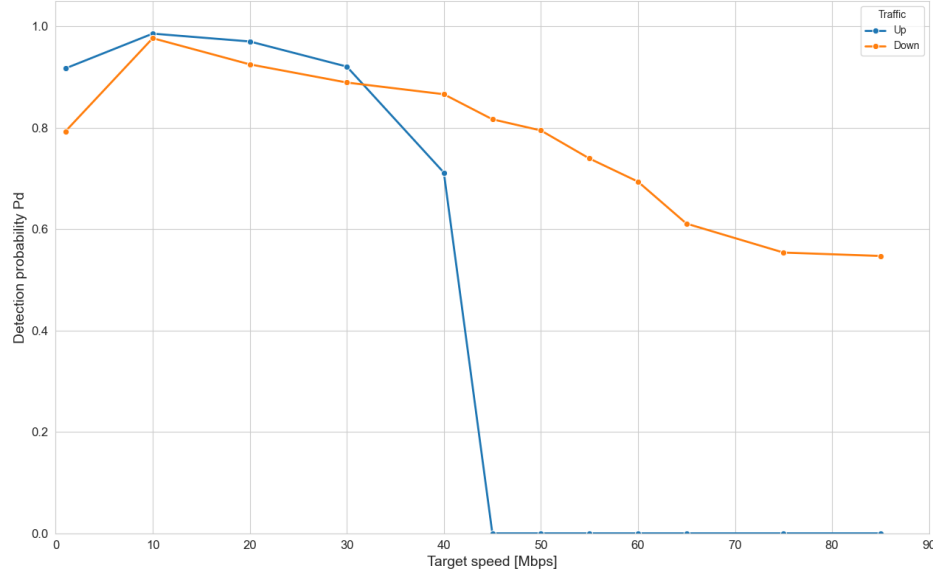


Fig. 4.11: Probabilidad de detección vs Velocidad objetivo en servidor nacional para subida y bajada.

Para cuantificar el desempeño del detector CFAR sobre los histogramas de velocidad, se implementó una métrica de Probabilidad de Detección (P_d) basada en la energía de la señal. A diferencia de los enfoques binarios tradicionales que solo cuentan la presencia o ausencia de un peak, este método pondera la cantidad de muestras que superan el umbral adaptativo en relación con la distribución total de las mediciones válidas.

El procedimiento matemático se define de la siguiente manera:

- Para cada bin k del histograma de velocidades $X[k]$, el algoritmo CA-CFAR calcula un umbral local utilizando una ventana deslizante. Se define un factor de escala α , un número de celdas de referencia N_{ref} y celdas de guarda N_{guard} .
- Dado que el objetivo es evaluar la capacidad del sistema para sostener una velocidad objetivo v_{target} , se define una región de interés Ω que comprende todas las velocidades que cumplen con el criterio de calidad del 95 % (de acuerdo con la VMG):

$$\Omega = \{k | \text{velocidad}(k) \geq 0,95 \cdot v_{target}\} \quad (4.1)$$

- La P_d se calcula como la razón entre la masa de probabilidad (número de ocurrencias) detectada correctamente por el CFAR dentro de la ventana de validez y la masa total de ocurrencias existente en dicha ventana:

$$P_d = \frac{\sum_{k \in \Omega \cap \text{Detecciones}} X[k]}{\sum_{k \in \Omega} X[k]} \quad (4.2)$$

Donde “Detecciones” corresponde al conjunto de bins donde $X[k] > T[k]$. Este enfoque asegura que la métrica refleje qué porcentaje de los paquetes o mediciones de velocidad fueron efectivamente discriminados del piso de ruido.

La Figura 4.11 presenta la curva de Probabilidad de Detección en función de la velocidad objetivo configurada. Cuando la velocidad objetivo es menor a 30 Mbps, el sistema muestra un desempeño robusto tanto para subida como para bajada, con valores de P_d cercanos a 0.9 y 1.0. Esto indica que la distribución de velocidades es compacta y presenta peaks bien definidos que superan fácilmente el umbral CFAR, evidenciando una conexión estable.

Para el enlace de bajada, a medida que aumenta la velocidad objetivo, se observa un decaimiento suave en la probabilidad de detección (descendiendo de $\approx 0,9$ a $\approx 0,55$). Este comportamiento sugiere que, a altas velocidades, aumenta la varianza de la señal, lo que achata el histograma. Aunque el sistema sigue transmitiendo datos, la energía se dispersa en más bins, haciendo que los peaks sean menos prominentes respecto al ruido de fondo estimado por el CFAR.

Para el enlace de subida se observa la caída drástica de la P_d a 0 para velocidades objetivos superiores a 40 Mbps. Esto indica un límite del canal físico para transmitir a velocidades superiores en las condiciones de medición específicas de la toma de muestras. Al configurar objetivos de 45 Mbps o superiores, el sistema es incapaz de alcanzar la ventana de validez Ω . Como resultado, el denominador de la ecuación de P_d tiende a cero o a valores no representativos en la zona de alta velocidad. Esto evidencia un efecto de saturación o cuello de botella en la interfaz de subida, donde la velocidad real nunca llega a la región esperada por el detector.

4.4. Análisis de resultados

A partir de los resultados anteriores, es posible identificar un rango de velocidades objetivo para las cuales el detector CFAR logra un compromiso adecuado entre probabilidad de detección y probabilidad condicional $P(\text{target}|\text{detección})$, tanto en el escenario nacional como en el internacional. Se observa que por debajo de cierto umbral las mediciones presentan una alta concentración de muestras en torno al target y el CFAR detecta estos eventos de forma confiable; mientras que por encima de ese umbral, la red deja de sostener de manera estable la velocidad propuesta, aumentando la dispersión de las mediciones y reduciendo el valor informativo de las detecciones. Esta transición puede utilizarse como criterio operativo para proponer un valor de velocidad mínima garantizada, aquella para la cual la combinación de métricas CFAR y $P(\text{target}|\text{detección})$ indica que la red aún es capaz de ofrecer, con alta probabilidad, un servicio que se aproxima al target declarado.

De la figura 4.7 se observa que en la velocidad de subida aún se puede detectar la velocidad en el target, en cambio, para la figura 4.8 se contempla la pérdida de la señal en el target, indicando que no se puede garantizar la velocidad por sobre los 40 Mbps en subida. En cambio, para la velocidad de bajada, aún se puede observar detecciones en velocidades de 85 Mbps, pero con un alto nivel de ruido asociado a este.

Con la figura 4.11 se puede observar que el punto donde se encuentra la mayor probabilidad de detección es en 10 Mbps. Gracias a este análisis y al umbral CFAR se pueden fijar velocidades mínimas garantizadas de 10Mbps para subida y bajada en 4G para servidores nacionales y potencias de RSRP de aproximadamente -80 dBm.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Sumario

El presente trabajo abordó la problemática inherente a la aplicación de la Ley 21.046 de Velocidad Mínima Garantizada en el contexto de las redes móviles. A diferencia de las redes fijas, donde el canal de comunicación es estable, las redes inalámbricas presentan una variabilidad estocástica significativa debido al fading, la movilidad de los usuarios y la gestión dinámica de recursos por parte de la red. Esta naturaleza aleatoria dificulta la fiscalización mediante promedios simples, ya que estos pueden enmascarar periodos de incumplimiento o, inversamente, penalizar fluctuaciones naturales del canal que no afectan la experiencia del usuario.

Para enfrentar este desafío, se ejecutó una estrategia metodológica mixta que comenzó con campañas de medición en terreno (Drive Test) en la ciudad de Concepción, utilizando la aplicación Drive Test UdeC. Tras un riguroso proceso de filtrado y depuración que redujo el conjunto de datos a aproximadamente 1.474 mediciones válidas, se evaluó el ajuste de distribuciones estadísticas paramétricas clásicas (Normal, Gamma, Rayleigh, Log-normal). La evidencia empírica, respaldada por la prueba de Kolmogorov-Smirnov, demostró que no existe una distribución única capaz de modelar el throughput móvil en escenarios urbanos dinámicos, observándose en su lugar un comportamiento multimodal complejo.

Ante la imposibilidad de ajustar una distribución simple, el aporte central de esta

memoria consistió en el cambio de paradigma hacia un enfoque basado en la teoría de detección. Se diseñó un experimento controlado con un dispositivo fijo en red 4G para aislar la variabilidad del canal, modelando la velocidad como una señal determinista con ruido aditivo gaussiano. Sobre este modelo, se implementaron detectores de Tasa de Falsa Alarma Constante (CFAR). Los resultados validaron que este método permite identificar objetivamente un umbral de velocidad operativa (establecido en 10 Mbps para el escenario de estudio con RSRP $\approx$ -80 dBm de acuerdo al análisis obtenido), proporcionando así una herramienta técnica robusta para definir la VMG móvil más allá de la arbitrariedad de un promedio.

5.2. Conclusión

A partir del análisis de los resultados experimentales y en concordancia con los objetivos planteados se concluye que la revisión bibliográfica y el análisis del marco regulatorio confirman que la traspolación directa de la normativa de redes fijas a móviles es técnicamente inviable sin considerar la naturaleza estocástica del medio. Los resultados obtenidos refuerzan que la evaluación de la VMG en redes móviles requiere métricas adaptativas, como los detectores CFAR, que consideren la varianza del “ruid” de la red para discriminar entre un incumplimiento real del servicio y una degradación momentánea por condiciones del canal.

En cumplimiento del objetivo específico de desarrollar y ajustar modelos estadísticos, se concluye que el throughput móvil en escenarios urbanos no sigue una distribución paramétrica única. Las pruebas de bondad de ajuste KS aplicadas a los datos de las campañas móviles resultaron en el rechazo sistemático de las hipótesis de normalidad, log-normalidad y otras distribuciones simples en la gran mayoría de los casos desagregados (por tecnología, horario, banda y dispositivo). La presencia de histogramas multimodales indica que el rendimiento es el resultado de la superposición de múltiples procesos, lo que obliga a descartar la idea de una única distribución general.

El experimento con el dispositivo fijo permitió aislar la variable de movilidad, demostrando que, bajo condiciones estacionarias de ubicación y antena, la velocidad de conexión alrededor de un target UDP se comporta de manera coherente con un modelo de señal determinista sumada a un ruido gaussiano $S(t) = S_{obj} + n(t)$. La simetría

observada en los histogramas para targets de 1 y 10 Mbps valida la hipótesis de que, al eliminar el desplazamiento del usuario, las fluctuaciones de velocidad se normalizan, legitimando el uso de detectores CFAR para determinar umbrales de cumplimiento.

La evaluación de la probabilidad de detección (P_d) y la probabilidad condicional $P(\text{target}|\text{detección})$ permitió identificar los límites físicos de la red 4G evaluada. Se concluye que la red es capaz de sostener una Velocidad Mínima Garantizada de 10 Mbps en subida y bajada con altos índices de confianza. Sin embargo, se detectó un punto de quiebre claro en el enlace de subida a partir de los 40-45 Mbps, donde la P_d cae drásticamente a cero, indicando saturación o limitaciones de potencia del terminal. Por el contrario, el enlace de bajada mostró un comportamiento más lineal y estable incluso a velocidades superiores, aunque con mayor dispersión. Estos hallazgos permiten proponer el valor de 10 Mbps como una VMG técnica y operativamente viable para el escenario nacional estudiado bajo las condiciones puestas a prueba.

Se considera cumplido el objetivo general de la memoria, al haberse propuesto y validado experimentalmente un método estadístico para la determinación de la VMG en redes 4G. La metodología, basada en la caracterización del piso de ruido de la velocidad mediante mediciones fijas y la aplicación de reglas de decisión CFAR, ofrece un criterio objetivo y replicable para fiscalizar la calidad de servicio, superando las limitaciones de los métodos basados únicamente en promedios temporales. Si bien el método tiene dependencias del contexto (celda específica y nivel de señal RSRP), sienta las bases para una fiscalización técnica rigurosa.

5.3. Trabajo a futuro

Para dar continuidad a esta investigación y superar las limitaciones identificadas, es fundamental ampliar las campañas de medición hacia nuevos escenarios geográficos y tecnológicos, abarcando zonas rurales, diferentes morfologías urbanas y redes 5G Stand Alone con bandas milimétricas, donde la gestión de haces introduce variables estadísticas poco estudiadas. Asimismo, se recomienda robustecer el modelo estadístico incorporando métricas multidimensionales de calidad de servicio, como latencia, jitter y pérdida de paquetes, y explorar el uso de Modelos de Mezcla Gaussiana o técnicas de aprendizaje automático para capturar y segmentar mejor la multimodalidad inherente

al tráfico móvil, permitiendo una descripción más precisa de los estados de la red.

En el ámbito regulatorio y operativo, se propone evaluar la integración técnica del algoritmo de detección CFAR en las plataformas de monitoreo del OTI, validando su escalabilidad y desempeño en flujos de datos continuos. Complementariamente, resulta clave refinar la definición de Velocidad Mínima Garantizada vinculando los umbrales de detección con la Calidad de Experiencia percibida por el usuario y combinando criterios de disponibilidad con percentiles estadísticos. Esto aseguraría una métrica de fiscalización más representativa, rigurosa y alineada con la realidad del servicio que experimentan los usuarios finales.

Bibliografía

- [1] Subsecretaría de Telecomunicaciones de Chile (SUBTEL). (2025) Telefonía - Estudios y Estadísticas. [Online]. Available: <https://www.subtel.gob.cl/estudios-y-estadisticas/telefonía/>
- [2] Comunidad Entel Empresas. (2025) Redes móviles: qué son, cómo funcionan y qué tipos existen. Entel. [Online]. Available: <https://ce.entel.cl/articulos/redes-moviles>
- [3] E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, “A review on mobile technologies: 3g, 4g and 5g,” in *2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM)*, 2017, pp. 369–373.
- [4] S. Malisuwan, D. Milindavanij, and W. Kaewphanuekrungsi, “Quality of service (qos) and quality of experience (qoe) of the 4g lte perspective,” *International Journal of Future Computer and Communication*, vol. 5, no. 3, pp. 158–162, 2016. [Online]. Available: <https://www.ijfcc.org/show-65-787-1.html>
- [5] J. G. Andrews, S. Buzzi, W. Choi, S. V. Hanly, A. Lozano, A. C. K. Soong, and J. C. Zhang, “What will 5g be?” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 32, no. 6, pp. 1065–1082, 2014.
- [6] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, “Ley N° 21.046: Establece la obligación de una velocidad mínima garantizada de acceso a Internet,” 2017. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1111298>
- [7] F. Gast, M. Dörpinghaus, F. Roth, and G. P. Fettweis, “A new spatio-temporal model for data rate distributions in mobile networks,” in *2024 27th International Workshop on Smart Antennas (WSA)*, 2024, pp. 103–108.

-
- [8] X. Yang, H. Lin, Z. Li, F. Qian, X. Li, Z. He, X. Wu, X. Wang, Y. Liu, Z. Liao, D. Hu, and T. Xu, “Mobile access bandwidth in practice: measurement, analysis, and implications,” in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference*, ser. SIGCOMM '22. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2022, p. 114–128. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3544216.3544237>
- [9] M. Kassim, R. Samsuri, M. Yusof, R. ab rahman, N. Mat Isa, R. Mohamad, and M. Ismail, “Video traffic modeling using kolmogorov smirnov analysis in broadband network,” vol. 8, pp. 49–53, 01 2016.
- [10] D. O. Ojuh and J. Isabona, “Empirical and statistical determination of optimal distribution model for radio frequency mobile networks using realistic weekly block call rates indicator,” *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*, vol. 7, no. 3, pp. 12–23, 8 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5815/ijmsc.2021.03.02>
- [11] E. Damosso and L. M. Correia, Eds., *Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems: Final Report*, ser. EUR. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1999, no. 18957, cOST Action 231. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f2f42003-4028-4496-af95-beaa38fd475f>
- [12] A. A. El-Saleh, A. Alhammadi, I. Shaya, N. Alsharif, N. M. Alzahrani, O. I. Khalaf, and T. H. H. Aldhyani, “Measuring and assessing performance of mobile broadband networks and future 5g trends,” *Sustainability*, vol. 14, no. 2, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/2/829>
- [13] Subsecretaría de Telecomunicaciones (SUBTEL), “Resolución exenta n° 403: Deja sin efecto resolución n° 1.251 exenta, de 2020, y fija norma técnica de la ley n° 21.046, que establece la obligación de una velocidad mínima garantizada de acceso a internet,” Diario Oficial de la República de Chile, Núm. 42.891, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Santiago, Chile, Resolución Exenta 403, Feb. 2021, publicada en el Diario Oficial el 26-feb-2021. [Online]. Available: <https://www.diariooficial.interior.gob.cl/publicaciones/2021/02/26/42891/01/1902259.pdf>
- [14] Congreso de la República del Perú, “Ley n.º 31207: Ley que garantiza la

- velocidad mínima de conexión a internet y monitoreo de la prestación del servicio de internet a favor de los usuarios,” El Peruano — Normas Legales, Lima, Perú, Jun. 2021, publicada en El Peruano el 02-jun-2021. [Online]. Available: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1959035-1>
- [15] Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC), “Report on member states’ best practices to support the defining of adequate broadband internet access service,” BEREC, Riga, Latvia, Tech. Rep. BoR (24) 40, Mar. 2024, document date: 7 March 2024. [Online]. Available: https://www.berec.europa.eu/system/files/2024-03/BoR%20%2824%29%2040_Best%20Practice%20Adeq%20Broadband%20final.pdf
- [16] Ofcom, “Codes of Practice,” 2025. [Online]. Available: <https://www.ofcom.org.uk/phones-and-broadband/coverage-and-speeds/codes-of-practice>
- [17] J. E. Londoño-García, R. Velasco-Arcos, V. F. Miramá-Pérez, and C. M. Hernández, “Cobertura de un sistema de comunicaciones móvil e inalámbrico con control ideal de potencia y movilidad en los usuarios,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, no. 4, pp. 557–567, 2018. [Online]. Available: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052018000400557&nrm=iso
- [18] 3GPP, “Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); physical channels and modulation,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 36.211, 2024, v18.0.0 (Release 18).
- [19] —, “Nr; physical channels and modulation,” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.211, 2024, v18.0.0 (Release 18).
- [20] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*, 2nd ed. Academic Press, 2013.
- [21] R. Chisab, “42101-7474-ijet-ijens © february 2014 ijens,” *ijens*, vol. 14, pp. 1–58, 01 2014.
- [22] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*, 2nd ed. John Wiley & Sons, 2011.
- [23] ITU-T, “Recommendation g.1000: Communications quality of service: A framework and definitions,” International Telecommunication Union, Geneva,

- Recommendation, 2001.
- [24] —, “Recommendation e.600: Terms and definitions of traffic engineering,” International Telecommunication Union, Geneva, Recommendation, 1993. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.600>
 - [25] J. Ishac and P. Chimento, “Defining Network Capacity,” RFC 5136, Feb. 2008. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc5136>
 - [26] A. Abdi and M. Kaveh, “A comparative study of two shadow fading models in ultrawideband and other wireless systems,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10, pp. 1428 – 1434, 06 2011.
 - [27] B. A. M. J. P. K. P. Jon Dugan, Seth Elliott, “*iperf3* — A TCP, UDP and SCTP network-bandwidth-measurement tool,” Software, Version 3.19, May 2025, accessed: 10-Jul-2025. [Online]. Available: <https://iperf.fr/>
 - [28] F. J. M. Jr., “The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit,” *Journal of the American Statistical Association*, vol. 46, no. 253, pp. 68–78, 1951. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1951.10500769>
 - [29] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
 - [30] MathWorks, “Constant false alarm rate (cfar) detection,” <https://la.mathworks.com/help/phased/ug/constant-false-alarm-rate-cfar-detection.html>, 2025.
 - [31] Móviles.info. (2022) Frecuencias de bandas 2g, 3g, 4g/lte y 5g en chile. [Online]. Available: <https://moviles.info/frecuencias/chile/>
 - [32] P. Virtanen, R. Gommers, T. E. Oliphant, M. Haberland, T. Reddy, D. Cournapeau, E. Burovski, P. Peterson, W. Weckesser, J. Bright, S. J. van der Walt, M. Brett, J. Wilson, K. J. Millman, N. Mayorov, A. R. J. Nelson, E. Jones, R. Kern, E. Larson, C. J. Carey, Í. Polat, Y. Feng, E. W. Moore, J. VanderPlas, D. Laxalde, J. Perktold, R. Cimrman, I. Henriksen, E. A. Quintero, C. R. Harris, A. M. Archibald, A. H. Ribeiro, F. Pedregosa, P. van Mulbregt, and SciPy 1.0 Contributors, “SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python,” *Nature Methods*, vol. 17, pp. 261–272, 2020.

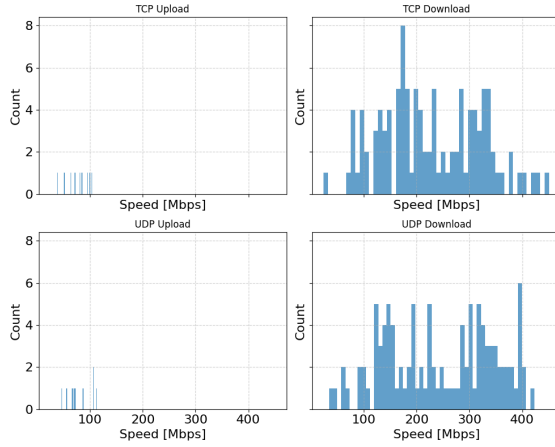
- [33] D. Arroyo, M. Flores, S. Godoy, R. Hernández, D. Luarte, E. Pérez, G. Saavedra, S. Sobarzo, and S. Torres, “Informe 4: Estudio de metodología de medición y cálculo de indicadores en redes inalámbricas en el marco de la ley 21.046,” Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile, Tech. Rep. Informe 4 / OT 2024-347-11, jun. 2025.

Appendices

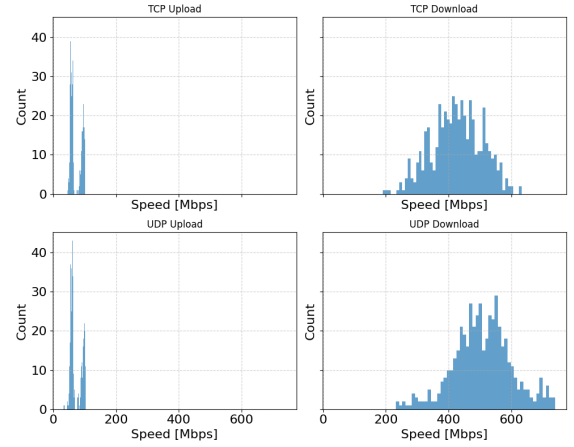
Apéndice A

ANEXO: Histogramas

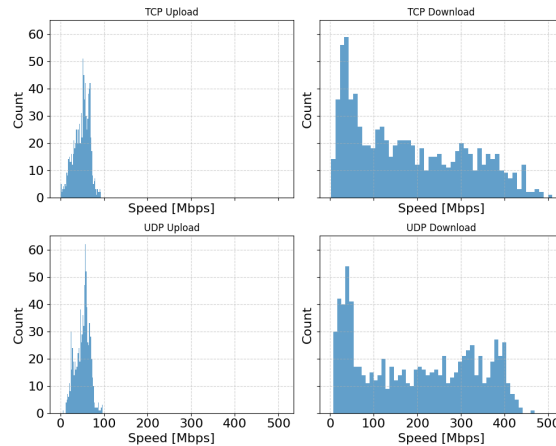
A.1. Histogramas desagregados por rango horario



(a) Servidor UdeC Nacional.

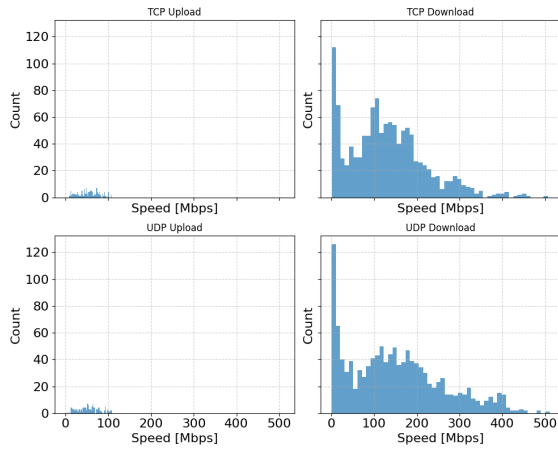


(b) Servidor UdeC Internacional.

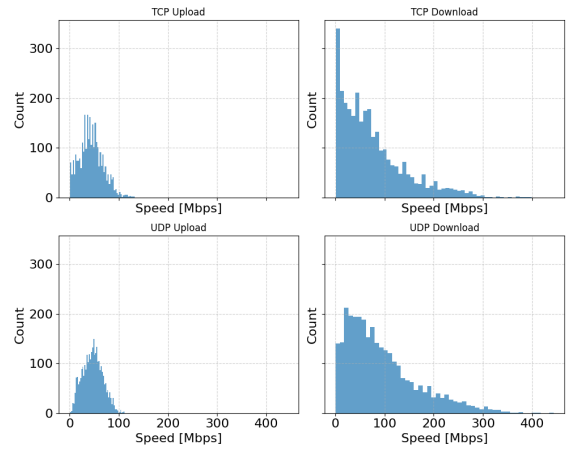


(c) Servidor ISP 1 Nacional.

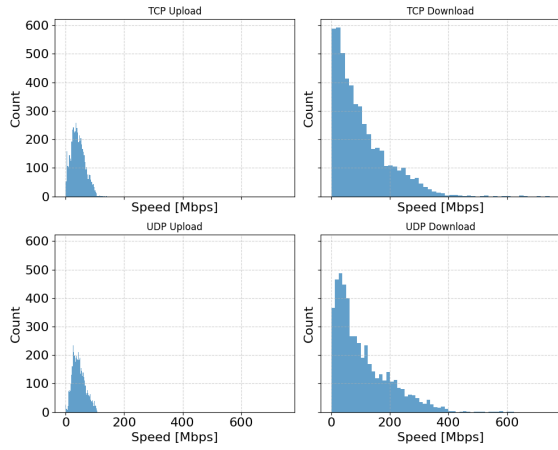
Fig. A.1: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 00:00 a 09:00 con (a) 11 mediciones, (b) 50 mediciones y (c) 85 mediciones



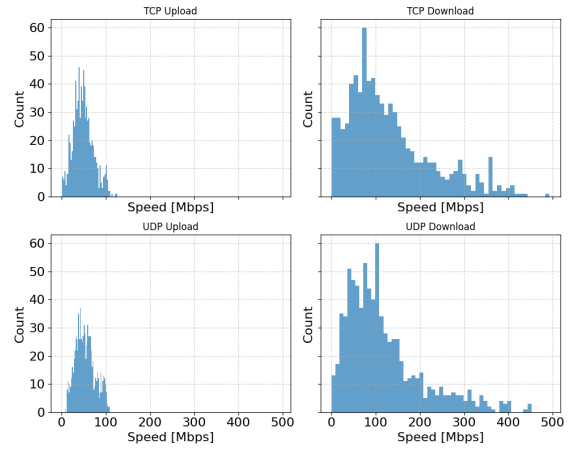
(a) Servidor UdeC Nacional.



(b) Servidor UdeC Internacional.

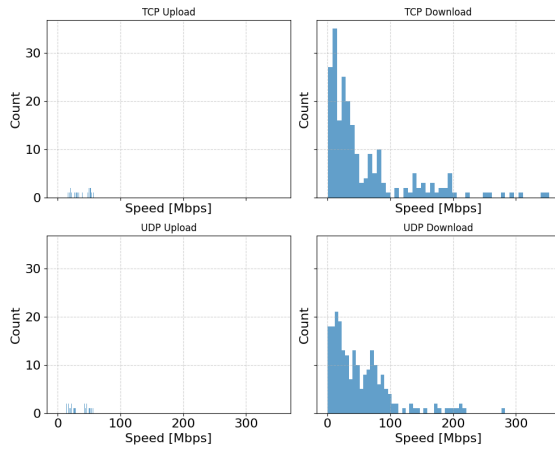


(c) Servidor ISP 1 Nacional.

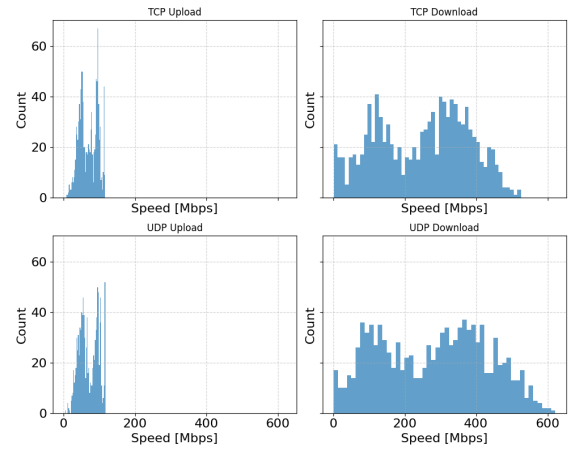


(d) Servidor ISP 2 Internacional.

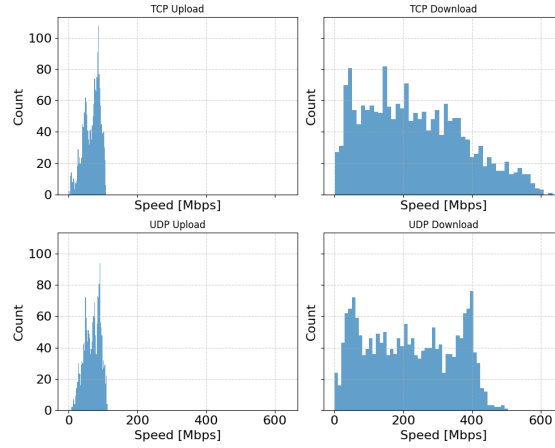
Fig. A.2: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 09:00 a 18:00 con (a) 122 mediciones, (b) 305 mediciones, (c) 81 mediciones y (d) 503 mediciones.



(a) Servidor UdeC Nacional.



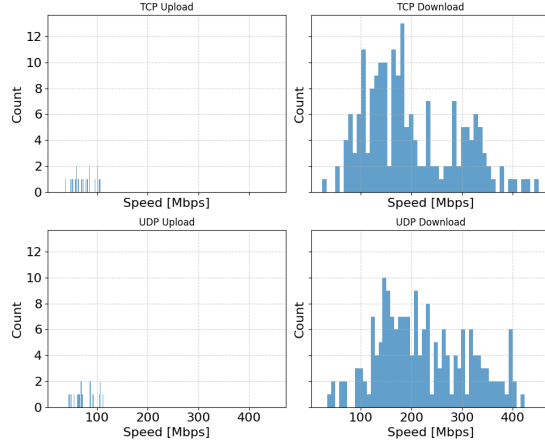
(b) Servidor UdeC Internacional.



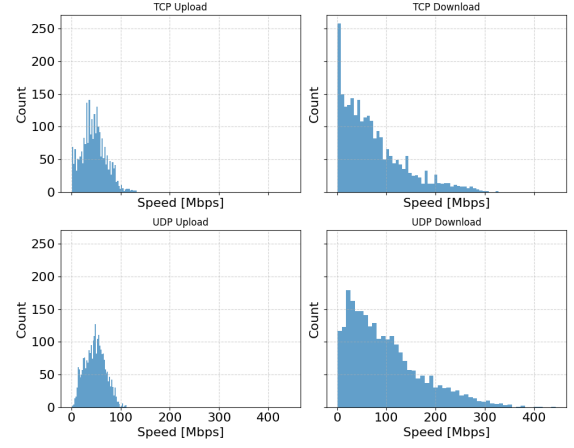
(c) Servidor ISP 1 Nacional.

Fig. A.3: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por rango horario de 18:00 a 00:00 con (a) 22 mediciones, (b) 106 mediciones y (c) 189 mediciones.

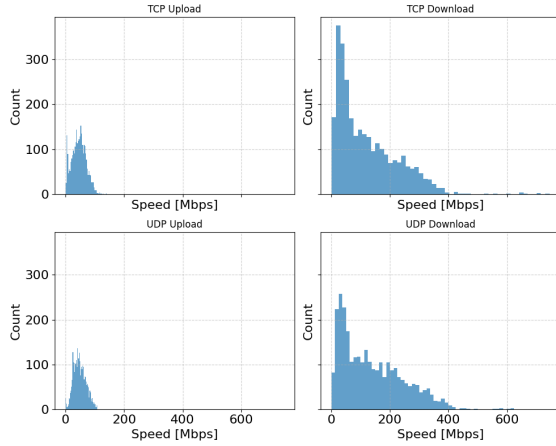
A.2. Histogramas desagregados por teléfono



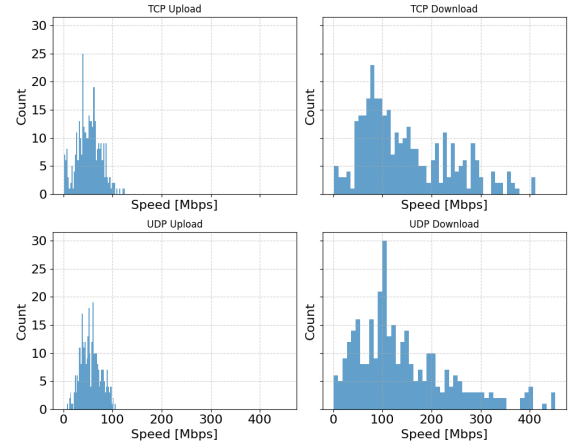
(a) Servidor UdeC Nacional.



(b) Servidor UdeC Internacional.

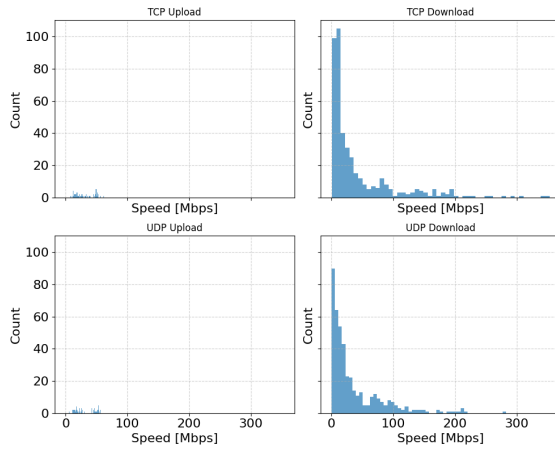


(c) Servidor ISP 1 Nacional.

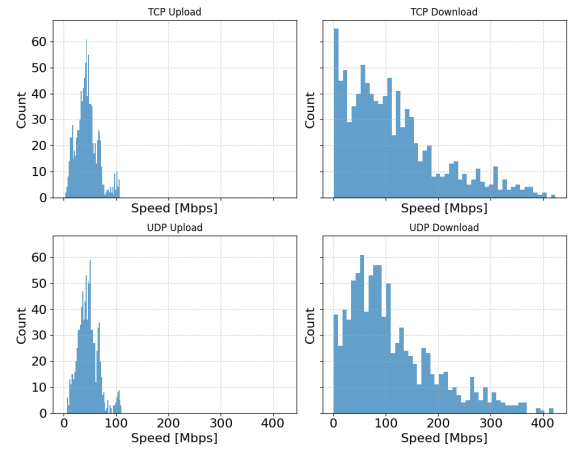


(d) Servidor ISP 2 Internacional.

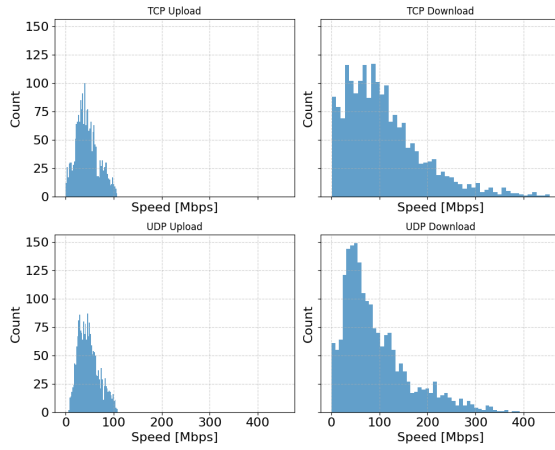
Fig. A.4: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono 2312DRAABG con (a) 19 mediciones, (b) 254 mediciones, (c) 291 mediciones y (d) 33 mediciones.



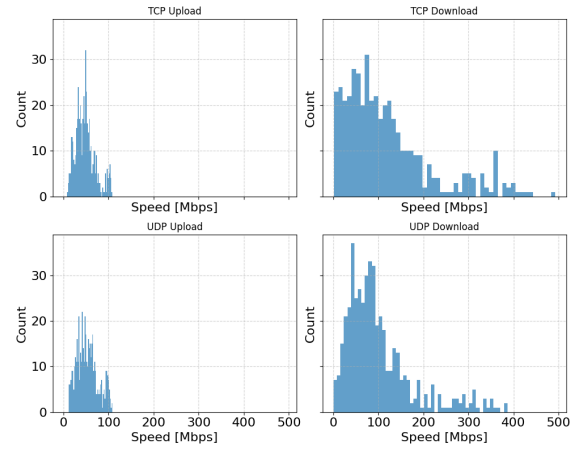
(a) Servidor UdeC Nacional.



(b) Servidor UdeC Internacional.

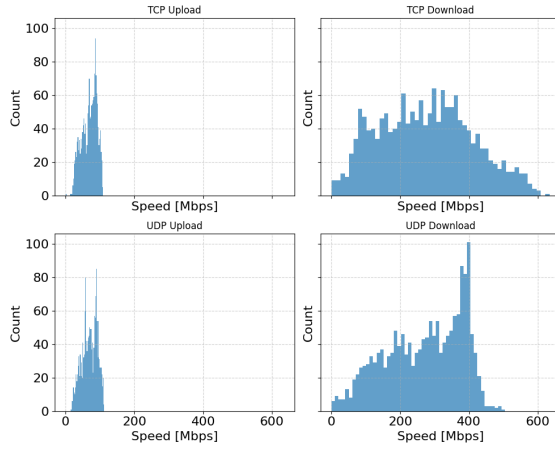


(c) Servidor ISP 1 Nacional.

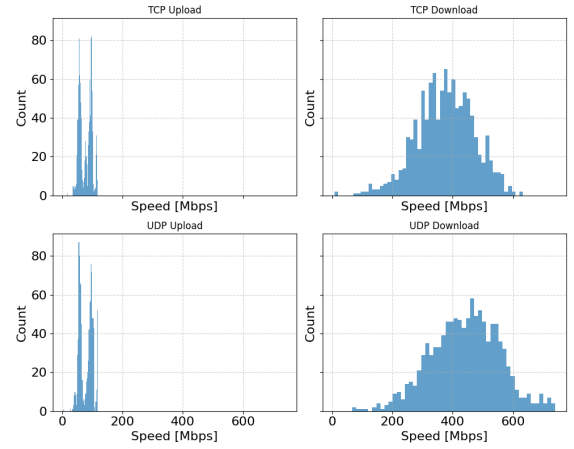


(d) Servidor ISP 2 Internacional.

Fig. A.5: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono 2312DRA50G con (a) 44 mediciones, (b) 98 mediciones, (c) 199 mediciones y (d) 47 mediciones.

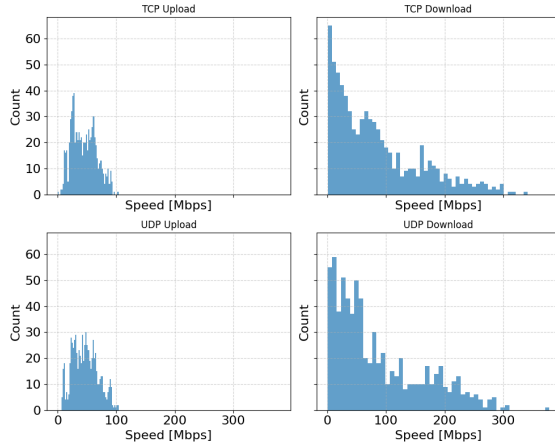


(a) Servidor ISP 1 Nacional.

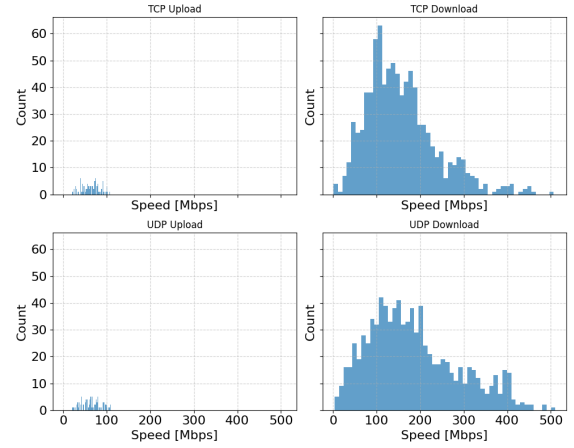


(b) Servidor UdeC Internacional.

Fig. A.6: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono SM-S928B con (a) 168 mediciones y (b) 109 mediciones.



(a) Servidor ISP 1 Nacional.



(b) Servidor UdeC Nacional.

Fig. A.7: Histogramas de las mediciones realizadas a los servidores desagregados por teléfono motorola edge 30 pro con (a) 73 mediciones y (b) 87 mediciones.

A.3. Histogramas desagregados por banda de frecuencia

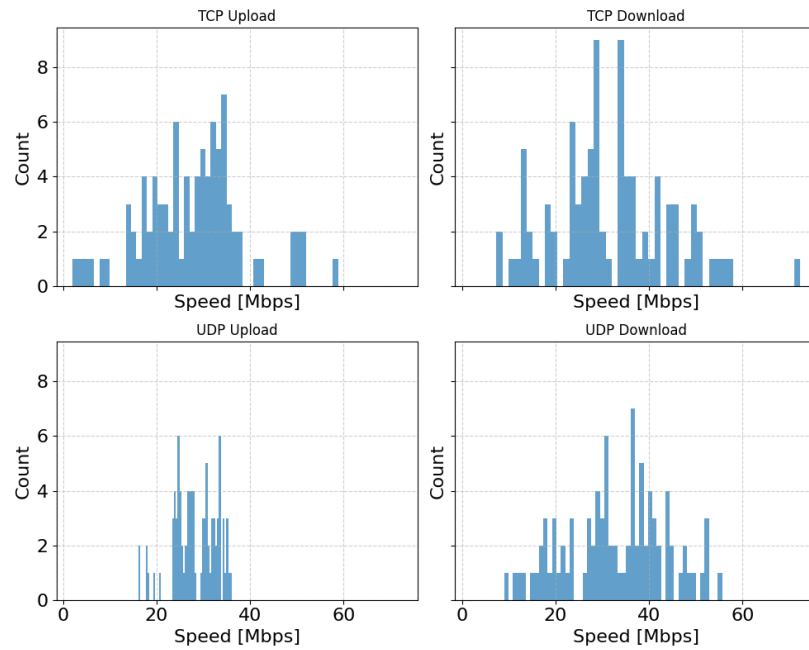


Fig. A.8: Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 700 MHz.

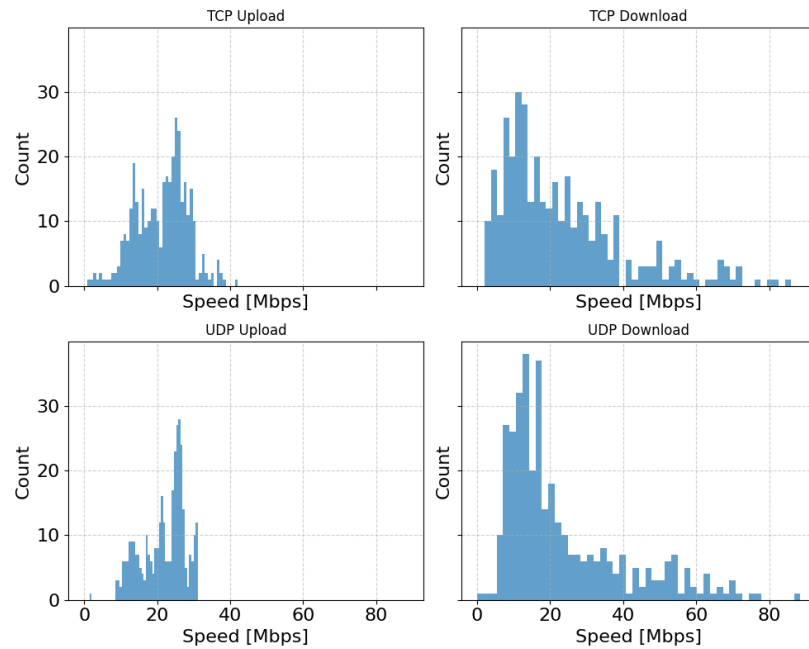


Fig. A.9: Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 1900 MHz.

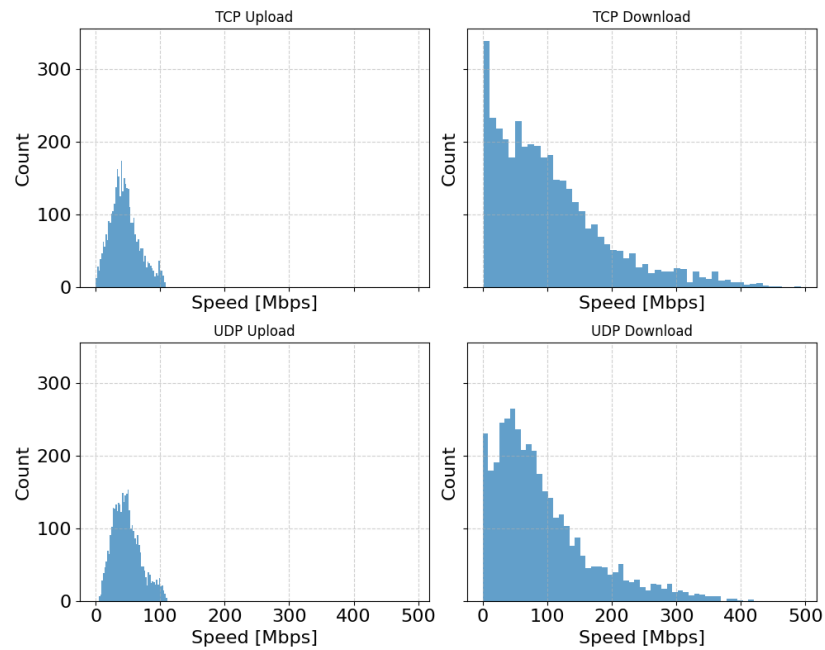


Fig. A.10: Histograma de las mediciones realizadas en la banda AWS de 1700/2100 MHz.

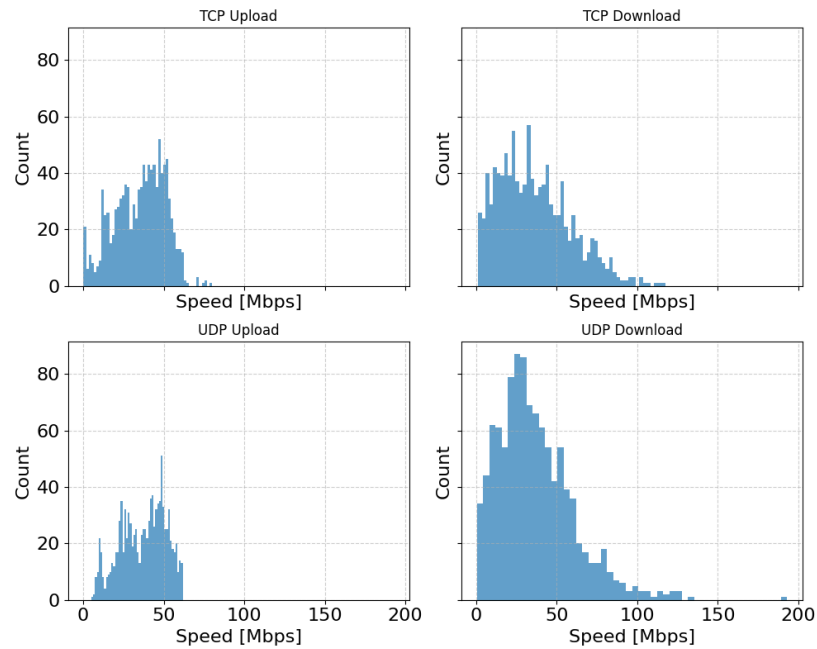


Fig. A.11: Histograma de las mediciones realizadas en la banda de los 2600 MHz.

A.4. Histogramas de velocidad objetivo para servidor UdeC nacional

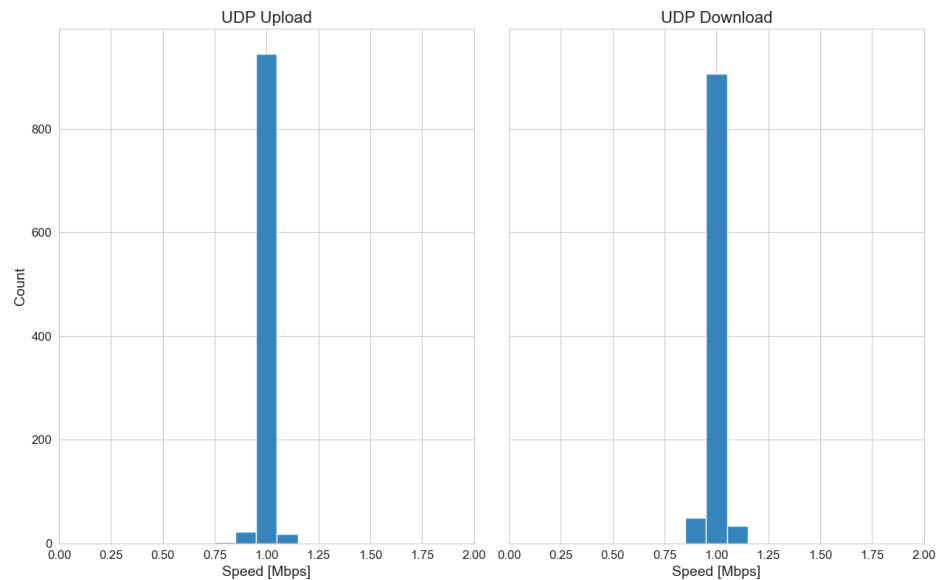


Fig. A.12: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 1 Mbps en servidor UdeC Nacional.

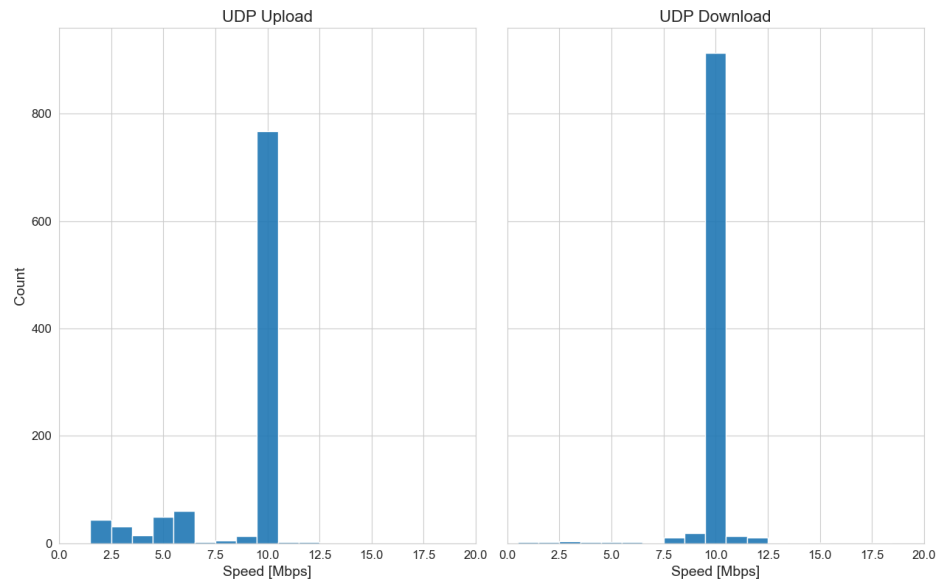


Fig. A.13: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 10 Mbps en servidor UdeC Nacional.

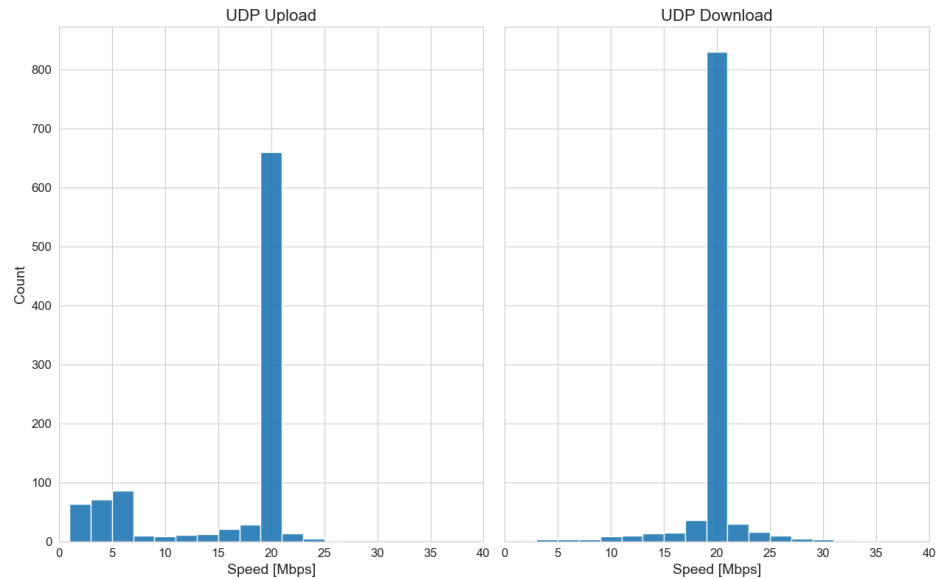


Fig. A.14: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 20 Mbps en servidor UdeC Nacional.

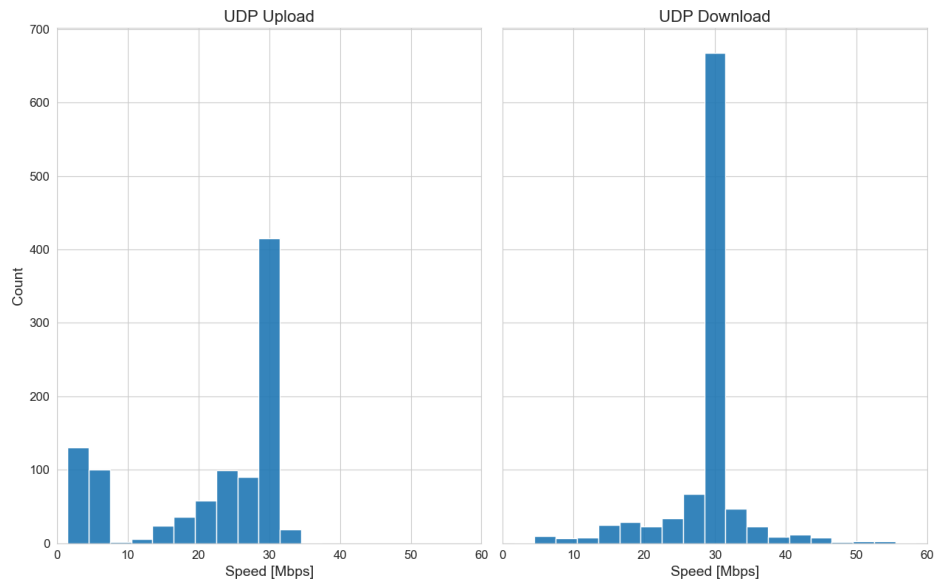


Fig. A.15: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 30 Mbps en servidor UdeC Nacional.

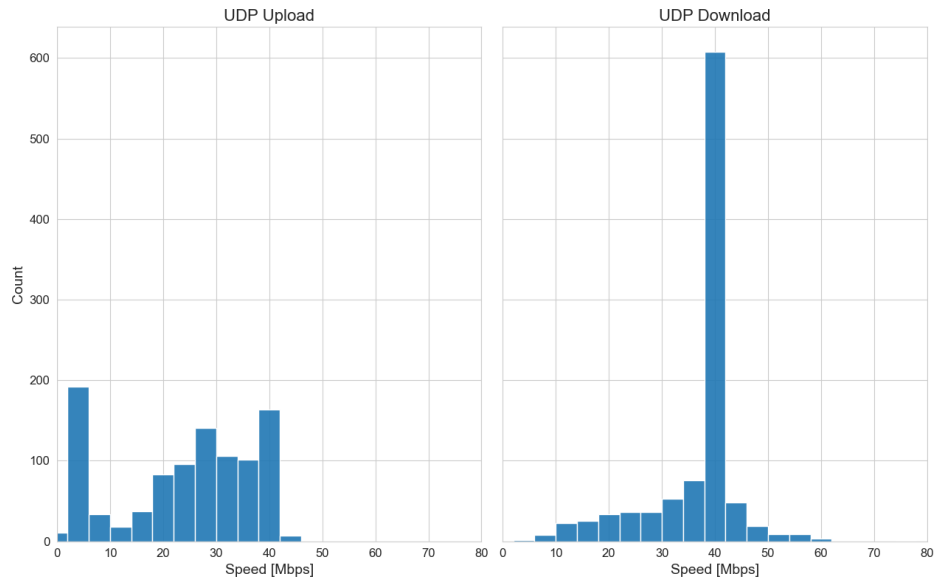


Fig. A.16: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 40 Mbps en servidor UdeC Nacional.

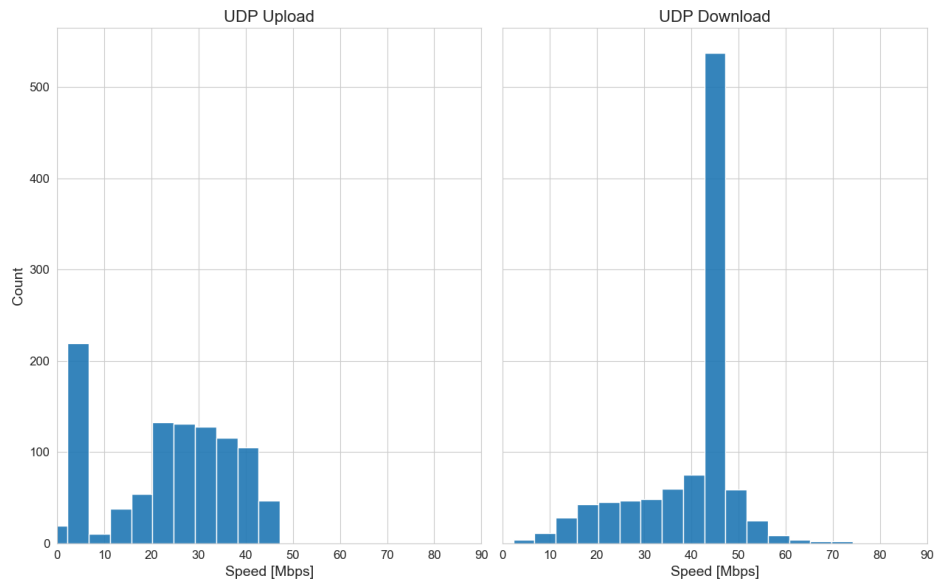


Fig. A.17: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 45 Mbps en servidor UdeC Nacional.

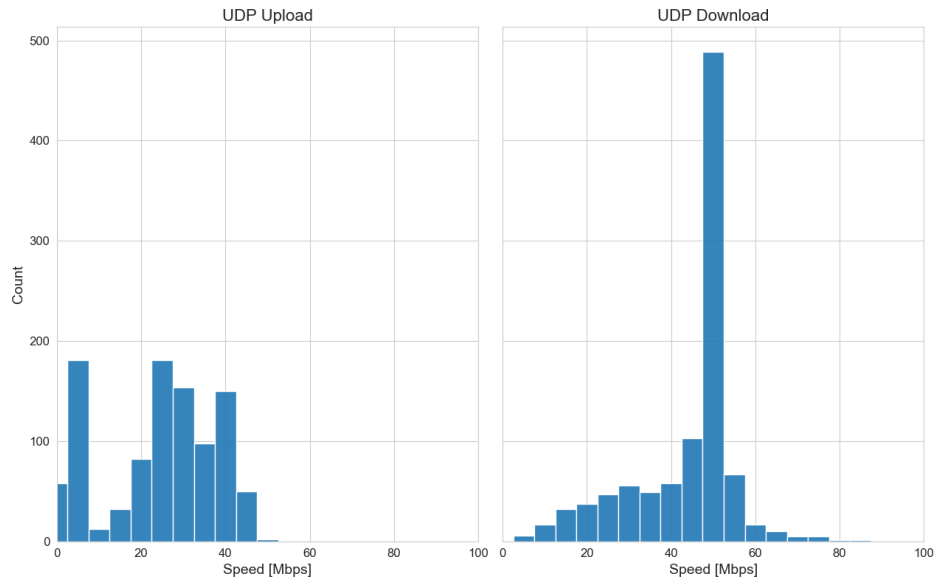


Fig. A.18: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 50 Mbps en servidor UdeC Nacional.

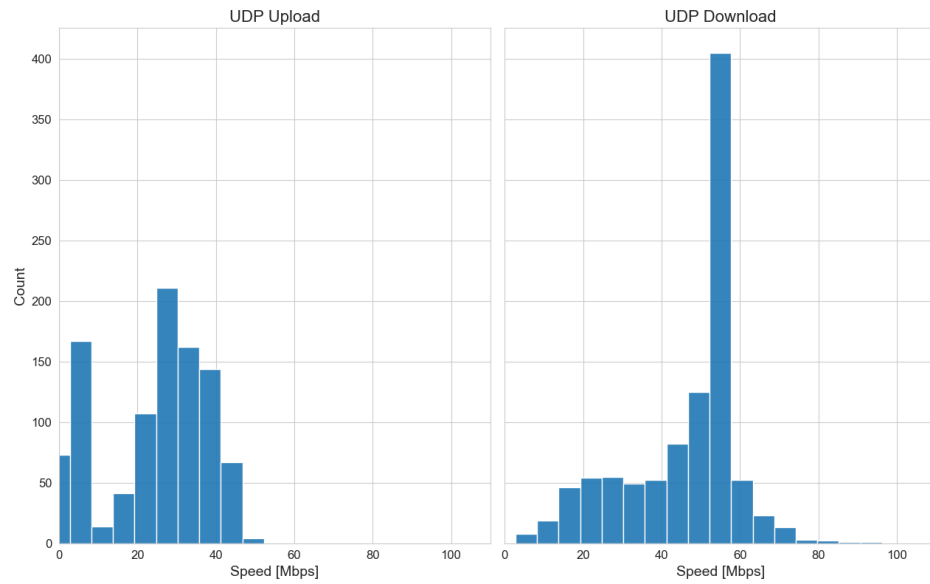


Fig. A.19: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 55 Mbps en servidor UdeC Nacional.

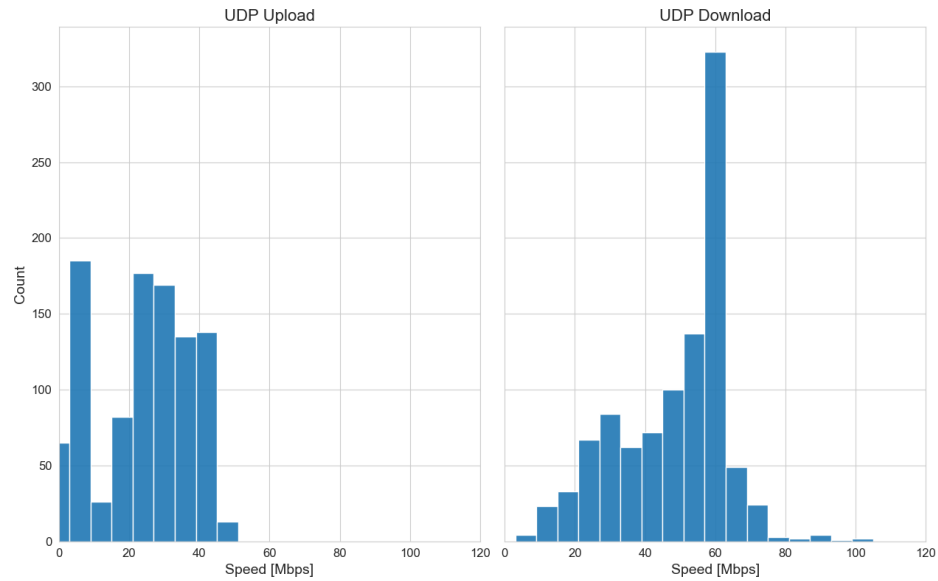


Fig. A.20: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 60 Mbps en servidor UdeC Nacional.

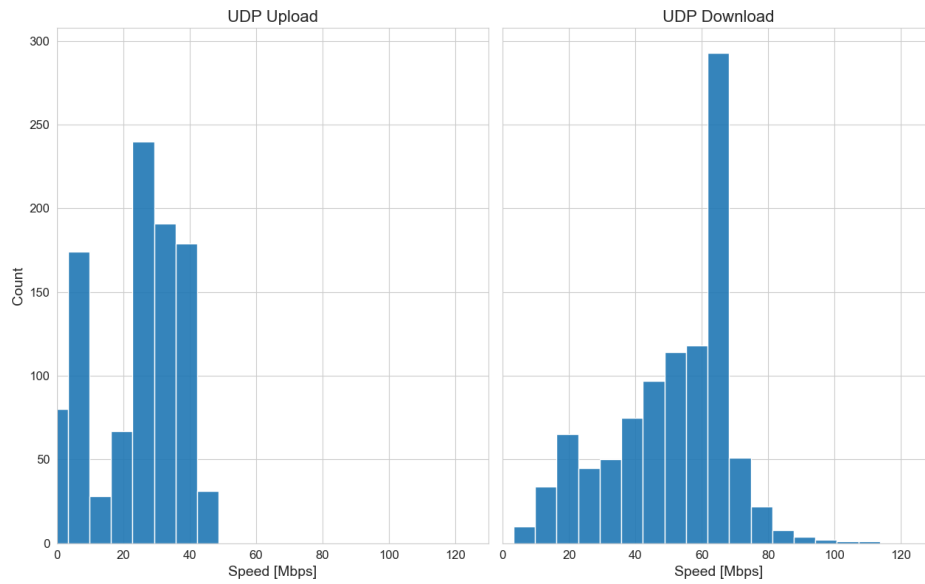


Fig. A.21: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 65 Mbps en servidor UdeC Nacional.

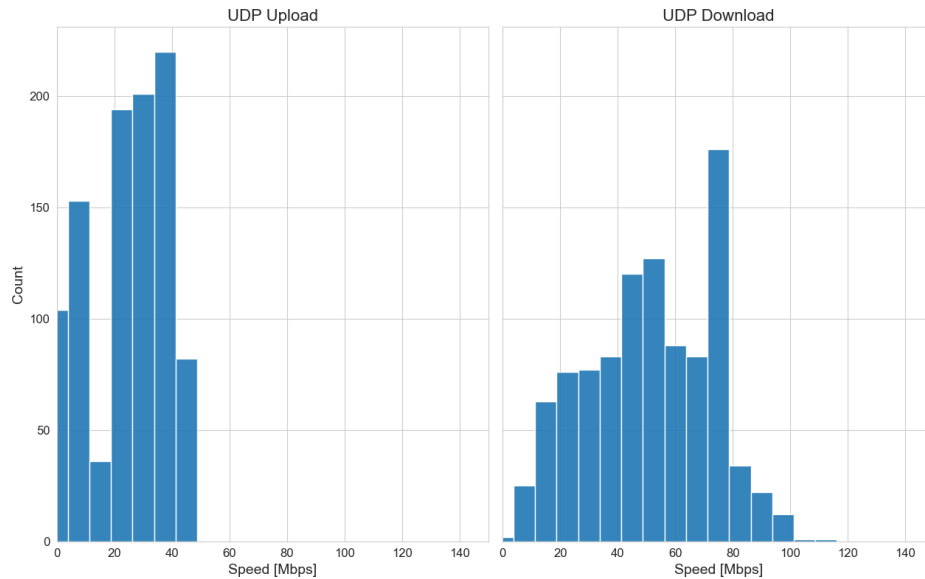


Fig. A.22: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 75 Mbps en servidor UdeC Nacional.

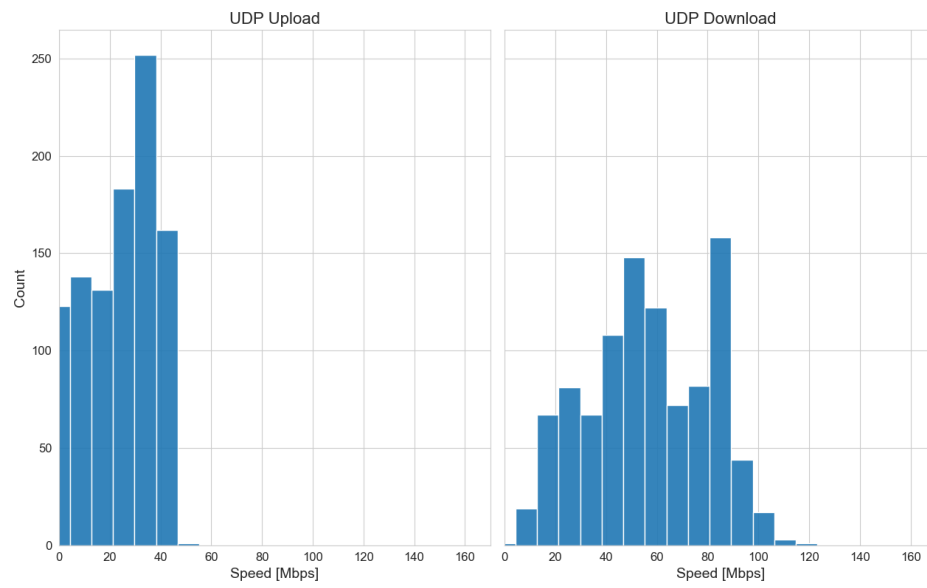


Fig. A.23: Histograma de velocidad con el dispositivo fijo para la velocidad objetivo de 85 Mbps en servidor UdeC Nacional.

Apéndice B

ANEXO: Pruebas de Kolmogorov-Smirnov (KS)

B.1. Resultados prueba KS

B.1.1. Test KS globales

Tabla B.1: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.068	0.417	NR	0.094	0.102	NR	0.083	0.192	NR	0.129	0.00743	R
TCP Download	0.095	1.57e-12	R	0.102	2.67e-14	R	0.177	1.89e-42	R	0.161	2e-35	R
UDP Upload	0.062	0.533	NR	0.098	0.0791	NR	0.089	0.14	NR	0.136	0.004	R
UDP Download	0.103	7.29e-15	R	0.089	3.51e-11	R	0.204	3.66e-57	R	0.146	4.14e-29	R

Tabla B.2: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.056	1.09e-12	R	0.080	6.3e-26	R	0.047	5.52e-09	R	0.128	1.46e-65	R
TCP Download	0.167	3.25e-111	R	0.058	1.52e-13	R	0.324	0	R	0.071	1.89e-20	R
UDP Upload	0.055	2.25e-12	R	0.054	2.49e-12	R	0.080	4.22e-26	R	0.089	6.98e-32	R
UDP Download	0.171	8.36e-119	R	0.050	1.32e-10	R	0.311	0	R	0.058	5.32e-14	R

Tabla B.3: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 1 nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.036	5.56e-09	R	0.068	2.3e-31	R	0.030	2.07e-06	R	0.107	1.98e-78	R
TCP Download	0.127	1.26e-109	R	0.029	4.46e-06	R	0.249	0	R	0.064	4.96e-28	R
UDP Upload	0.043	5.58e-13	R	0.034	3.48e-08	R	0.052	1.14e-18	R	0.069	1.64e-32	R
UDP Download	0.122	3.71e-101	R	0.047	1.93e-15	R	0.244	0	R	0.076	2.7e-39	R

Tabla B.4: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para servidor ISP 2 internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.051	0.0264	R	0.059	0.00663	R	0.081	5.17e-05	R	0.100	1.86e-07	R
TCP Download	0.115	1.52e-09	R	0.040	0.164	NR	0.160	4.68e-18	R	0.090	5.02e-06	R
UDP Upload	0.050	0.0316	R	0.034	0.291	NR	0.104	4.55e-08	R	0.054	0.0159	R
UDP Download	0.141	1.99e-14	R	0.041	0.129	NR	0.172	2.1e-21	R	0.078	9.81e-05	R

B.1.2. Test KS por tecnología

B.1.2.1. 4G

Tabla B.5: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC nacional en tecnología 4G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.154	0.148	NR	0.162	0.11	NR	0.152	0.156	NR	0.162	0.109	NR
TCP Download	0.243	7.15e-23	R	0.132	5.01e-07	R	0.495	6.72e-98	R	0.071	0.0239	R
UDP Upload	0.177	0.0638	NR	0.201	0.0236	R	0.189	0.0396	R	0.206	0.0185	R
UDP Download	0.208	4.01e-17	R	0.079	0.00814	R	0.438	7.28e-77	R	0.047	0.28	NR

Tabla B.6: Resultados del test de Kolmogorov-Smirnov para UdeC internacional en tecnología 4G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.070	0.000127	R	0.077	1.87e-05	R	0.095	4.55e-08	R	0.110	9.84e-11	R
TCP Download	0.105	1.44e-09	R	0.053	0.00991	R	0.181	7.74e-28	R	0.116	1.1e-11	R
UDP Upload	0.066	0.000346	R	0.046	0.0325	R	0.114	1.52e-11	R	0.077	1.9e-05	R
UDP Download	0.126	6.34e-14	R	0.035	0.19	NR	0.174	3.09e-26	R	0.093	7.49e-08	R

Tabla B.7: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en tecnología 4G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.050	6.6e-08	R	0.047	5.03e-07	R	0.025	0.0255	R	0.094	1.43e-27	R
TCP Download	0.151	3.36e-70	R	0.037	0.00015	R	0.289	4.03e-257	R	0.040	2.88e-05	R
UDP Upload	0.071	1.52e-15	R	0.027	0.0127	R	0.063	2.16e-12	R	0.052	1.52e-08	R
UDP Download	0.169	2.11e-87	R	0.056	5.43e-10	R	0.275	4.52e-235	R	0.050	6.81e-08	R

Tabla B.8: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en tecnología 4G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.084	0.00249	R	0.042	0.375	NR	0.090	0.001	R	0.073	0.013	R
TCP Download	0.132	3.43e-07	R	0.032	0.727	NR	0.209	1.55e-17	R	0.087	0.00216	R
UDP Upload	0.056	0.103	NR	0.032	0.718	NR	0.070	0.0195	R	0.058	0.0856	NR
UDP Download	0.158	1.03e-10	R	0.064	0.0409	R	0.188	5.92e-15	R	0.069	0.0231	R

B.1.2.2. 5G

Tabla B.9: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en tecnología 5G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.053	0.896	NR	0.086	0.357	NR	0.160	0.00592	R	0.114	0.103	NR
TCP Download	0.077	3.47e-06	R	0.048	0.0111	R	0.049	0.00902	R	0.093	7.14e-09	R
UDP Upload	0.058	0.83	NR	0.090	0.315	NR	0.139	0.0246	R	0.115	0.0986	NR
UDP Download	0.064	0.000244	R	0.051	0.00666	R	0.035	0.139	NR	0.098	8.97e-10	R

Tabla B.10: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en tecnología 5G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.055	9.92e-10	R	0.105	1.11e-34	R	0.067	2.15e-14	R	0.143	7.42e-64	R
TCP Download	0.177	1.8e-99	R	0.076	2.09e-18	R	0.344	0	R	0.080	2.35e-20	R
UDP Upload	0.058	3.19e-11	R	0.068	4.23e-15	R	0.092	3.56e-27	R	0.103	7.92e-34	R
UDP Download	0.167	1.16e-88	R	0.067	1.09e-14	R	0.307	1.2e-303	R	0.070	8.31e-16	R

Tabla B.11: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en tecnología 5G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.032	0.000417	R	0.119	1.45e-52	R	0.110	6.69e-45	R	0.160	1.05e-95	R
TCP Download	0.076	1.16e-21	R	0.044	1.47e-07	R	0.121	3.24e-54	R	0.085	2.35e-27	R
UDP Upload	0.036	2.76e-05	R	0.072	8.32e-20	R	0.111	9.53e-46	R	0.109	1.91e-44	R
UDP Download	0.059	1.62e-13	R	0.060	1.11e-13	R	0.051	3.74e-10	R	0.112	1.04e-46	R

Tabla B.12: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en tecnología 5G

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.045	0.498	NR	0.116	0.000203	R	0.089	0.00863	R	0.165	1.46e-08	R
TCP Download	0.116	0.000193	R	0.041	0.615	NR	0.114	0.000276	R	0.061	0.155	NR
UDP Upload	0.061	0.16	NR	0.041	0.608	NR	0.160	4.8e-08	R	0.059	0.179	NR
UDP Download	0.112	0.000363	R	0.076	0.0385	R	0.128	2.74e-05	R	0.131	1.56e-05	R

B.1.3. Test KS por rango horario

B.1.3.1. Rango 00:00 a 09:00

Tabla B.13: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 00-09 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.165	0.881	NR	0.158	0.909	NR	0.276	0.313	NR	0.152	0.929	NR
TCP Download	0.092	0.297	NR	0.086	0.371	NR	0.106	0.157	NR	0.091	0.304	NR
UDP Upload	0.186	0.777	NR	0.161	0.895	NR	0.291	0.255	NR	0.156	0.916	NR
UDP Download	0.098	0.237	NR	0.131	0.0437	R	0.129	0.0499	R	0.139	0.0271	R

Tabla B.14: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 00-09 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.251	2.81e-28	R	0.229	1.32e-23	R	0.348	1.27e-54	R	0.218	1.99e-21	R
TCP Download	0.032	0.683	NR	0.045	0.25	NR	0.324	4.33e-47	R	0.057	0.0728	NR
UDP Upload	0.247	1.94e-27	R	0.226	7.69e-23	R	0.340	3.49e-52	R	0.213	1.95e-20	R
UDP Download	0.032	0.678	NR	0.046	0.244	NR	0.350	2.44e-55	R	0.059	0.0606	NR

Tabla B.15: Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 00-09 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.078	5.67e-05	R	0.129	8.96e-13	R	0.160	2.33e-19	R	0.147	2.08e-16	R
TCP Download	0.104	2.17e-08	R	0.075	0.000125	R	0.210	2.19e-33	R	0.099	9.53e-08	R
UDP Upload	0.075	0.000133	R	0.112	1.07e-09	R	0.186	3.24e-26	R	0.130	5.98e-13	R
UDP Download	0.114	4.15e-10	R	0.120	4.2e-11	R	0.201	1.64e-30	R	0.148	9.38e-17	R

B.1.3.2. Rango 09:00 a 18:00

Tabla B.16: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 09-18 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.066	0.596	NR	0.091	0.219	NR	0.089	0.238	NR	0.128	0.0249	R
TCP Download	0.078	6.81e-07	R	0.125	5.89e-17	R	0.139	8.23e-21	R	0.185	1.41e-36	R
UDP Upload	0.054	0.825	NR	0.095	0.176	NR	0.096	0.171	NR	0.133	0.0176	R
UDP Download	0.089	6.71e-09	R	0.115	1.4e-14	R	0.175	4.31e-33	R	0.178	2.2e-34	R

Tabla B.17: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 09-18 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.038	0.000383	R	0.092	3.07e-22	R	0.038	0.000336	R	0.143	1.4e-53	R
TCP Download	0.129	1.24e-43	R	0.036	0.000806	R	0.224	2.41e-132	R	0.102	9.68e-28	R
UDP Upload	0.028	0.0147	R	0.068	7.49e-13	R	0.086	6.92e-20	R	0.099	1.55e-26	R
UDP Download	0.103	7.94e-29	R	0.016	0.431	NR	0.183	8.22e-90	R	0.072	3.12e-14	R

Tabla B.18: Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 09-18 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.048	1.28e-10	R	0.060	2.56e-16	R	0.035	8.13e-06	R	0.109	3.33e-52	R
TCP Download	0.133	3.88e-77	R	0.026	0.00183	R	0.247	1.24e-269	R	0.068	1.8e-20	R
UDP Upload	0.055	1.06e-13	R	0.026	0.00278	R	0.051	1.32e-11	R	0.064	4.2e-18	R
UDP Download	0.126	1.04e-69	R	0.031	0.000118	R	0.258	4.69e-294	R	0.053	1.07e-12	R

Tabla B.19: Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en 09-18 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.051	0.0264	R	0.059	0.00663	R	0.081	5.17e-05	R	0.100	1.86e-07	R
TCP Download	0.115	1.52e-09	R	0.040	0.164	NR	0.160	4.68e-18	R	0.090	5.02e-06	R
UDP Upload	0.050	0.0316	R	0.034	0.291	NR	0.104	4.55e-08	R	0.054	0.0159	R
UDP Download	0.141	1.99e-14	R	0.041	0.129	NR	0.172	2.1e-21	R	0.078	9.81e-05	R

B.1.3.3. Rango 18:00 a 00:00

Tabla B.20: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en 18-24 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.215	0.226	NR	0.219	0.21	NR	0.202	0.291	NR	0.218	0.213	NR
TCP Download	0.219	1.05e-09	R	0.096	0.0334	R	0.421	8.09e-36	R	0.057	0.448	NR
UDP Upload	0.200	0.3	NR	0.222	0.197	NR	0.206	0.269	NR	0.229	0.168	NR
UDP Download	0.141	0.000265	R	0.053	0.54	NR	0.269	1.53e-14	R	0.094	0.0387	R

Tabla B.21: Test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en 18-24 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.113	3.75e-12	R	0.117	4.9e-13	R	0.130	4.4e-16	R	0.116	8.33e-13	R
TCP Download	0.079	3.63e-06	R	0.138	6.52e-18	R	0.108	4.56e-11	R	0.159	8.3e-24	R
UDP Upload	0.102	5.7e-10	R	0.116	6.8e-13	R	0.119	1.98e-13	R	0.119	1.24e-13	R
UDP Download	0.082	1.23e-06	R	0.122	3.15e-14	R	0.084	7.07e-07	R	0.143	2.56e-19	R

Tabla B.22: Test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en 18-24 h

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.092	1.74e-14	R	0.127	6.78e-27	R	0.153	5.46e-39	R	0.137	2.84e-31	R
TCP Download	0.063	5.07e-07	R	0.063	6.55e-07	R	0.095	2.54e-15	R	0.104	3.79e-18	R
UDP Upload	0.078	1.58e-10	R	0.093	1.09e-14	R	0.157	2.54e-41	R	0.110	2.26e-20	R
UDP Download	0.073	4.25e-09	R	0.095	3.5e-15	R	0.111	1.57e-20	R	0.140	8.76e-33	R

B.1.4. Test KS por teléfono

B.1.4.1. 2312DRAABG

Tabla B.23: Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor UdeC nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.126	0.887	NR	0.112	0.95	NR	0.270	0.102	NR	0.110	0.957	NR
TCP Download	0.130	0.00307	R	0.078	0.192	NR	0.089	0.0927	NR	0.075	0.223	NR
UDP Upload	0.185	0.481	NR	0.148	0.745	NR	0.263	0.12	NR	0.129	0.869	NR
UDP Download	0.078	0.194	NR	0.054	0.631	NR	0.141	0.00101	R	0.059	0.517	NR

Tabla B.24: Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor UdeC internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.037	0.00191	R	0.099	1.94e-21	R	0.047	3.36e-05	R	0.153	7.89e-51	R
TCP Download	0.125	1.24e-34	R	0.038	0.00145	R	0.223	2.62e-110	R	0.101	9.53e-23	R
UDP Upload	0.031	0.0139	R	0.073	2.28e-12	R	0.092	2.7e-19	R	0.105	8.98e-25	R
UDP Download	0.096	8.51e-21	R	0.027	0.0454	R	0.179	3.66e-71	R	0.076	2.46e-13	R

Tabla B.25: Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRAABG en servidor ISP 1 nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.030	0.0102	R	0.101	2.58e-26	R	0.060	1.34e-09	R	0.148	8.05e-56	R
TCP Download	0.128	4.81e-42	R	0.063	2.2e-10	R	0.259	3.44e-172	R	0.070	9.15e-13	R
UDP Upload	0.043	5.41e-05	R	0.051	5.38e-07	R	0.079	3.24e-16	R	0.090	8.04e-21	R
UDP Download	0.099	4.84e-25	R	0.057	1.67e-08	R	0.211	4.4e-114	R	0.087	1.99e-19	R

Tabla B.26: Test de Kolmogorov-Smirnov para 2312DRAABG en servidor ISP 2 internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.032	0.889	NR	0.126	4.96e-05	R	0.097	0.00388	R	0.176	2.32e-09	R
TCP Download	0.125	6.01e-05	R	0.046	0.465	NR	0.126	5.07e-05	R	0.062	0.158	NR
UDP Upload	0.050	0.382	NR	0.045	0.495	NR	0.154	3.05e-07	R	0.067	0.0989	NR
UDP Download	0.119	0.000164	R	0.070	0.0779	NR	0.138	6.36e-06	R	0.125	5.97e-05	R

B.1.4.2. 2312DRA50G

Tabla B.27: Test de Kolmogorov-Smirnov para 2312DRA50G en servidor UdeC nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.154	0.148	NR	0.162	0.11	NR	0.152	0.156	NR	0.162	0.109	NR
TCP Download	0.243	7.15e-23	R	0.132	5.01e-07	R	0.495	6.72e-98	R	0.071	0.0239	R
UDP Upload	0.177	0.0638	NR	0.201	0.0236	R	0.189	0.0396	R	0.206	0.0185	R
UDP Download	0.208	4.01e-17	R	0.079	0.00814	R	0.438	7.28e-77	R	0.047	0.28	NR

Tabla B.28: Test de Kolmogorov-Smirnov para 2312DRA50G en servidor UdeC internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.070	0.000127	R	0.077	1.87e-05	R	0.095	4.55e-08	R	0.110	9.84e-11	R
TCP Download	0.105	1.44e-09	R	0.053	0.00991	R	0.181	7.74e-28	R	0.116	1.1e-11	R
UDP Upload	0.066	0.000346	R	0.046	0.0325	R	0.114	1.52e-11	R	0.077	1.9e-05	R
UDP Download	0.126	6.34e-14	R	0.035	0.19	NR	0.174	3.09e-26	R	0.093	7.49e-08	R

Tabla B.29: Test de Kolmogorov-Smirnov para 2312DRA50G en servidor ISP 1 nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.058	2.45e-06	R	0.055	1.37e-05	R	0.027	0.105	NR	0.101	3.41e-18	R
TCP Download	0.097	1.36e-16	R	0.043	0.00125	R	0.137	8.69e-33	R	0.101	4.59e-18	R
UDP Upload	0.059	1.47e-06	R	0.022	0.287	NR	0.074	5.85e-10	R	0.043	0.00139	R
UDP Download	0.123	1.83e-26	R	0.037	0.00847	R	0.186	1.28e-60	R	0.066	4.41e-08	R

Tabla B.30: Test de Kolmogorov–Smirnov para 2312DRA50G en servidor ISP 2 internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.084	0.00249	R	0.042	0.375	NR	0.090	0.001	R	0.073	0.013	R
TCP Download	0.132	3.43e-07	R	0.032	0.727	NR	0.209	1.55e-17	R	0.087	0.00216	R
UDP Upload	0.056	0.103	NR	0.032	0.718	NR	0.070	0.0195	R	0.058	0.0856	NR
UDP Download	0.158	1.03e-10	R	0.064	0.0409	R	0.188	5.92e-15	R	0.069	0.0231	R

B.1.4.3. SM-S928B

Tabla B.31: Test de Kolmogorov–Smirnov para SM-S928B en servidor UdeC internacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.149	1.08e-21	R	0.155	2.65e-23	R	0.276	9.51e-74	R	0.163	1.24e-25	R
TCP Download	0.021	0.713	NR	0.061	0.00065	R	0.258	2.74e-64	R	0.089	5.11e-08	R
UDP Upload	0.160	6.43e-25	R	0.154	6.94e-23	R	0.269	4.8e-70	R	0.161	3.83e-25	R
UDP Download	0.023	0.598	NR	0.058	0.00124	R	0.245	5.15e-58	R	0.073	1.47e-05	R

Tabla B.32: Test de Kolmogorov–Smirnov para SM-S928B en servidor ISP 1 nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.077	6.81e-09	R	0.102	3.04e-15	R	0.175	7.9e-44	R	0.119	1.96e-20	R
TCP Download	0.043	0.00538	R	0.079	3.32e-09	R	0.059	2.58e-05	R	0.109	2.17e-17	R
UDP Upload	0.078	5.8e-09	R	0.090	7.21e-12	R	0.181	5.22e-47	R	0.091	2.81e-12	R
UDP Download	0.091	4.26e-12	R	0.119	1.97e-20	R	0.124	2.15e-22	R	0.154	3.76e-34	R

B.1.4.4. Motorola Edge 30 Pro

Tabla B.33: Test de Kolmogorov–Smirnov para motorola edge 30 pro en servidor UdeC nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.062	0.869	NR	0.089	0.476	NR	0.171	0.0108	R	0.098	0.35	NR
TCP Download	0.076	8.55e-05	R	0.033	0.295	NR	0.046	0.0471	R	0.064	0.00159	R
UDP Upload	0.067	0.798	NR	0.065	0.838	NR	0.157	0.0248	R	0.088	0.479	NR
UDP Download	0.074	0.000152	R	0.025	0.655	NR	0.042	0.0876	NR	0.066	0.00108	R

Tabla B.34: Test de Kolmogorov–Smirnov para motorola edge 30 pro en servidor ISP 1 nacional

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.080	0.000172	R	0.068	0.00223	R	0.057	0.0166	R	0.079	0.000221	R
TCP Download	0.130	4.03e-11	R	0.039	0.208	NR	0.254	7.39e-42	R	0.098	1.47e-06	R
UDP Upload	0.059	0.0128	R	0.052	0.0349	R	0.060	0.0094	R	0.081	0.000121	R
UDP Download	0.155	8.56e-16	R	0.054	0.0258	R	0.270	1.18e-47	R	0.067	0.0028	R

B.1.5. Test KS por banda de frecuencia

B.1.6. Banda 700

Tabla B.35: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B700

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.089	0.443	NR	0.111	0.198	NR	0.142	0.0488	R	0.134	0.0728	NR
TCP Download	0.077	0.639	NR	0.079	0.6	NR	0.166	0.012	R	0.108	0.224	NR
UDP Upload	0.080	0.583	NR	0.093	0.391	NR	0.409	3.93e-14	R	0.098	0.326	NR
UDP Download	0.072	0.717	NR	0.104	0.267	NR	0.202	0.00108	R	0.120	0.136	NR

B.1.7. Banda 1900

Tabla B.36: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B1900

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.075	0.0288	R	0.116	7.94e-05	R	0.160	8.9e-09	R	0.132	4.73e-06	R
TCP Download	0.123	2.48e-05	R	0.070	0.0528	NR	0.191	2.74e-12	R	0.049	0.321	NR
UDP Upload	0.142	9.7e-07	R	0.158	3.16e-08	R	0.222	7.54e-16	R	0.159	2.6e-08	R
UDP Download	0.183	4.35e-11	R	0.110	0.000311	R	0.219	1.13e-15	R	0.064	0.1	NR

B.1.7.1. Banda AWS

Tabla B.37: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC nacional en banda AWS

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.154	0.148	NR	0.162	0.11	NR	0.152	0.156	NR	0.162	0.109	NR
TCP Download	0.243	7.15e-23	R	0.132	5.01e-07	R	0.495	6.72e-98	R	0.071	0.0239	R
UDP Upload	0.177	0.0638	NR	0.201	0.0236	R	0.189	0.0396	R	0.206	0.0185	R
UDP Download	0.208	4.01e-17	R	0.079	0.00814	R	0.438	7.28e-77	R	0.047	0.28	NR

Tabla B.38: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para UdeC internacional en banda AWS

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.070	0.000127	R	0.077	1.87e-05	R	0.095	4.55e-08	R	0.110	9.84e-11	R
TCP Download	0.105	1.44e-09	R	0.053	0.00991	R	0.181	7.74e-28	R	0.116	1.1e-11	R
UDP Upload	0.066	0.000346	R	0.046	0.0325	R	0.114	1.52e-11	R	0.077	1.9e-05	R
UDP Download	0.126	6.34e-14	R	0.035	0.19	NR	0.174	3.09e-26	R	0.093	7.49e-08	R

Tabla B.39: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda AWS

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.058	2.45e-06	R	0.055	1.37e-05	R	0.027	0.105	NR	0.101	3.41e-18	R
TCP Download	0.097	1.36e-16	R	0.043	0.00125	R	0.137	8.69e-33	R	0.101	4.59e-18	R
UDP Upload	0.059	1.47e-06	R	0.022	0.287	NR	0.074	5.85e-10	R	0.043	0.00139	R
UDP Download	0.123	1.83e-26	R	0.037	0.00847	R	0.186	1.28e-60	R	0.066	4.41e-08	R

Tabla B.40: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 2 internacional en banda AWS

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.084	0.00249	R	0.042	0.375	NR	0.090	0.001	R	0.073	0.013	R
TCP Download	0.132	3.43e-07	R	0.032	0.727	NR	0.209	1.55e-17	R	0.087	0.00216	R
UDP Upload	0.056	0.103	NR	0.032	0.718	NR	0.070	0.0195	R	0.058	0.0856	NR
UDP Download	0.158	1.03e-10	R	0.064	0.0409	R	0.188	5.92e-15	R	0.069	0.0231	R

B.1.8. Banda 2600

Tabla B.41: Resultados del test de Kolmogorov–Smirnov para servidor ISP 1 nacional en banda B2600

Velocidad	Normal			Gamma			Rayleigh			Log-Normal		
	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR	KS	P	R/NR
TCP Upload	0.063	0.000385	R	0.124	9.89e-15	R	0.115	8.98e-13	R	0.158	1.17e-23	R
TCP Download	0.067	0.000134	R	0.055	0.00327	R	0.094	1.77e-08	R	0.095	1.12e-08	R
UDP Upload	0.079	4.54e-06	R	0.115	1.46e-12	R	0.132	1.81e-16	R	0.125	7.62e-15	R
UDP Download	0.077	6.17e-06	R	0.042	0.043	R	0.081	1.43e-06	R	0.092	3.06e-08	R