

## Modelado Estadístico de Tráfico de Videostreaming en Red Móvil Virtualizada Mediante Plataformas de Software Libre

### Statistical modeling of videostreaming traffic in a virtualized mobile network using open source software platforms

Santiago Martínez-Ardila<sup>1</sup>, Claudia Tatiana Arcila-Pineda<sup>2</sup>, Wilmar Yesid Campo-Muñoz<sup>3</sup>, David  
Alejandro Monedero-Ortiz<sup>4</sup>

1 Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

2 Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

3 PhD en Ingeniería Telemática, Magister en Ingeniería, Área Telemática, Ingeniero en Electrónica Y  
Telecomunicaciones, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

4 Ingeniero Electrónico, Universidad del Quindío, Armenia, Colombia

*Cite this article as: S. Martínez-Ardila, C. Arcila-Pineda, W. Campo-Muñoz, D. Monedero-Ortiz "Modelado estadístico de tráfico de videostreaming en red móvil virtualizada mediante plataformas de software libre", Prospectiva, Vol 23, N° 2, 2025.*

Recibido: 27/11/2024 / Aceptado: 25/04/2025

<http://doi.org/10.15665/rp.v23i2.3705>

#### RESUMEN

La tecnología 5G permite el despliegue de redes móviles mediante plataformas de Software Libre y Código Abierto, capaces de gestionar grandes volúmenes de datos como los generados por el videostreaming, que representa más del 75% del tráfico móvil actual. Se analiza el comportamiento estadístico del tráfico de video en una red móvil virtualizada, utilizando funciones de densidad de probabilidad (PDF) y de distribución acumulada (CDF), obtenidas a partir de la caracterización de tráfico real con codificaciones H.264 y H.265. La metodología se desarrolló en tres fases: i) implementación del entorno de prueba, ii) captura y procesamiento de trazas reales, y iii) aplicación de pruebas de bondad de ajuste para identificar las funciones que mejor describen el tráfico. Se presentan las tasas de transferencia de audio y video, junto con las PDF y CDF de las tramas del Grupo de Imágenes (GOP), y una comparación del consumo de recursos computacionales por codificación. Este estudio aporta un modelo estadístico que permite anticipar el comportamiento del tráfico en redes 5G, optimizar recursos, reducir costos operativos y diseñar redes sin necesidad de pruebas físicas con usuarios. Asimismo, ofrece una metodología replicable para investigaciones en calidad de servicio, planificación de red y simulación de tráfico.

**Palabras clave:** Caracterización estadística, CDF, PDF, red móvil, tecnologías emergentes, videostreaming.

#### ABSTRACT

5G technology enables the deployment of mobile networks through Free and Open Source Software (FOSS) platforms, capable of managing large volumes of data such as that generated by videostreaming, which represents more than 75% of current mobile traffic. This study analyzes the statistical behavior of video traffic in a virtualized mobile network, using Probability Density Functions (PDF) and Cumulative Distribution Functions (CDF) obtained from the characterization of real traffic encoded with H.264 and H.265 standards. The methodology was structured in three phases: i) implementation of the experimental environment, ii) capture and processing of real traffic traces, and iii) application of goodness-of-fit tests to identify the functions that best describe the traffic behavior. Audio and video throughput rates are presented, along with the corresponding PDFs and CDFs of the Group of Pictures (GOP) frame types, and a comparison of computational resource consumption for each encoding. This study proposes a statistical model that supports traffic behavior prediction in 5G networks, enabling resource optimization, operational cost reduction, and network design without the need for physical user testing. Furthermore, it offers a replicable methodology for research in quality of service (QoS), network planning, and traffic simulation.

**Keywords :** CDF, emerging technologies, mobile network, PDF, statistical characterization, videostreaming.

## 1. INTRODUCCIÓN

Con la llegada de la tecnología 5G, ha surgido la capacidad de desplegar redes móviles funcionales mediante plataformas de Software Libre y Código Abierto (FOSS) [1]. Así, surge el Acceso de Radio Abierto – OpenRAN, como una arquitectura de red para promover la interoperabilidad a través de hardware, software e interfaces abiertas [2]. Por tanto, estas tecnologías permiten reducir costos de implementación y acelerar la transformación digital en las telecomunicaciones [3], [4]. Además, las redes móviles construidas mediante estas tecnologías deben ofrecer capacidades equiparables a las infraestructuras propietarias en calidad de servicio, calidad de experiencia y en manejo de grandes volúmenes de información. En este orden de ideas, la alta demanda y oferta de dispositivos móviles inteligentes y los Servicios de Transmisión Libre (OTT) que se materializan a través de plataformas de streaming, son reflejados a través de los servicios de videostreaming, los cuales representan más del 75% [4], [5]. En consecuencia, cuando se desea diseñar una red móvil basada en plataformas FOSS es importante conocer el comportamiento estadístico de dicho tráfico como insumo útil en los procesos de dimensionamiento de las redes.

Por tanto, en este artículo se despliega una red móvil virtualizada para el consumo del servicio de videostreaming y se caracteriza el tráfico del servicio mediante Funciones de Densidad de Probabilidad (PDF) y Funciones de Distribución Acumulada (CDF) que representan su comportamiento estadístico, junto con la verificación de estas por medio de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogórov-Smirnov (KS). El despliegue de la red móvil se basa en la plataforma de código abierto Mosaic5G [6], [7]. Esta plataforma brinda los componentes de una arquitectura de red móvil, así como las interfaces virtualizadas que permiten la interconexión de los componentes. Además, la plataforma incorpora una interfaz de Radio Frecuencia (RF), para la cual se utiliza un módulo de radio definido por software USRP [2].

Para el servicio de videostreaming se escoge el servidor de video Live555 ya que soporta el Protocolo de Transmisión en Tiempo Real (RTSP) estándar [8], [9]. El servidor fue desplegado de manera local con el fin de tener un control total de las trazas de tráfico. Una vez el servicio está en funcionamiento, mediante el analizador de protocolos Wireshark se capturan y filtran las trazas de tráfico. Además, puesto que el video utiliza algoritmos de compresión mediante fotogramas denominados tipos de imágenes, los cuales son identificados, esto es, el Grupo de Imágenes (GOP) [10], [11], que para las codificaciones estándar H.264 y H.265 se denominan *slice* [12]. Esta caracterización granular del video permite que los resultados de las PDF puedan ser extrapolados a diferentes tipos de escenarios y videos [13]. Para la obtención de las funciones estadísticas, se realiza un filtrado en donde se separan específicamente cada una de las tramas GOP para su respectivo análisis, lo que, a su vez incluye la división del audio y el video. Con la información separada y organizada, se procede a encontrar la PDF y para determinar el ajuste por medio de las pruebas de KS, la CDF. Lo anterior, por medio de la herramienta MATLAB [14], la cual se ajusta con un grado de

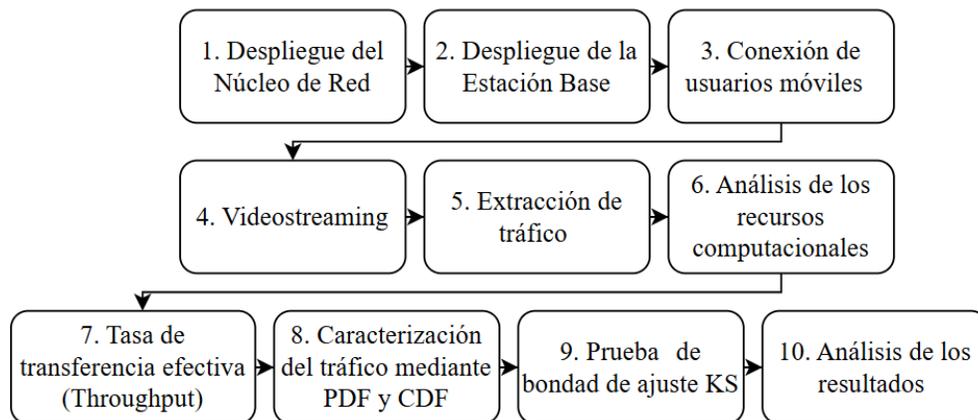
confianza del 95% [10], [13]. Por tanto, no se suponen comportamientos de tráfico, sino que, por el contrario, a partir de trazas de tráfico real se hace un análisis estadístico que permite modelar el comportamiento granular del servicio de videostreaming para que los resultados puedan ser utilizados en otros contextos.

Por tanto, como aportes se presenta el modelado estadístico del tráfico de videostreaming el cual puede utilizarse como herramienta analítica para comprender y predecir el comportamiento de servicios exigentes sobre redes 5G virtualizadas o cualquier otro tipo de red de datos. Desde la perspectiva de los operadores de telecomunicaciones, esta caracterización puede utilizarse para procesos de dimensionamiento de la red, mejorar la eficiencia en el uso de recursos y evaluar escenarios sin requerir pruebas con usuarios reales, lo que ahorra costos operativos y mayor agilidad en el diseño. A nivel académico, la investigación ofrece un marco replicable que integra tecnologías FOSS, análisis estadístico y experimentación real, sirviendo como base para futuras investigaciones sobre QoS, planificación de red, y aprendizaje automático aplicado al tráfico. Así, el modelado estadístico propuesto valida empíricamente el comportamiento de las tramas GOP en diferentes codificaciones, además, brinda una base cuantitativa útil para el desarrollo de simuladores, generadores de tráfico y estrategias de gestión inteligentes.

La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 2 se detalla una metodología en cascada, la Sección 3 se centra en los resultados y su discusión, y, finalmente, en la Sección 4 se exponen las conclusiones que resumen los principales aportes de la investigación.

## 2. METODOLOGÍA

En el marco de este proyecto, se ha adoptado la metodología en cascada [15], la cual proporciona un enfoque secuencial y estructurado para llevar a cabo la caracterización estadística del tráfico de red mediante etapas clave como el despliegue de la infraestructura de red, la conexión de usuarios, la captura y filtrado del tráfico generado entre otras [16], ver Figura 1.



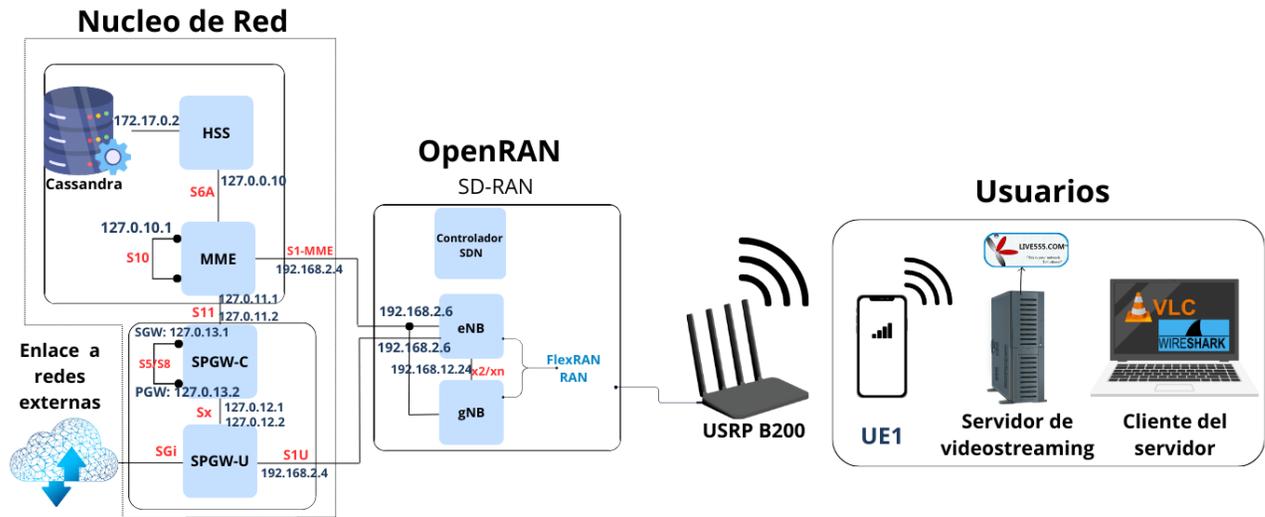
**Figura 1.** Fases de la metodología. Fuente: Elaboración propia.

**Figure 1.** Phases of the methodology. Source: Own elaboration.

Para iniciar, se llevó a cabo el despliegue de una red móvil virtualizada sobre un dispositivo computacional portátil Acer Aspire Nitro Intel Core i5 10300H con 8GB de RAM, en sistema operativo Linux Ubuntu 20.04, siguiendo los estándares del repositorio Mosaic5G que utiliza los lineamientos del Proyecto de Asociación de Tercera Generación (3GPP) [7], [17]. La arquitectura de esta red incluye varios módulos en el Núcleo de Red (CN), como la base de datos Cassandra, el Servidor de Autenticación de Abonados Domésticos (HSS), la Entidad de Gestión de Movilidad (MME), y las Puertas de Enlace de Control (SPGWC) y de Usuario (SPGWU). Estos componentes están conectados a la estación base, que consta de los módulos NodoB evolucionado (eNB) y gNodeB (gNB), los cuales incorporan una interfaz de RF a través

del hardware Ettus USRP B200 ENC [18], junto con las antenas VERT2450 Doble Banda, como se ilustra en Figura 2.

Posteriormente, se procedió a conectar un usuario a la red utilizando la tarjeta SIM Sysmocom SJS1, la cual fue autenticada a través del HSS. Esta tarjeta se integró en un dispositivo móvil Asus Zenphone denominado UE1, que se empleó como punto de acceso WiFi mediante la función de Hotspot móvil para proporcionar la conexión de dispositivos computacionales.



**Figura 2.** Arquitectura de red detallada y en funcionamiento. Fuente: Elaboración propia.  
**Figure 2.** Detailed and working network architecture. Source: Own elaboration.

Una vez establecida la red y con los usuarios conectados, se procede a iniciar la comunicación entre dos usuarios asignados como transmisor y receptor. Para ello, se implementa un servidor utilizando la herramienta Live555 [19], que facilita la transmisión de datos a través del protocolo RTSP. Mediante este protocolo, se transmitió un video en formato 1080p, empleando las codificaciones H.264 y H.265, las cuales destacan por su eficiencia en la compresión, compatibilidad y capacidad para manejar resoluciones modernas.

Con base a lo anterior, se procedió con la captura del tráfico de video por medio de la herramienta Wireshark, en la cual, se llevó a cabo un filtrado y gestión de los datos pertenecientes a las tramas GOP, por medio de la identificación del tipo de trama y la extracción del peso específico de la misma. Lo anterior se ejecutó para las codificaciones previamente mencionadas junto con la evaluación de la tasa de transferencia efectiva y los recursos computacionales.

Para finalizar, la caracterización estadística del tráfico se llevó a cabo por medio del Toolbox estadístico denominado “Statistics and Machine Learning Toolbox” de MATLAB con el cual, se obtuvo la PDF y la CDF; fundamentales para la comprensión y modelado del comportamiento del tráfico en la red y por medio de pruebas de bondad de ajuste se verifica la idoneidad de los modelos empíricos con respecto a los teóricos, bajo los lineamientos de KS, asegurando así la fiabilidad y precisión de los resultados.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

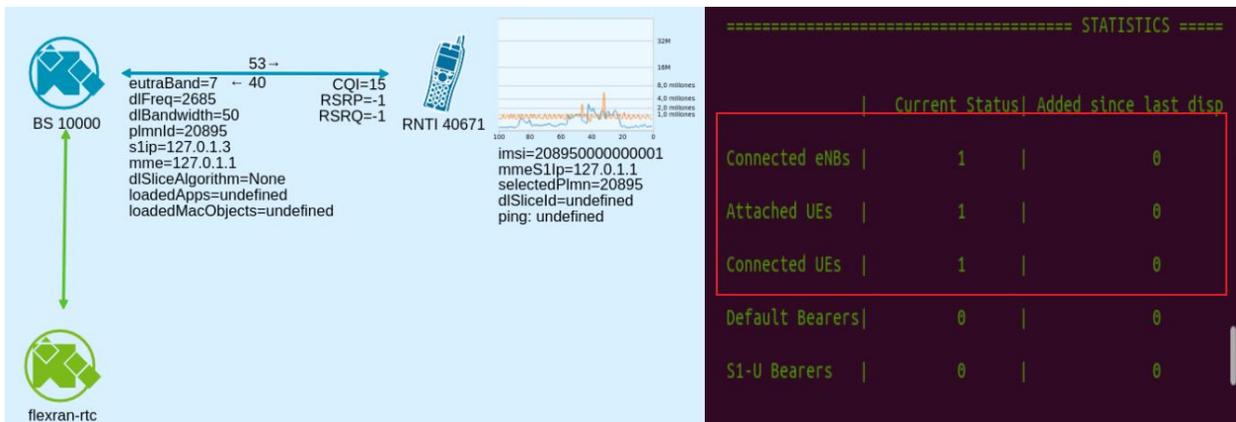
En esta sección, se describe el proceso de configuración del entorno de experimentación, el cual consta de tres elementos. En primer lugar, se llevó a cabo la implementación de una infraestructura de red móvil utilizando tecnologías FOSS, seguida de la instalación, configuración y uso del servidor. En segundo lugar, se realizó la captura de tráfico y recursos computacionales, junto con su posterior filtrado para la caracterización estadística y la prueba de bondad de ajuste KS.

### 3.1 Primer elemento: Despliegue de red móvil virtualizada y servidor de videostreaming

El despliegue y la configuración de la red se realizó siguiendo las directrices proporcionadas por la documentación oficial del repositorio Mosaic5G [7], la cual proporciona información específica de las configuraciones de identificación y registro que se deben realizar en los elementos HSS, MME, SPGWC y SPGWU que forman parte del CN para asegurar una comunicación activa y funcional entre ellos, dichos elementos se basan en tecnologías de Virtualización de Funciones de Red (NFV). Además, se realizaron modificaciones a los archivos de configuración de la Red de Acceso por Radio (RAN), para permitir el acceso radioeléctrico de cada usuario y llevar a cabo la conexión inalámbrica por medio de la unidad de radio USRP B200 [18], conectada al equipo de cómputo. Por otro lado, para la gestión del flujo de datos y los parámetros de los usuarios, se habilitaron tecnologías OpenRAN como lo es el controlador FlexRAN, como un elemento de Red definido por Software (SDN), que, a su vez, funciona como una Red de Acceso Radio-Definido por Software (SD-RAN) por la comunicación eficiente y directa que tiene con la estación RAN [16].

Una vez desplegada y en funcionamiento la RAN y el CN, se procedió con la conexión de los usuarios móviles reales por medio del repositorio Pysim y un lector de tarjetas SIM MV PS/SC ISO 7816, se ingresaron los parámetros Identificador Único Móvil Internacional (IMSI), el Código de Red Móvil (MNC), el Código de País Móvil (MCC), la Clave de Cifrado (OPC) y la Llave de autenticación (Ki) correspondientes, los cuales coincidían con los valores dentro de la base de datos del HSS. Esto permitió que la red asigne los permisos de acceso necesarios.

En la Figura 3, a través de la Interfaz de Programación de Aplicaciones basada en Transferencia de Estado Representacional (API REST) proporcionada por FlexRAN, se puede observar la visualización del usuario conectado, identificado por su IMSI correspondiente al registro y la tasa de transferencia de Bytes tanto de subida como de bajada. Además, en el lado derecho de la imagen, se evidencia el cambio de estado de las tablas de control del MME, indicando la existencia de un usuario vinculado y conectado a los recursos de la red, bajo el nombre de UEs y el 1 como indicativo de un primer usuario activo.



**Figura 3.** Interfaz API REST de la FlexRAN y visualización del usuario conectado. Fuente: Elaboración propia.

**Figure 3.** FlexRAN REST API interface and visualization of the logged-in user. Source: Own elaboration.

Con la red móvil en funcionamiento, se procede con la instalación y configuración del servidor Live555 en un dispositivo computacional que tiene la posibilidad de enviar archivos de video en diferentes formatos. Para la transmisión de video, se escogió el protocolo por defecto RTSP por ser un estándar y en cuanto al tipo de archivo, se escogió la extensión .ts, la cual tiene un proceso de codificación y decodificación bajo los estándares de Grupo de Expertos en Imagen en Movimiento (MPEG), que permite acceder al contenido

de los datos que se envían y a su vez no recurrir a algoritmos adicionales para la codificación y extracción de datos [20].

### 3.2 Segundo elemento: Extracción del tráfico, recursos computacionales y tasa de transferencia efectiva

Para extraer el tráfico de video consumido por el receptor, se empleó la herramienta Wireshark. Esta herramienta permite capturar paquetes y analizar la información en las diferentes capas del modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI). Además, para monitorizar los recursos computacionales, se accedió al monitor de tareas de la Unidad Central de Procesamiento (CPU) y Unidad de Procesamiento Gráfico (GPU) del equipo receptor. Estos procesos de captura de datos se llevaron a cabo de manera independiente para los formatos de codificación H.264 y H.265, con el fin de identificar las variaciones en el tráfico de información al cambiar entre ambos formatos.

Una vez capturado el tráfico, se examina cada paquete en busca de los datos específicos de la trama de video, que está compuesto por las tramas Intra (I), que manejan compresión espacial, Predicción (P), que maneja una predicción en cuenta al fotograma anterior, y Bidireccional (B), que toma el fotograma anterior y posterior para la diferenciación; del GOP. Estas tramas se encuentran dentro del Protocolo de Transporte en Tiempo Real (RTP), el cual encapsula al protocolo MPEG-TS, que a su vez, dependiendo de la transmisión incluyen, el identificador para H.264 o H.265. Estos últimos contienen la información correspondiente al tipo de trama GOP.

En la Figura 4, se observa la captura de un paquete bajo la codificación H.264, que contiene la trama I, esto se puede identificar en la sección *NAL unit* con la información *Slice\_type ... (7)*. Esta información permite aplicar un filtro específico para visualizar únicamente los paquetes que tengan la trama I o estén agrupados en esta, cabe resaltar que el número 7 varía dependiendo del tipo de trama y la codificación.

```
MPEG TS Packet (reassembled)
> Packetized Elementary Stream
> PES extension
> PES header data: 3100094afd11000910a1
▼ H.264
  ▼ NAL unit: 09f0
    0... .... = Forbidden_zero_bit: 0
    .00. .... = Nal_ref_idc: 0
    ...0 1001 = Nal_unit_type: Access unit delimiter (9)
    111. .... = primary_pic_type: Unknown (-1)
    ...1 .... = rbsp_stop_bit: 1
    .... 0000 = rbsp_trailing_bits: 0
  ▼ NAL unit [truncated]: 41889080bfffef6aefccb28064254b87565eedc47cba125
    0... .... = Forbidden_zero_bit: 0
    .10. .... = Nal_ref_idc: 2
    ...0 0001 = Nal_unit_type: Coded slice of a non-IDR picture (1)
    1... .... = first_mb_in_slice: 0
    .000 1000 = slice_type: I (I slice) (7)
    1... .... = pic_parameter_set_id: 0
```

Figura 4. Captura de paquetes bajo la codificación H.264. Fuente: Elaboración propia.

Figure 4. Packet capture under H.264 encoding. Source: Own elaboration.

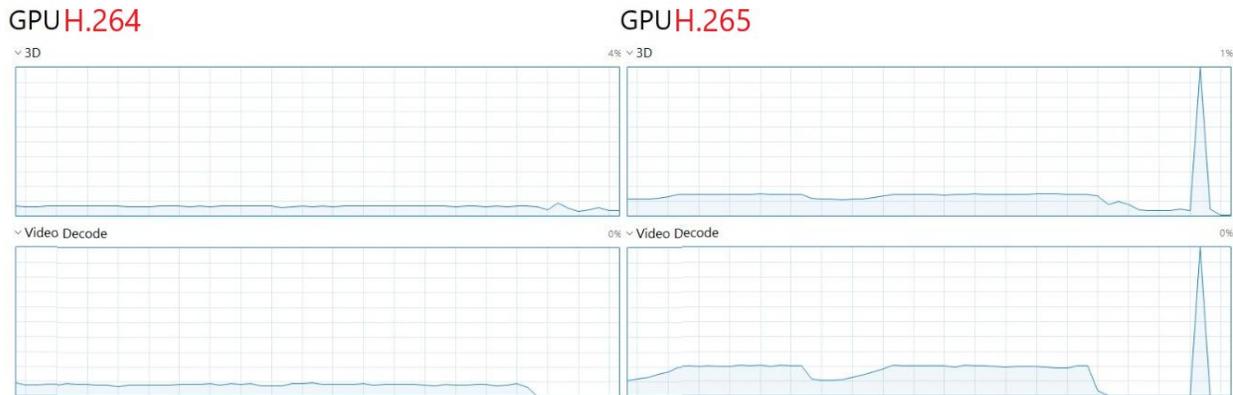
El proceso anterior se repite para las demás tramas GOP y las tramas de audio asociadas al videostreaming. Como resultado, se obtiene la Tabla 1, que incluye los filtros característicos para aplicar sobre Wireshark tanto para la codificación H.264 como para la H.265.

**Tabla 1.** Filtros en Wireshark característicos de las tramas GOP y audio. Fuente: Elaboración propia.

**Table 1.** Wireshark filters characteristic of GOP and audio frames. Source: Own elaboration.

Trama	Filtro codificación H.264	Filtro codificación H.265
Trama I	h264.slice_type == 7	h265.slice_type == 2
Trama P	h264.slice_type == 5	h264.slice_type == 1
Trama B	h264.slice_type == 6	h264.slice_type == 0
Audio	H264.mpeg-audio	H265.mpeg-audio

En relación con los recursos computacionales, la Figura 5 muestra el comportamiento de los recursos utilizados durante el consumo de video en las codificaciones H.264 y H.265, respectivamente.

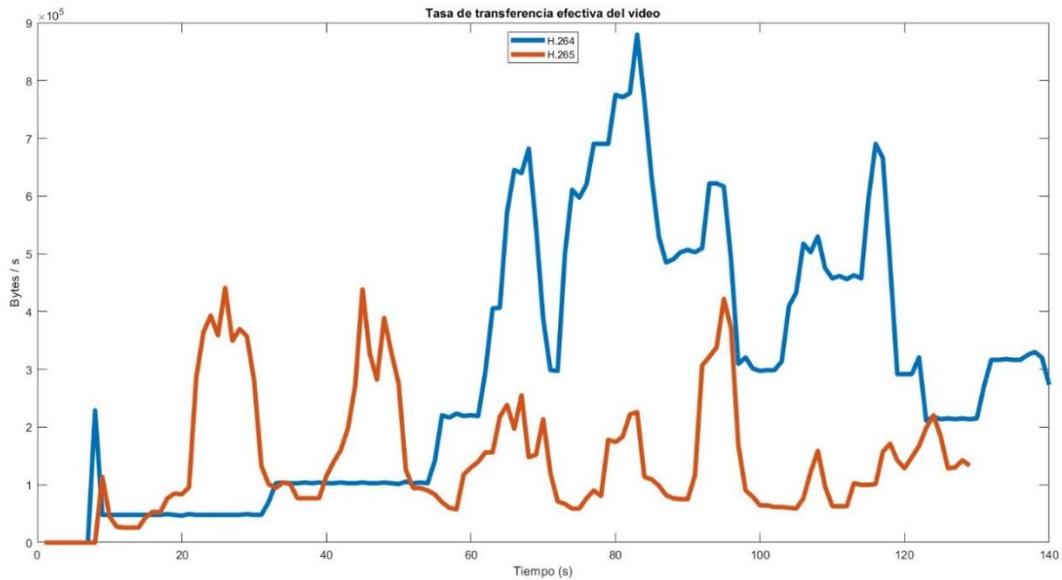


**Figura 5.** Recursos computacionales para H.264 y H.265. Fuente: Elaboración propia.

**Figure 5.** Computational Resources for H.264 and H.265. Source: Own elaboration.

Al analizar la Figura 5, se observa claramente que, al reproducir un video en alta calidad, como el de 1080p, el dispositivo computacional requiere una mayor cantidad de recursos para el formato H.265 respecto al H.264. Esto se debe a las mayores demandas de este formato en términos de descompresión y codificación para la visualización del video [21].

Sin embargo, el formato de codificación H.265 trajo mejoras en comparación con su antecesor H.264, bajando la tasa de transferencia de información y dando como resultado un menor consumo de ancho de banda. La Figura 6, ilustra este comportamiento mediante las curvas de Bytes/s el cual representa el Throughput para cada una de las codificaciones.



**Figura 6.** Tasa de transferencia efectiva del video para H.264 y H.265. Fuente: Elaboración propia.  
**Figure 6.** Effective video transfer rate for H.264 and H.265. Source: Own elaboration.

En consecuencia, ambos codificadores ofrecen ventajas que pueden ajustarse a diferentes finalidades. El codificador H.264 es ideal para aplicaciones que requieren una amplia compatibilidad, ya que tiene una menor demanda de recursos computacionales. Por otro lado, el codificador H.265 es una opción igualmente viable debido a su mayor eficiencia de compresión, permitiendo reducir el tamaño del archivo hasta en un 50% sin comprometer la calidad del video. Esta característica es especialmente crucial para la transmisión en redes con ancho de banda limitado.

### 3.3 Tercer elemento: Caracterización estadística y prueba de bondad de ajuste KS

Utilizando los filtros previamente configurados en Wireshark durante la sesión anterior, se extraen individualmente los Bytes/s de cada una de las tramas I, P y B, así como las tramas de audio, tanto en los formatos de codificación H.264 como H.265. Esta caracterización se lleva a cabo mediante la herramienta Statistics and Machine Learning Toolbox, que permite la importación organizada de datos. A partir de estos datos, se evalúan diferentes funciones de distribución de probabilidad, y al mismo tiempo, se realizan análisis matemáticos a través de diversos parámetros, tales como: Log Likelihood, escala, forma, parámetro de la hipótesis nula (H), parámetro de la significancia estadística (P-value), el estadístico KS (ksstat) y el Std. Err [22].

Con base en estos parámetros, se evalúa la efectividad de la distribución según ciertos criterios. El Log Likelihood debe ser cercano a 0, mientras que la escala y la forma deben seguir las condiciones planteadas por la distribución estadística. El parámetro H toma los valores 0 y 1, donde 0 indica que la hipótesis es verdadera o que el ajuste es adecuado, y 1 indica que la hipótesis es nula o que el ajuste es inadecuado. El parámetro P-value, cuyo valor ideal debe ser mayor a 0.05, sugiere que la hipótesis nula puede aceptarse. Por otro lado, el ksstat, con un rango de 0 a 1, debe estar lo más cerca posible de 0, lo que indica una baja diferencia entre las funciones empírica y teórica. Finalmente, el Std. Err representa la desviación estándar en la escala y forma de cada función [23].

Considerando los parámetros descritos anteriormente, se llevó a cabo una exploración de las 19 funciones de distribución de probabilidad disponibles en MATLAB. A partir de esta exploración, se seleccionaron las funciones que mejor modelan los datos empíricos, tal como se muestra en la Tabla 2.

## PROSPECTIVA VOL 23 N2.

**Tabla 2.** Valores de las PDF para las tramas GOP y audio. Fuente: elaboración propia.

**Table 2.** PDF values for GOP and audio frames. Source: Own elaboration.

<b>Codificación</b>	<b>Trama</b>	<b>Distribución</b>	<b>Escala(<math>\Lambda</math>)</b>	<b>Forma(<math>\beta</math>)</b>	<b>BandWidth</b>
H.264	I	Weibull	216771	1.3535	N/A
H.264	P	Kernel	N/A	N/A	+3780.7
H.264	B	Gamma	1.89496	2606.67	N/A
H.264	Audio	Exponencial	646.016	N/A	N/A
H.265	I	Weibull	78714.1	1.26258	N/A
H.265	P	Weibull	5332.83	1.28335	N/A
H.265	B	Kernel	N/A	N/A	101.042
H.265	Audio	Exponencial	278.455	N/A	N/A

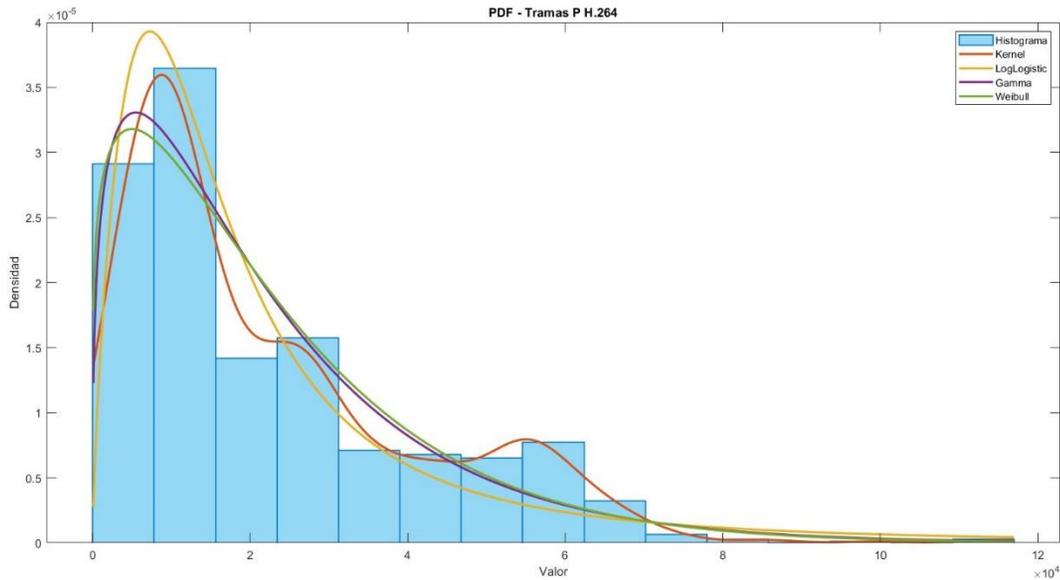
En la Tabla 2 se presentan los valores de escala, forma y ancho de banda (BandWidth), los cuales permiten describir con precisión las características de estas distribuciones en términos como la curvatura de la probabilidad planteada y la dispersión de los datos que caracteriza las tramas GOP. Por su parte, la Tabla 3 muestra los parámetros de selección obtenidos a través de las pruebas de bondad de ajuste KS de las tramas GOP, para las codificaciones previamente mencionadas.

**Tabla 3.** Valores KS para las tramas GOP. Fuente: elaboración propia.

**Table 3.** KS values for GOP frames. Source: Own elaboration.

<b>Codificación</b>	<b>Trama</b>	<b>Parámetro H</b>	<b>Parámetro P-value</b>	<b>Parámetro ksstat</b>
H.264	I	0	0.837144052	0.120378335
H.264	P	0	0.110084845	0.038685403
H.264	B	0	0.213997019	0.0240503
H.265	I	0	0.901844531	0.08737804
H.265	P	1	0.003438659	0.040847289
H.265	B	1	0.005256217	0.030708402

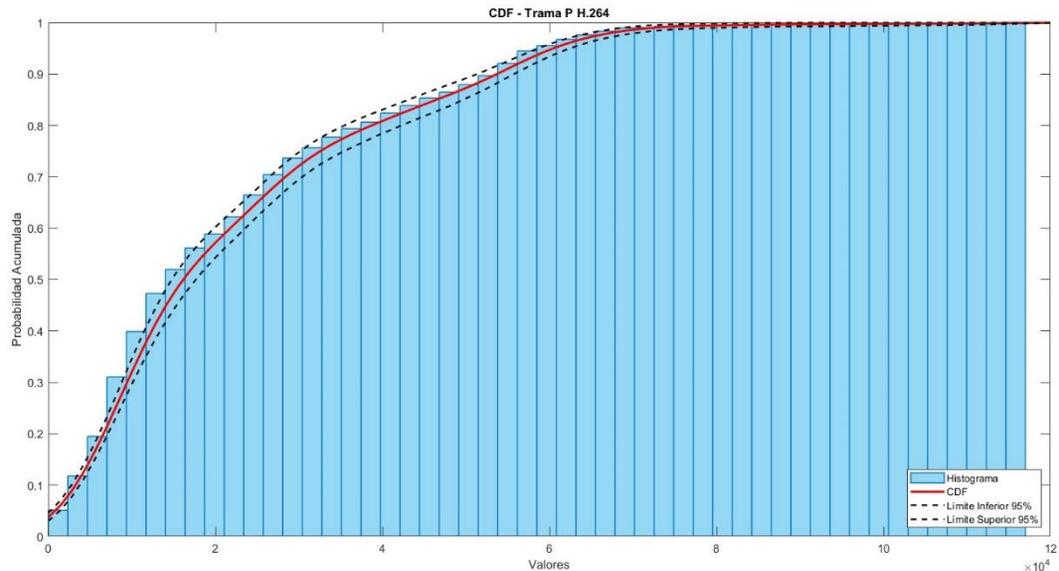
Teniendo en cuenta los valores presentados en la Tabla 2, a modo de ilustración se realiza un gráfico correspondiente a la trama P. Como se mencionó anteriormente, esta traza representa los cuadros de predicción que almacenan los cambios o diferencias con respecto al frame anterior. En el caso de la codificación H.264, dicha predicción se gestiona mediante una función kernel, la cual según los datos de la Tabla 2 es la que mejor se ajusta al comportamiento observado en la secuencia de video. Adicionalmente, se incluyen funciones PDF complementarias que, si bien no cumplen estrictamente con los parámetros previamente establecidos, presentan una curvatura cercana a los valores empíricos registrados en la trama GOP. Ver Figura 7



**Figura 7.** PDF trama P para la codificación H.264. Fuente: Elaboración propia.  
**Figure 7.** PDF P-frame for H.264 encoding. Source: Own elaboration.

El histograma de los datos generados a partir de la configuración PDF muestra cierto grado de similitud con la función Kernel. Según los valores de la Tabla 3, el valor de P-value y ksstat son 0.11 y 0.038, respectivamente. Estos valores indican que la hipótesis nula puede ser aceptada y que la diferencia entre los datos empíricos y teóricos es pequeña, por lo tanto, los datos pueden probablemente provenir de la función kernel. Por otra parte, aunque las demás distribuciones presentadas en la Figura 7 no se ajustan con la misma precisión matemática que la función Kernel, gráficamente presentan una similitud considerable con los datos modelados por el histograma.

En la Figura 8, se muestra el gráfico de la CDF para la misma trama P, la cual representa la probabilidad acumulada y que a partir de la misma es posible realizar las pruebas de bondad de ajuste de KS. Al igual que la figura anterior, representa la información de la trama P para la codificación H.264, utilizando la función de distribución Kernel.



**Figura 8.** CDF de trama P para la codificación H.264. Fuente: Elaboración propia.  
**Figure 8.** P-frame CDF for H.264 encoding. Source: Own elaboration.

## PROSPECTIVA VOL 23 N2.

En la Figura 8, se observa que el gráfico representa valores de probabilidad acumulada entre 0 y 1, donde 1 equivale al 100% de probabilidad. Además, se muestran los límites de confianza, superior e inferior; los cuales delimitan la función dentro de un rango máximo y mínimo, ajustado a un criterio de 95% de confiabilidad [24].

Estos límites de confianza se calculan a partir del Std. Err y un factor de ajuste asociado al nivel de confianza del 95%, que es aproximadamente 1.96. Esto implica que, aunque se mantenga un nivel de confianza elevado, si el error estándar es mayor, los límites estarán más alejados de la curva de la función de probabilidad. Como resultado, la CDF perderá efectividad y relevancia en comparación con otras distribuciones. Cabe destacar que, en este caso específico donde se emplea la función Kernel, se utiliza el método Bootstrap, dado que esta función es clasificada como no paramétrica.

De manera similar al análisis de la PDF y los criterios de selección, la Tabla 4 presenta la información sobre los valores utilizados para la construcción de la CDF y los límites de confianza.

**Tabla 4.** Valores de las CDF para las tramas GOP y audio. Fuente: elaboración propia.

**Table 4.** CDF values for GOP and audio frames. Source: Own elaboration.

<b>Codificación</b>	<b>Trama</b>	<b>Distribución</b>	<b>Likelihood</b>	<b>Std. Err</b>
H.264	I	Weibull	-315.8689	33909
H.264	P	Kernel	-10541.102	N/A
H.264	B	Gamma	-18028.1517	0.056
H.264	Audio	Exponencial	-918.911	58.2493
H.265	I	Weibull	-474.7529	10420
H.265	P	Weibull	-17962	100.65
H.265	B	Kernel	-24203	N/A
H.265	Audio	Exponencial	-815.399	25.1075

Es importante destacar que, gracias a los criterios de las pruebas KS, las tramas GOP pueden estar adecuadamente modeladas por las funciones seleccionadas. Esto se debe, en particular, al parámetro H, ya que un valor de 0 indica que no se puede rechazar la hipótesis nula, lo que sugiere que no hay evidencia suficiente para afirmar que los datos empíricos no se ajustan a la distribución teórica. Por otro lado, aunque algunas tramas obtuvieron un valor de H igual a 1, esto no descarta por completo la posibilidad de que los datos filtrados del tráfico puedan caracterizarse mediante las funciones PDF y CDF.

Por tanto, la información presentada en las tablas incluye los parámetros necesarios para replicar las funciones PDF y CDF mencionadas que representan el tráfico explícito obtenido a partir de trazas reales de un servicio de videostreaming. Esto brinda la oportunidad de disminuir costos en la implementación del servidor y los UE en una arquitectura de red experimentales al momento de utilizar herramientas computacionales avanzadas para la representación del tráfico, puesto que en lugar de desplegar usuarios reales es posible emular su comportamiento mediante el tráfico explícito.

Por tanto, el modelo estadístico del tráfico generado por servicios de videostreaming, es un insumo útil para analizar y anticipar el comportamiento de aplicaciones exigentes en redes 5G virtualizadas y en otras infraestructuras de datos. Desde la óptica de los operadores de telecomunicaciones, esta caracterización permite apoyar el dimensionamiento de red, mejorar el uso de recursos y simular escenarios sin necesidad de pruebas con usuarios reales, reduciendo así costos y agilizando procesos de diseño. En el ámbito académico, la propuesta ofrece una metodología reproducible que combina plataformas de software libre, análisis estadístico y validación empírica. Asimismo, el modelado propuesto proporciona evidencia cuantitativa del comportamiento de las tramas GOP para dos codificaciones estándares, ofreciendo una base para el diseño de herramientas como simuladores, generadores de tráfico y mecanismos de gestión adaptativa.

#### 4. CONCLUSIONES

La implementación de la red, basada en tecnologías como NFV, OpenRAN, SD-RAN y SDN, demuestra una arquitectura moderna y flexible capaz de satisfacer demandas exigentes en ancho de banda, como el videostreaming. La NFV simplifica la gestión y escalabilidad, mientras que OpenRAN y SD-RAN ofrecen flexibilidad y apertura en la infraestructura de acceso radioeléctrico. Combinado con SDN para una gestión centralizada y programable, esta arquitectura permite una conexión estable y fluida para el videostreaming, respaldando así su robustez ante cargas intensivas de trabajo.

El análisis del tráfico de videostreaming y la caracterización mediante herramientas como Wireshark y MATLAB revelan importantes hallazgos. La captura de tráfico permitió identificar las tramas de video y audio en los formatos H.264 y H.265, destacando que la reproducción de video en alta calidad, como 1080p, demanda mayores recursos computacionales en el formato H.265 debido a sus exigencias de descompresión y codificación. Al mismo tiempo, la caracterización del tráfico mediante las funciones PDF y CDF evidenció una notable similitud entre los datos empíricos y las distribuciones teóricas generadas, permitiendo modelar estadísticamente el comportamiento del tráfico de manera precisa.

El uso de la prueba de bondad de ajuste KS y parámetros como Log Likelihood y ksstat resultó fundamental para evaluar la calidad del ajuste de los datos a las distribuciones probabilísticas, permitiendo determinar qué tramas GOP se ajustan mejor a dichas funciones. A pesar de que algunas tramas no cumplieron con los valores esperados según los parámetros planteados, no se descarta la posibilidad de realizar su caracterización mediante las funciones PDF y CDF.

Como trabajos futuros, se propone la exploración de la herramienta denominada Generador de Tráfico Distribuido en Internet (D-ITG) para generar tráfico de acuerdo a las PDF obtenidas, en lugar de depender de suposiciones del comportamiento del tráfico. Los valores obtenidos durante la caracterización del tráfico pueden servir como referencia para diseñar escenarios realistas de tráfico de red, facilitando pruebas y evaluaciones de la calidad de servicio. Asimismo, resulta prometedor investigar la aplicación de técnicas de Machine Learning para predecir y gestionar el tráfico de red, utilizando los datos recopilados para entrenar modelos predictivos.

#### Agradecimientos

A la Universidad del Quindío por su apoyo en la realización de esta investigación a través del proyecto 1160 de la Vicerrectoría de Investigaciones.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] S.-P. Yeh, S. Bhattacharya, R. Sharma, y H. Moustafa, "Deep Learning for Intelligent and Automated Network Slicing in 5G Open RAN(ORAN) Deployment", nov. 2023, doi: 10.1109/OJCOMS.2020.1234567.
- [2] J. L. Chavez-Picon, W. Y. Campo-Muñoz, y G. E. Chanchí-Golondrino, "ARQUITECTURA PARA IMPLEMENTACIÓN DE SERVICIOS DE VIDEO SOBRE REDES MÓVILES MEDIANTE REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE Y SEGMENTACIÓN DE RED", *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, núm. 42, pp. 34–42, dic. 2023, doi: 10.24054/rcta.v2i42.2651.

## PROSPECTIVA VOL 23 N2.

- [3] A. Lacava *et al.*, “Programmable and Customized Intelligence for Traffic Steering in 5G Networks Using Open RAN Architectures”, sep. 2022, [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2209.14171>
- [4] “Ericsson Mobility Report: Resilient 5G uptake-global mobile data traffic set to triple in six years”, 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.facebook.com/ericsson>
- [5] Ericsson, “5G SA deployment: Moving beyond eMBB Extract from the Ericsson Mobility Report”, 2022.
- [6] F. A. Wiranata, W. Shalannanda, R. Mulyawan, y T. Adiono, “Automation of virtualized 5G infrastructure using mosaic 5G operator over kubernetes supporting network slicing”, en *Proceeding of 14th International Conference on Telecommunication Systems, Services, and Applications, TSSA 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., nov. 2020. doi: 10.1109/TSSA51342.2020.9310895.
- [7] Mosaic5G, “OAI CN v2 · Wiki · Mosaic5G / Mosaic5G”. Consultado: el 1 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://gitlab.eurecom.fr/mosaic5g/mosaic5g/-/wikis/oai-cn-v2>
- [8] G. E. Chanchí Golondrino, F. A. Urbano Ordoñez, y W. Y. Campos Muñoz, “Pruebas de estrés para servicios de videostreaming basados en el protocolo RTSP”, *Revista Tecnura*, vol. 19, núm. 46, p. 10, ago. 2015, doi: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a01.
- [9] Aaro Altonen, Joni Räsänen, Jaakko Laitinen, Marko Viitanen, y Jarno Vanne, *Open-Source RTP Library for High-Speed 4K HEVC Video Streaming*. IEEE, 2020.
- [10] W. Y. Campo-Muñoz, E. Astaiza-Hoyos, y L. F. Muñoz-Sanabria, “Modelado de tráfico del servicio de video bajo demanda mediante NS-3”, *DYNA (Colombia)*, vol. 84, núm. 202, pp. 55–64, 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n202.61650.
- [11] J. Gomez, V. H. Riano, y G. Ramirez-Gonzalez, “Traffic Classification in IP Networks Through Machine Learning Techniques in Final Systems”, *IEEE Access*, vol. 11, pp. 44932–44940, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3272894.
- [12] R. Yousfi, M. Ben Omor, T. Damak, M. A. Ben Ayed, y N. Masmoudi, “JEM-post HEVC vs. HM-H265/HEVC performance and subjective quality comparison based on QVA metric”, en *2018 4th International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, mar. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ATSIP.2018.8364455.
- [13] W. Y. Campo-Muñoz, ; López, y Nicolás, “Análisis del servicio IPTV Soportado por una red WiFi Analysis of the IPTV service Supported by a WiFi network”.
- [14] Inc. The MathWorks, “MATLAB (R2024a)”, 2024, *Natick, Massachusetts, USA*. Consultado: el 27 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/>
- [15] V. Morles, “Sobre la metodología como ciencia y el método científico: un espacio polémico”, *Rev. Pedagog. - Esc. Educ. Univ. Cent. Venez.*, vol. 23, núm. 66, pp. 121–146, 2002.
- [16] C. T. Arcila Pineda, S. Martinez Ardila, D. A. Monedero Ortiz, y W. Y. Campo Muñoz, “Construcción de red móvil con tecnología NSA y análisis de QoE para servicio de Videostreaming”, *REVISTA COLOMBIANA DE TECNOLOGIAS DE AVANZADA (RCTA)*, vol. 2, núm. 44, pp. 1–11, jul. 2024, doi: 10.24054/rcta.v2i44.2827.
- [17] I. PES Institute of Technology (Bangalore, IEEE Communications Society, IEEE Photonics Society. Bangalore Chapter, IEEE Robotics and Automation Society. Bangalore Chapter, y Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Detection in Sporadic Multiuser Systems over 3GPP LTE Networks*.
- [18] Ettus Research y a National Instruments Brand, “Enclosure kit for USRP B200/B210”. Consultado: el 27 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/>
- [19] Inc. Live Networks, “LIVE555”. Consultado: el 27 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://live555.com/>

- [20] D. Marpe, T. Wiegand, y S. Gordon, "H.264/MPEG4-AVC fidelity range extensions: tools, profiles, performance, and application areas", en *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, sep. 2005, pp. I-593. doi: 10.1109/ICIP.2005.1529820.
- [21] R. Alejandro, O. Solís, y Y. López Pérez, "Codificación de video en HEVC/H.265 utilizando FFMPEG", 2019.
- [22] Roberto S. Flowers-Cano, Robert Jeffrey Flowers, y Fabián Rivera-Trejo, "Evaluación de criterios de selección de modelos probabilísticos validación con series de valores máximos simulados", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 5, oct. 2014.
- [23] C. R. Primorac, M. V López, y S. I. Mariño, "Generación de Muestras Artificiales de Variables Aleatorias Continuas aplicando Métodos Especiales", 2011, [En línea]. Disponible en: [www.fisem.org/web/union](http://www.fisem.org/web/union)
- [24] ArcGIS Pro, "\`Qué es una puntuación z? \`Qué es un valor P?" Consultado: el 27 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>