

Modelo Empírico que permita evaluar el rendimiento de una Red Inalámbrica para ISP basada en el estándar 802.11

Miguel Alonso Ardila Osorio, Sergio Andrés Ardila Osorio
Universidad Autónoma de Bucaramanga

Fecha de Recepción: 23/05/15 – Fecha de Aceptación: 12/11/15

Resumen

Actualmente en redes inalámbricas operadas bajo el estándar 802.11 existen investigaciones que presentan como objetivo la medición de parámetros inherentes al sistema y/o la inclusión de protocolos para el posterior análisis del comportamiento[1]. Este estudio pretende mediante un diseño experimental encontrar los factores que afecten el rendimiento de una red inalámbrica para ISP basada en el estándar 802.11.

Se dispuso parte de la infraestructura de red de la empresa Aros Comunicaciones, para realizar la experimentación, recolección y análisis de datos. El escenario comprende el uso de tres (3) Puntos de Acceso, uno (1) en la frecuencia de 2.4 Ghz y dos (2) en la frecuencia de 5.8 Ghz, haciendo uso de trece (13), diez y seis (16) y treinta y siete (37) terminales inalámbricas; combinando estos niveles de factor con distancias de cuarenta metros (40m), mil metros (1000m) y dos mil quinientos metros (2500) para las pruebas correspondientes. Los parámetros de medición tenidos en cuenta fueron: Throughput y Retardo de Transmisión.

En las conclusiones se puede destacar que tanto en el análisis hecho para Throughput como para Retardo de Propagación los factores incidentes fueron la frecuencia de operación (A), el número de CPE's conectados al AP (C) y la interacción existente entre frecuencia de de operación y número de CPE's conectados al AP (AC).

Palabras clave: WLAN, Estándar 802.11, Análisis de Varianza, Modelo estadístico, Throughput, Retardo de Transmisión, Diseño experimental.

Abstract

Currently in wireless networks operated under the 802.11 standard they are presented as research objective measurement of parameters inherent in the system and / or the inclusion of protocols for further analysis of behavior. This study aims through an experimental design to find the factors affecting the performance of a wireless network for ISP based on the 802.11 standard.

part of the network infrastructure company Aros Communications were available, for experimentation, data

collection and analysis. The scenario involves the use of three (3) Access Points, one (1) at the frequency of 2.4 GHz and two (2) frequency of 5.8 GHz, using thirteen (13), sixteen (16) and seite thirty (37) wireless terminals; combining these levels of factor distances forty meters (40m) thousand meters (1000m) and 2500 meters (2500) for evidence. The parameters measured were taken into account: Throughput and Transmission Delay.

The conclusions can be noted that both the analysis done for Throughput Propagation delay as incidents factors were operating frequency (A), the number of CPE's connected to the AP (C) and the interaction between frequency operation and number of CPEs connected to AP (AC).

Keywords: WLAN, 802.11, Variance Analysis, Statistical model, Throughput, Delay Transmission, experimental design.

I. INTRODUCCION

La transferencia de datos en grandes volúmenes y conexiones fiables a través del tiempo se convirtió en una necesidad que profesionales expertos en este tema han tenido que satisfacer. Grandes empresas, instituciones de diferente índole, organizaciones y otras, asignan muchos de sus recursos (humanos, económicos, tecnológicos, etc) a la investigación que conlleve al desarrollo de tecnologías de alto rendimiento y capacidad[2].

Las redes inalámbricas con protocolo 802.11 pasaron de ser una solución alternativa en áreas de difícil acceso donde tecnologías de tipo cableado eran inviables por su complejidad, a ser una opción que proporciona soluciones en diferentes entornos, con los más altos estándares de calidad y confiabilidad gracias a la evolución constante que presenta[3].

En ambientes de trabajo u hogareños si los usuarios deben estar conectados por un medio cableado sus movimientos se reducen drásticamente. La conectividad inalámbrica sin embargo no presenta este tipo de restricción y permite mucha más libertad por parte del usuario. En entornos de proveedores de servicios el concepto de movilidad también juega un papel importante, brindando gran flexibilidad en sus redes, fácil despliegue y facilidad de adaptación en poco tiempo, algo que en tecnologías cableadas puede ser

lento, complejo y costoso tanto para el proveedor como para el usuario [4].

En Colombia, la última década se ha caracterizado por una expansión masiva del 802.11 tanto en aplicaciones sencillas de tipo hogar u oficinas con niveles bajos de transmisión y ambientes indoor, como en aplicaciones de grandes empresas con infraestructuras de redes tipo MAN o WAN en ambientes mixtos (indoor y/o outdoor) que requieren transmitir diferentes tipos de tráfico con capacidades hasta del orden de los Gbps y sin ningún tipo de errores y cortes en la comunicación [5]. La evolución en las telecomunicaciones en nuestro país está soportada en la necesidad de masificación del internet como herramienta de desarrollo social y económico en todos los sectores; siendo el Plan Vive Digital un proyecto bandera gubernamental que tiene como principal objetivo la reducción del desempleo, reducción de la pobreza y aumento en la competitividad mundial.

Distintos estudios han encontrado que existe una correlación directa entre la penetración y el uso de Internet, la apropiación de las TIC, la generación de empleo y la reducción de la pobreza. Por ejemplo, un estudio de las Naciones Unidas [UNCTAD2010] muestra cómo existe una clara correlación entre el número de usuarios de Internet y la tasa de pobreza de los países.

Consecuencia de la política mencionada anteriormente, el territorio nacional cuenta con troncales de fibra óptica que abarcan actualmente el 96% del territorio con 1078 municipios. Este avance tiene como complemento el acceso a conexiones de internet de altas velocidades de los habitantes de dichas poblaciones. [1]

Por lo tanto, es un reto para el estado colombiano y para empresas privadas el desarrollo de programas que tengan como propósito la creación de redes que provean y distribuyan acceso de internet de alta velocidad a las personas, instituciones, empresas, etc..., en las localidades donde no existe una infraestructura adecuada.

Claramente, hasta el momento el estado colombiano no ha hecho esfuerzos suficientes para cubrir la necesidad anteriormente mencionada; además las grandes empresas de telecomunicaciones que ofrecen estos servicios en ciudades capitales no ven lo suficientemente lucrativo la participación en este mercado. Esto generó una ventana abierta para que empresas pequeñas y microempresas llenen este vacío en diferentes lugares. La mayoría de estas empresas teniendo en cuenta las condiciones para el montaje y administración de estas redes, optaron por infraestructuras de tipo inalámbricas y más exactamente las 802.11.

Las redes inalámbricas en general y específicamente las 802.11 presentan en gran medida, bajo rendimiento por problemas del canal. El espacio libre es un medio difícil de controlar y presenta cambios constantes en sus propiedades

por factores de distintas índoles que no podemos predecir de forma totalmente acertada. El medio inalámbrico presentará, en todo momento, interferencias de otras señales y ruido electromagnético que degradarán la calidad de nuestro mensaje a transmitir o recibir. De modo que, en cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas, siempre tendremos una eficiencia condicionada directamente por la pérdida de datos en el medio, entre otras situaciones. Dichas pérdidas pueden deberse a distintos fenómenos como atenuación, distorsión o interferencia por señales no deseadas [6].

A través del tiempo las mejoras para todos y cada uno de los inconvenientes se resolvieron parcial o totalmente mediante técnicas para aumentar la capacidad del canal como: aumento en el ancho de banda, aumento de potencia de transmisión, diferentes tipos de modulaciones que hacen eficiente el espectro radioeléctrico, etc.

En la presente investigación se pretende realizar un análisis del comportamiento de una red bajo el estándar 802.11 con una infraestructura previamente operativa y generar un modelo empírico que evalué el rendimiento de este tipo de redes, basándonos en parámetros de medición como el Throughput y Retardo de Transmisión de la comunicación entre las Estaciones y los Puntos de Acceso, cuyos datos son recolectados experimentalmente mediante la inyección de datos aleatorios.

II. METODOLOGÍA

En ingeniería y otros sectores donde es necesario obtener información de interrogantes de algunos procesos y tareas; aparece el diseño experimental como una herramienta estadística-matemática que a partir de la realización de pruebas intencionadas, recolección de sus datos y análisis brinda al investigador evidencia veraz sobre el objeto en estudio.

Cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos aspectos se encuentran íntimamente relacionados porque el método de análisis depende directamente del diseño empleado [7].

La presente investigación está centrada bajo el marco de las ciencias aplicadas en ingeniería, lo cual permite por sus condiciones aplicar el diseño experimental para realizar el estudio y obtener como resultado el modelo empírico que permita evaluar el rendimiento una red inalámbrica para ISP basada en el estándar 802.11.

Cuando se desea realizar un experimento, se deben establecer claramente cada una de las siguientes etapas.

- **Planeación:** Es una de las etapas más importantes para el desarrollo del experimento, debido a que si no se realiza adecuadamente, podría generar

posteriormente resultados errados y con ello no cumplir a satisfacción el objetivo principal de la investigación. Dentro de esta etapa se debe identificar claramente: el problema de investigación, determinar los factores que deben estudiarse acorde con la influencia que estos podrían tener sobre la variable objeto de estudio, elegir las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño garantizando que se miden de manera confiable, seleccionar el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento, planear y organizar el trabajo experimental y finalmente realizar el experimento.

- **Análisis:** En esta etapa se debe determinar el modelo de análisis de varianza ANOVA y la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos.
- **Interpretación:** En esta etapa se debe ir más allá del análisis estadístico formal, en donde se analice con detalle lo que ha ocurrido con el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar los supuestos y establecer el mejor tratamiento.
- **Conclusiones finales:** En esta etapa se describen cada uno de los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento, en donde se recomienda establecer las medidas requeridas para implementar y generalizar el resultado del estudio realizado.

a. PLANEACIÓN

Siguiendo los lineamientos de trabajo citados anteriormente se expondrán los elementos fundamentales y de interés para el caso de estudio presente:

Rendimiento

En cualquier tipo de redes y especialmente en redes inalámbricas (por su sensibilidad en el medio de transmisión) es de suma importancia conocer la calidad en la comunicación. Para esto es necesario hacer un análisis de la red y así determinar su rendimiento. En el presente estudio se tendrán en cuenta factores básicos como lo son: Throughput y retardo.

Throughput: Es el parámetro de mayor relevancia al analizar el rendimiento de una red de datos. Se define como la relación entre la información útil y el tiempo de transmisión de la comunicación. Sin embargo, no todas las tecnologías se comportan de igual forma, así por ejemplo el

throughput en una red Ethernet, no es lo mismo que en una red WLAN o una red tipo PLC[8].

Partiendo de que entre los objetivos de la investigación está diseñar un modelo empírico que permite evaluar una red 802.11, y que uno de los parámetros de importancia en esa labor es el throughput, es importante presentar su definición matemática: [2]

$$Thr = \frac{L_M - L_C}{[T_M + T_{ACC}]}$$

Donde,

L_M	Longitud total del mensaje
L_C	Bits de control del mensaje
T_M	Tiempo de transmisión del mensaje
T_{ACC}	Tiempo de acceso al medio

Retardo de Propagación: Este retardo se define como el tiempo que se demoran en llegar los datos al extremo receptor desde que los datos están en el canal de transmisión.

En la ejecución del proyecto se dispondrá de equipos inalámbricos fundamentados en el estándar IEEE 802.11 con el propósito de hacer mediciones de Throughput y Retardo de Transmisión sobre una red tipo infraestructura. Con estas mediciones se pretende determinar los cambios producidos por los parámetros a considerar de forma planeada en el desarrollo del experimento. Los parámetros o factores a los que se hace referencia son: frecuencia de operación, número de terminales inalámbricos conectados al punto de acceso, y distancia entre el terminal y el punto de acceso

El tipo de diseño experimental seleccionado es el tipo factorial, cuyo objetivo consiste en estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas. Es decir, lo que se busca es estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso. Para poder estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de interés, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completa se corren aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados [9].

Al Concluir el proyecto investigativo se espera definir la influencia que tienen uno o más factores de entrada sobre la variable de salida o respuesta, buscando con esto herramientas que representen información importante y permitan evaluar el rendimiento de una red implementadas bajo el protocolo 802.11.

Dispositivos utilizados y aspectos técnicos

Para el desarrollo de las pruebas en la investigación propuesta, se usó parte del hardware de la topología de la red de la empresa AROS COMUNICACIONES LTDA y otros dispositivos: Access Point, antenas, CPEs, computadoras portátiles.

Access Point: Para la realización de las pruebas se utilizaron 3 (tres) Access point marca Ubiquiti de los cuales 2 (dos) trabajan en la frecuencia de 5.8Ghz y 1 (uno) en la frecuencia de 2.4Ghz. Los modelos utilizados fueron de la serie Rocket.

Figura 1. Access Point marca Ubiquiti modelo serie Rocket



Fuente: www.ubnt.com

Tabla 1. Especificaciones AP Ubiquiti serie rocket

Características Puntos de Acceso		
Modelo	Rocket M5	Rocket M2
Dimensiones	160 x 80 x 30 mm	160 x 80 x 30 mm
Peso	1.1 LB	0,5 Kg
Interfaz de Red	10/100 Mbit	10/100 Mbit
Rf Conector	2 RP-SMA	2 RP-SMA
Max Power consume	8 W	8 W
Modulación	MCS0 hasta MCS15 OFDM, TDMA AIRMAX	MCS0 hasta MCS15, OFDM TDMA AIRMAX
Max Potencia Tx	27 dbm	28 dbm
Modo Operación	A/N	b/g/n
Wireless	5,8Ghz	2,4Ghz
Alimentación	24V, 1A PoE	24V, 1A PoE Adapter

Característica	Adapter	Valor
Memoria SDRAM	64MB	64MB
Velocidad	150Mbps Real TCP/IP	150Mbps Real TCP/IP
MIMO 2X2	SI	SI
Procesador	400Mhz	400Mhz
Operación frec.	5170 - 5875Mhz	2412-2462 MHz
Enclosure (Protector)	SI	SI

Fuente: Autor

Antenas: Para la realización de las pruebas se utilizaron antenas marca Ubiquiti en frecuencias de 2.4Ghz y 5.8Ghz. Los modelos utilizados fueron AM-5G20-90 y AM-2G15-120

Figura 2. Antena marca Ubiquiti modelo serie M



Fuente: www.ubnt.com

Tabla 2. Especificaciones técnicas antenas utilizadas

Especificaciones Técnicas Antenas		
Modelo	AM-5G20-90	AM-2G15-120
Dimensiones (mm)	700 x 135 x 70	700 x 145 x 93
Peso	5.9 kg	4.0 kg
Rango Frecuencia	5.15 - 5.85 GHz	2.3 - 2.7 GHz
Ganancia	19.4 - 20.3 dBi	15.0 - 16.0 dBi
Hpol Ancho	91° (6 dB)	123° (6 dB)
Vpol Ancho	85° (6 dB)	118° (6 dB)
Ancho del Haz	4°	9°
Modo Operación	A/n	b/g/n
Mas VSWR	1.5:1	1.5:1
Resistencia Viento	125 mph	125 mph
Carga Viento	26 lbf @ 100 mph	24 lbf @ 100 mph
Polarización	Vertical/Horizontal	Vertical/Horizontal
MIMO 2X2	SI	SI
ETSI Especificación	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2
Tipo	Sectorial	Sectorial

Fuente: Autor

CPEs (Equipo de usuarios): La empresa AROS COMUNICACIONES LTDA utiliza gran variedad de equipos marca Ubiquiti en sus redes, sin embargo para las mediciones solo se tuvieron en cuenta modelos de la serie NanoStation M.

Figura 3 . CPE marca Ubiquiti modelo serie Nanostation M



Fuente: www.ubnt.com

Tabla 3. Especificaciones técnicas de CPEs

Características Cpe Cliente		
Modelo	NSM5	NSM2
Procesador	Atheros MIPS 24KC, 400MHz	Atheros MIPS 24KC, 400MHz
Memoria	32MB SDRAM, 8MB Flash	32MB SDRAM, 8MB Flash
Interface	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45)	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45)
Inalámbrica Certificado	FCC Part 15.247, IC RS210, CE	FCC Part 15.247, IC RS210, CE
Frecuencia Operación	5470MHz-5825MHz	2412MHz-2462MHz
Tx Power	27 dbm	28 dbm
Data rate	MCS0	MCS0
Rx Sensibilidad	-96dBm	-96dBm
Tamaño	29.4 cm x 8 cm x 3cm	29.4 cm x 8 cm x 3cm
Peso	0,4kg	0,4kg
Máximo consumo	8W	8W
Alimentación	15 V, 0,8 A	24 V, 0,8 A
frecuencia Rango	4,9 - 5,9 Ghz	2.32-2.55 GHz
Ganancia	14,6 - 16,1db	10.4-11.2 dBi
Polarización	Doble	Doble
Hpol	43 deg	55 deg
Vpol	41 deg	53 dg
Elevación	15 deg	27dg

Fuente: Autor

b. DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

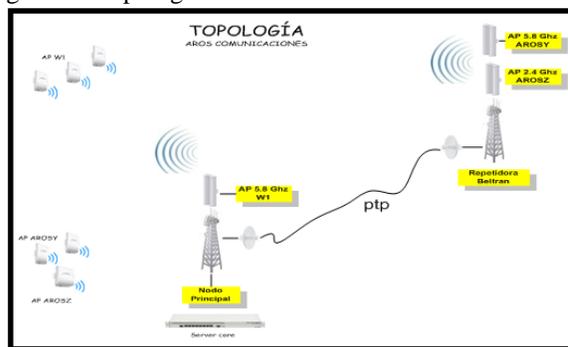
Actualmente en el mercado de las redes informáticas existen diferentes clases de software como lo son: IPERF, DITG, MGEN, entre otros, que brindan la posibilidad de generar tráfico artificial, simulando el comportamiento de determinados tipos de datos; sin embargo para el presente proyecto se decidió hacer las mediciones con tráfico real generado desde un servidor (ubicado en el nodo de distribución), donde se alojó un archivo para realizar las

respectivas pruebas de descarga con velocidad limitada únicamente por la capacidad del canal o medio de transmisión (medio inalámbrico).

Para establecer una comunicación inalámbrica de tipo infraestructura entre dos terminales, se requiere como mínimo un equipo que actúe como punto de acceso y los terminales correspondientes. En el caso de estudio se dispone de la infraestructura de la empresa AROS COMUNICACIONES LTDA para realizar las respectivas pruebas y mediciones [10].

El experimento consiste en conectar a determinada distancia un equipo terminal inalámbrico tipo CPE de prueba marca UBIQUITI, modelo NM2 ó NM5 (ver tabla 6) a los puntos de acceso existentes de la marca UBIQUITI, modelo ROCKET M2 ó M5 (ver tabla 4). El mecanismo de conexión entre el host (usuario) y el servidor se realiza con una arquitectura donde el terminal está configurado en modo estación-router y el punto de acceso en modo AP-Bridge actuando de forma transparente gracias al protocolo WDS (Wireless distribution system).

Figura 4. Topología AROS COMUNICACIONES LTDA



Fuente: Autor

Cada muestra experimental consiste en conectar un equipo CPE de prueba al punto de acceso correspondiente en los lugares ya definidos estratégicamente con las distancia establecidas; ya realizada la conexión se procede a iniciar la descarga del archivo alojado en el servidor, se toma la medida del tiempo desde que se inicia la descarga hasta que finaliza. Cada medición se toma del promedio de cinco repeticiones buscando una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

Para la medición del throughput se tomó como referencia la medición del tiempo total de la descarga del archivo y el tamaño del mismo; utilizando simplemente la ecuación tradicional para obtener el valor del parámetro deseado.

$$Thr = \frac{Long.Mensaje}{T.desc\ arg\ a}$$

En cuanto al retardo de transmisión, corresponde a la medición del mismo tiempo en segundos mencionado anteriormente.

Los factores y niveles considerados en el desarrollo del experimento se presentan en la siguiente tabla

Tabla 4. Factores y niveles

Factores	Niveles
Frecuencia de Operación	Una red de 2.4Ghz, Dos redes de 5.8Ghz
Distancia	40m, 1000m, 2500m
Cantidad de estaciones Activas	13, 16, 37 CPE

Fuente: Autor

En relación con los datos presentados en la tabla anterior, se elige un diseño factorial mixto de 2 x 3 x 3= 18 combinaciones de tratamientos o muestras experimentales. La cantidad de replicaciones del experimento es cinco (5), lo que representa un total de 18 x 5 = 90 mediciones para cada variable de salida o respuesta, datos suficientemente confiables para obtener resultados de los efectos de cada factor principal y cada una de sus interacciones.

c. TOMA DE DATOS

Los datos fueron tomados de tal forma que todas las estaciones vinculadas a los puntos de acceso son usuarios activos reales dentro de la red Aros Comunicaciones, que pudieron generar tráfico aleatorio en cualquier momento de la prueba, es importante destacar este aspecto ya que hablamos de un escenario real, lo cual supone mayor veracidad en los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos a partir de la experimentación se ilustran en las siguientes tablas:

Tabla 5. Matriz Diseño de Troughput y Retardo de Propagación

MATRIZ TROUGHPUT Mbps									
	13 CPE			16 CPE			37 CPE		
	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m
2.4GHz	0,0	0,0	0,0	19,3	14,7	17,9	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	18,9	14,7	15,4	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	17,2	18,9	17,1	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	17,7	12,8	19,0	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	22,7	14,3	18,3	0,0	0,0	0,0
5.8GHz	28,1	29,3	28,9	0,0	0,0	0,0	17,4	17,0	16,2
	31,0	32,2	30,5	0,0	0,0	0,0	16,5	19,2	14,6
	32,1	27,6	34,0	0,0	0,0	0,0	21,2	18,0	18,2
	25,6	26,5	25,0	0,0	0,0	0,0	20,4	21,6	14,0
	25,9	29,6	29,2	0,0	0,0	0,0	15,9	12,2	21,2
MATRIZ RETARDO DE TRANSMISIÓN Segundos									
z	13 CPE			16 CPE			37 CPE		
	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m
	0,0	0,0	0,0	76,8	101,5	83,2	0,0	0,0	0,0

	0,0	0,0	0,0	78,6	101,5	97,5	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	87,5	78,8	88,8	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	83,8	116,0	78,4	0,0	0,0	0,0
	0,0	0,0	0,0	65,5	103,6	81,1	0,0	0,0	0,0
5.8GHz	52,9	50,9	51,5	0,0	0,0	0,0	85,2	87,2	92,4
	48,2	46,2	48,8	0,0	0,0	0,0	91,8	78,6	102,6
	46,4	54,0	43,7	0,0	0,0	0,0	70,4	84,2	83,4
	58,1	56,7	59,7	0,0	0,0	0,0	73,8	68,9	107,0
	57,3	50,3	51,6	0,0	0,0	0,0	94,3	122,2	72,2

Fuente: Autor

En etapa de la experimentación cabe resaltar que la recolección de datos se toma a partir de la infraestructura existente y activa de Aros Comunicaciones; Por el mismo motivo se observan unos datos equivalentes a cero (0) o nulos. Estos datos nulos sencillamente corresponden a combinaciones de parámetros inexistentes en la infraestructura dispuesta.

III. RESULTADOS

Con la toma de datos obtenida anteriormente, se continuará con la elección de una técnica matemática estadística que permita inferir de manera confiable sobre el comportamiento de una red 802.11. Para este propósito se tomará como herramienta el análisis de varianza (ANOVA). En la presente investigación se estudia más de un factor en particular y la influencia que pueda tener el uno con el otro, teniendo en cuenta este tipo de condiciones es necesario realizar un diseño factorial [11].

En general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende que en cada ensaño o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en nivel del factor. (Montgomery, 2004, P. 170)

Modelo Estadístico y Análisis de Varianza para Troughput

El presente modelo es representado por un diseño factorial de tres (3) factores abc que modela el comportamiento de una respuesta o variable de salida Y que puede expresarse mediante: [3]

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \epsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b; k = 1, \dots, c; l = 1, \dots, n$$

- a = frecuencia de operación
- b = distancia
- c = Cantidad de CPE

N = Número de réplicas del experimento

Y_{ijkl} = Throughput para frecuencia de operación (i) a una distancia entre CPE Y AP (j), con un número de estaciones (k), para la replicación (l).

μ =Media general sin efectos de interacciones

A_i = efecto del i – ésimo nivel del factor A

B_j = efecto del j – ésimo nivel del factor B

C_k =Efecto del k – ésimo nivel del factor C

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Frecuencia y distancia

$(AC)_{ik}$ =Efecto de la interacción entre los factores frecuencia y cantidad de CPE

$(BC)_{jk}$ =Efecto de la interacción entre los factores distancia y cantidad de CPE

$(ABC)_{ijk}$ =Efecto de la interacción de los tres factores

ε_{ijkl} =Error aleatorio

Los efectos a estudiar en este caso de tres factores (abc) son A, B, C, AB, AC, BC y ABC; Además se debe tener en cuenta para el estudio los niveles utilizados para cada factor. En el presente caso se observan siete (7) interacciones, con las que se plantea siete (7) hipótesis nulas (H_0) cada una emparentada con una hipótesis alternativa (H_A). Las hipótesis a contemplar para los tres (3) factores y sus respectivas interacciones son:

- H_0 : Efecto A = 0, H_A : Efecto A \neq 0
- H_0 : Efecto B = 0, H_A : Efecto B \neq 0
- H_0 : Efecto C = 0, H_A : Efecto C \neq 0
- H_0 : Efecto AB = 0, H_A : Efecto AB \neq 0
- H_0 : Efecto AC = 0, H_A : Efecto AC \neq 0
- H_0 : Efecto BC = 0, H_A : Efecto BC \neq 0
- H_0 : Efecto ABC = 0, H_A : Efecto ABC \neq 0

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el CM correspondiente del efecto o la interacción por el CM_E . Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta:

Procedimiento de la experimentación:

Variable dependiente: THROUGHPUT

- Factores: (A) Frecuencia de operación
- (B) Distancia
- (C) Cantidad de CPE

Número de muestras experimentales: 90

Con el fin de comprender fácilmente los cálculos se recomienda presentar la información de los factores correspondientes para encontrar las SC.

Tabla 6. Efecto Troughput factor B

A	40	1000	2500
2.4	96,072	75,687	87,902
5.8	234,681	233,656	232,261
	330,753	309,343	320,163

Fuente: Autor

Tabla 7. Efecto Troughput factor C

	C		
A	13	16	37
2,4	0,000	259,661	0,000
5,8	436,253	0,000	264,344
	436,253	259,661	264,344

Fuente: Autor

Seguidamente se procederá a realizar los respectivos cálculos de análisis de varianza para Troughput, extrayendo los datos consignados en la tabla 7. La ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{922096,976}{90} = 10245,52196$$

Para realizar los cálculos de la suma de cuadrados (SC) se utilizará la siguiente expresión:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - FC$$

$$= 22140,44378 - 10245,52196$$

$$= 11894,92182$$

Tabla 1. Efecto Troughput factor A

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	25000 m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz	0,00	0,00	0,00	96,07	75,687	87,902
5,8GHz	143,02	145,40	147,83	0,00	0,000	0,000

	37 CPE			Totales
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	
2,4GHz	0,000	0,000	0,000	259,661
5,8GHz	91,659	88,256	84,429	700,598

Fuente: Autor

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bcn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(259,6612166)^2 + (700,5975902)^2}{45} - 10245,52196$$

$$SC_A = 2160,276506$$

Tabla 9. Efecto Troughput factor B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	96,072	75,687	87,902
5.8	234,681	233,656	232,261
	330,753	309,343	320,163

Fuente: Autor

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{j.}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(330,7525952)^2 + (309,3432518)^2 + (320,1629598)^2}{30} - 10245,52196$$

$$SC_B = 7,639627155$$

Tabla 10. Efecto Troughput factor C

	C		
A	13	16	37
2.4	0,000	259,661	0,000
5.8	436,253	0,000	264,344
	436,253	259,661	264,344

Fuente: Autor

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.k.}^2}{abn} - FC$$

$$SC_C = \frac{(436,253236)^2 + (259,6612166)^2 + (264,3443542)^2}{30} - 10245,52196$$

$$SC_C = 675,1037415$$

Tabla 2. Efecto Thoughtput interacción de factores A-B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	96,072	75,687	87,902
5.8	234,681	233,656	232,261

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{cn} - FC$$

$$SC_{Celdas(A-B)} = \frac{(96,071644)^2 + (75,6872004)^2 \dots + (232,260588)^2}{15} - 10245,52196 = 2174,50604$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 2174,50604 - 2160,276506 - 7,639627155 = 6,589903145$$

Tabla 12. Efecto Thoughtput interacción de factores A-C

	C		
A	13	16	37
2.4	0,000	259,661	0,000
5.8	436,253	0,000	264,344

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i.k.}^2}{bn} - FC$$

$$SC_{Celdas(A-C)} = \frac{(0)^2 + (259,6612166)^2 \dots + (264,344354)^2}{15} - 10245,52196 = 11595,7294$$

$$SC_{AC} = SC_{Celdas-AC} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{AC} = 11595,7294 - 2160,276506 - 675,1037415 = 8760,349191$$

Tabla 13. Efecto Thoughtput interacción de factores B-C

	C		
B	13	16	37
40	143,022	96,072	91,659
1000	145,400	75,687	88,256
2500	143,022	96,072	91,659

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.jk.}^2}{an} - FC$$

$$SC_{Celdas(B-C)} = \frac{(0143,0218974)^2 + (96,071644)^2 \dots + (84,4291094)^2}{10} - 10245,52196$$

$$SC_{Celdas(B-C)} = 699,926096$$

$$SC_{BC} = SC_{Celdas-BC} - SC_B - SC_C$$

$$SC_{BC} = 699,926096 - 7,639627155 - 675,1037415 = 17,18272718$$

Tabla 14. Efecto Thoughtput interacción de factores A-B-C

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	25000m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0,000	0,000	0,000	96,0	75,687	87,902
5,8GHz (A)	143,0	145,400	147,831	0,000	0,000	0,000

	37 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0,000	0,000	0,000
5,8GHz (A)	91,659	88,256	84,429

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk}^2}{n} - FC$$

$$SC_{celdas(A - B - C)} = \frac{(0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (096,071644)^2 \dots + (84,4291094)^2}{5} - 10245,52196$$

$$SC_{celdas(A - B - C)} = 11645,3741$$

$$SC_{ABC} = SC_{Celdas-ABC} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

$$SC(ABC) = 11645,3741 - 2160,276506 \dots - 17,18272718 = 18,23245119$$

La SC_E se determina por la siguiente expresión:

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{celdas-ABC}$$

$$SC_E = 11894,9218 - 11645,3741$$

$$SC_E = 249,5476723$$

En el siguiente cuadro se ilustra en análisis de varianza para Throughput:

Tabla 15. Anova para Throughput

fuelle de variacion	suma de cuadrados	grados de libertad	cuadrado medio	Fo	Valor P
Frecuencia (A)	346,497	1	346,497	623,290	0,000
Distancia (B)	4872,085	2	2436,042	1,100	0,338
#CPE (C)	5539,549	2	2769,774	97,390	0,000
AB	1820,369	2	910,185	0,950	0,391
AC	10574,129	2	5287,064	1263,780	0,000
BC	-4847,262	4	-1211,816	1,240	0,302
ABC	-1795,547	4	-448,887	1,320	0,273
Error	-4614,897	72	-64,096		
Total	11894,922	89			

Fuente: Autor

Tomando como referencia la tabla anterior, el efecto es significativamente estadístico cuando su P-Valor es menor al especificado para α , por lo que se sugiere tomar como

estadísticamente significativos los valores cuyo P-Valor menos a 0,05 (5%).

El ANOVA se fundamenta en la descomposición de la variación completa de los datos de la variable en cuestión (Throughput) con respecto a la media global (SCTot), debido a los factores que intervienen en el proceso o experimento

Ya que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los $p - value$ comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Teniendo en cuenta el análisis de varianza presentado anteriormente se identifican tres efectos con P-Valor menos a 0,05 (A,C, A-C). Estos factores muestran un efecto significativamente estadístico para throughput con un 95% de confianza, y que rechaza la hipótesis H_0 .

Verificación de los Supuestos del Modelo para Throughput

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Esto es, la respuesta (Y) se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre Y se traducen en supuestos sobre el término error (e) en el modelo [13].

La comprobación de los supuestos se puede hacer de forma analítica (matemática) o de forma gráfica, esta última, la más utilizada por su relativa sencillez. La forma gráfica no es del todo confiable, pero lo suficiente para que en situaciones reales muestre evidencias para aceptar o negar el supuesto.

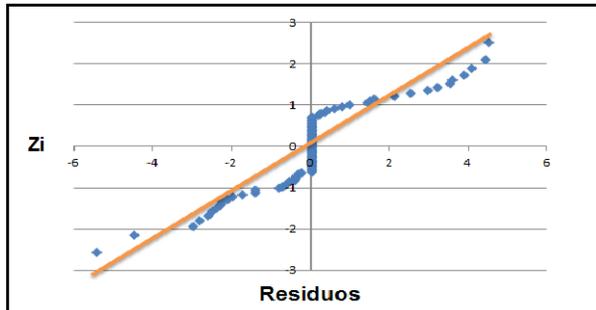
Para la negación se requiere un marcado efecto visual que soporte la decisión tomada.

Algunos puntos que se pudieran salir del comportamiento normal de un supuesto, no se deben considerar como condiciones extremas que vulneren el supuesto cuestionado. Estos casos pueden interpretarse como mediciones atípicas, ya que pueden afectar sensiblemente los análisis resultantes.

Supuesto de Normalidad

Un procedimiento gráfico para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos consiste en graficar los residuos en papel o en la gráfica de probabilidad normal que se incluye casi en todos los paquetes estadísticos [13].

Figura 5. Valores Residuales para throughput en papel ordinario



Fuente: Autor

Esta gráfica del tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a quedar alineados en una línea recta; por lo tanto, si claramente no se alinean se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto.

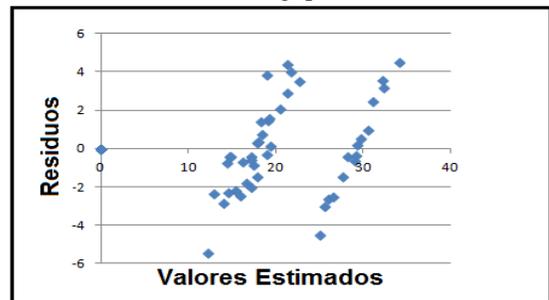
Cabe enfatizar el hecho de que el ajuste de los puntos a una recta no tiene que ser perfecto, dado que el análisis de varianza resiste pequeñas y moderadas desviaciones al supuesto de normalidad.

En la figura 5, correspondiente a la gráfica de probabilidad, se observa que algunos residuos no se ajustan de forma adecuada a la recta graficada; lo que no impide el cumplimiento del supuesto de normalidad ya que estos datos pueden considerarse como atípicos sin llegar sensibles en la consideración.

Supuesto de Varianza Constante

Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos (\hat{Y}_{ij} vs ϵ_{ij}). Generalmente, \hat{Y}_{ij} va en el eje X (horizontal) y los residuos en el eje vertical. Si los puntos de la gráfica de residuos contra los estimados se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, sin ningún patrón claro y contundente, entonces es señal de que cumple con el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como por ejemplo una corneta o un embudo, entonces es señal de que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. En particular, la parte estrecha del embudo indica que en esos niveles estimados para la variable respuesta, se espera una menor variabilidad, por lo que se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o a minimizar el resultado deseado [14].

Figura 6. Valores residuales vs valores estimados para throughput



Fuente: Autor

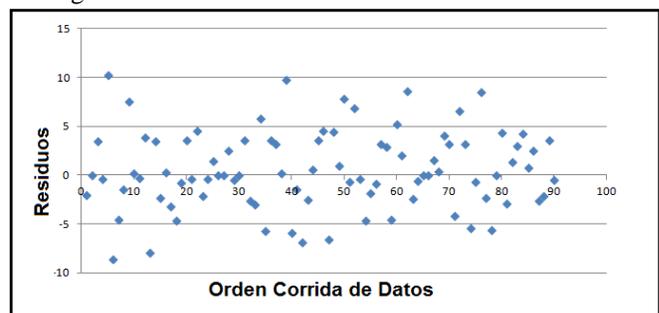
En la figura anterior, se observa que el supuesto de varianza constante en el que se grafica los valores residuales vs valores estimados es cumplido, teniendo como referencia los criterios puntualizados anteriormente donde indica un comportamiento sin un patrón claro en los datos graficados.

Supuesto de Independencia

La suposición de independencia en los residuos puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, si al graficar en el eje horizontal el tiempo (orden de corrida) y en el eje vertical los residuos, se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, esto es evidencia de que existe una correlación entre los errores y, por lo tanto, el supuesto de independencia no se cumple. Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de una banda horizontal, el supuesto se está cumpliendo.

En la siguiente figura, se puede ver que los valores residuales se encuentran distribuidos de forma aleatoria sobre la franja horizontal. Esto indica que el supuesto de independencia es cumplido teniendo en cuenta los criterios definidos.

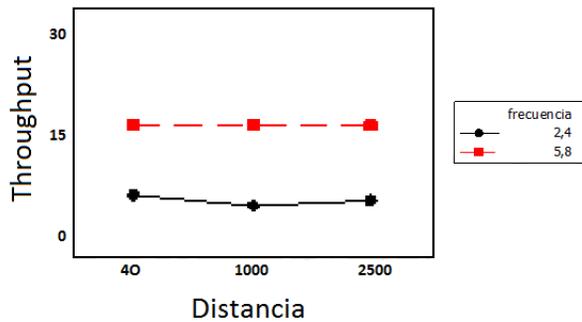
Figura 2. Residuos vs el Orden en la toma de datos



Fuente: Autor

a. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS ACTIVOS

Figura 8. Interacción entre distancia y frecuencia

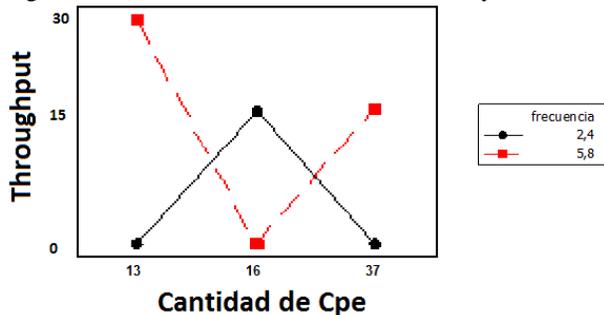


Fuente: Autor

Mediante el software estadístico Minitab, se realizó el análisis multifactorial de varianza tipo ANOVA para Throughput, el cual permite obtener resultados y gráficos que se prestan para determinar los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo en la variable de salida determinada.

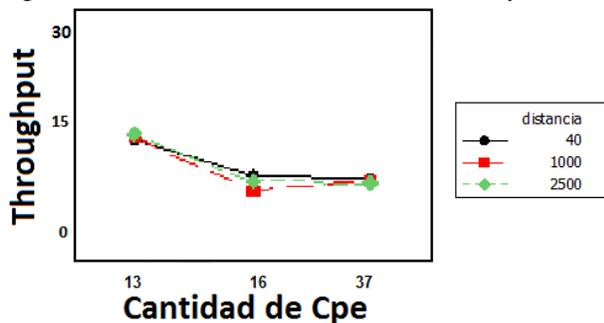
En la figura 8 se puede observar una baja relevancia entre el factor distancia y frecuencia de operación, ya que las líneas describen una forma paralela entre sí. Por otra parte, se evidencia que la pendiente de las rectas es prácticamente cero, demostrando la falta influencia entre el valor distancia y el throughput para las condiciones planteadas en el caso de estudio.

Figura 9. Interacción entre Cantidad de CPE y frecuencia



Fuente: Autor

Figura 10. Interacción Entre Cantidad De CPE y distancia



Fuente: Autor

Observando la figura 9 y teniendo en cuenta las mediciones registradas se puede analizar una interacción bastante marcada pues las curvas mostradas presentan formas totalmente diferentes.

En la figura 10 se evidencia de manera visual una muy poca importancia de la interacción entre la cantidad de CPE y la distancia existente en la red, debido a que las líneas se encuentran casi paralelas entre sí. Por otro lado se observa una disminución considerable del throughput cuando aumenta la cantidad de CPE de 13 a 16 unidades en todas las distancias; además se observa que la disminución del throughput después de 16 CPE continua pero de forma menos abrupta.

Análisis de Varianza para Retardo de Propagación

En esta sección se desarrollara el modelo estadístico, ANOVA y verificación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable de salida Retardo de Transmisión.

Tal como se presentó en el modelo para Throughput, se utilizará un diseño factorial de tres (3) factores abc.

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, \dots, a; j = 1 \dots b; k = 1 \dots c; l = 1 \dots n$$

a = frecuencia de operación

b = distancia

c = Cantidad de CPE

N = Número de réplicas del experimento

Y_{ijkl} = Retardo de Transmisión para frecuencia de operación (i) a una distancia entre CPE Y AP (j), con un número de estaciones (k), para la replicación (l).

μ =Media general sin efectos de interacciones

A_i = efecto del i – ésimo nivel del factor A

B_j = efecto del i – ésimo nivel del factor B

C_k =Efecto del i – ésimo nivel del factor C

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Frecuencia y distancia

$(AC)_{ik}$ =Efecto de la interacción entre los factores frecuencia y cantidad de CPE

$(BC)_{jk}$ =Efecto de la interacción entre los factores distancia y cantidad de CPE

$(ABC)_{ijk}$ =Efecto de la interacción de los tres factores

ε_{ijkl} =Error aleatorio

Los efectos a estudiar en este caso de tres factores (abc) son A, B, C, AB, AC, BC y ABC; Además se debe tener en cuenta para el estudio los niveles utilizados para cada factor. En el represente caso se observan siete (7) interacciones, con las que se plantea siete (7) hipótesis

nulas (H_0) cada una emparentada con una hipótesis alternativa (H_A).

Las hipótesis a contemplar para los tres (3) factores y sus respectivas interacciones son:

- H_0 : Efecto A = 0, H_A : Efecto A \neq 0
- H_0 : Efecto B = 0, H_A : Efecto B \neq 0
- H_0 : Efecto C = 0, H_A : Efecto C \neq 0
- H_0 : Efecto AB = 0, H_A : Efecto AB \neq 0
- H_0 : Efecto AC = 0, H_A : Efecto AC \neq 0
- H_0 : Efecto BC = 0, H_A : Efecto BC \neq 0
- H_0 : Efecto ABC = 0, H_A : Efecto ABC \neq 0

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el CM correspondiente del efecto o la interacción por el CM_E . Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta. [4]

Procedimiento de la experimentación:
 Variable dependiente: RETARDO DE PROPAGACIÓN
 Factores: (A) Frecuencia de operación
 (B) Distancia
 (C) Cantidad de CPE

Número de muestras experimentales: 90

Con el fin de comprender fácilmente los cálculos se recomienda presentar la información de los factores correspondientes para encontrar las SC.

Tabla 3. Efecto Retardo de Propagación factor B

A X B			
	B		
A	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332
	1071,224	1201,236	1142,644

Fuente: Autor

Tabla 17. Efecto Retardo de Propagación factor C

A X C			
	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788
	776,952	1323,364	1314,788

Fuente: Autor

Seguidamente se procederá a realizar los respectivos cálculos de análisis de varianza para Troughput, extrayendo los datos consignados en la tabla 7.

La ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) es:

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

$$FC = \frac{Y^2}{abcn} = \frac{11662935,3}{90} = 129588,17$$

Para realizar los cálculos de la suma de cuadrados (SC) se utilizará la siguiente expresión:

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - FC$$

$$= 278092,562 - 129588,17$$

$$= 148504,392$$

Tabla 18. Efecto Retardo de Propagación factor A

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	392,458	501,594	0
5,8GHz (A)	263,1	258,228	255,564	0	0	263,16

	37 CPE			Totales
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	
2,4GHz (A)	429,312	0	0	1323,364
5,8GHz (A)	0	415,606	441,414	2091,74

Fuente: Autor

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bcn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(1323,364)^2 + (2091,74)^2}{45} - 129588,17$$

$$SC_A = 6560,01864$$

Tabla 19. Efecto Retardo de Propagación factor B

A X B			
	B		
A	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332
	1071,224	1201,236	1142,644

Fuente: Autor

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{j.}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(1071,224)^2 + (1201,236)^2 + (1142,644)^2}{30} - 129588,17$$

$$SC_B = 282,632878$$

Tabla 40. Efecto Retardo de Propagación factor C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788
	776,952	1323,364	1314,788

Fuente: Autor

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.k.}^2}{abn} - FC$$

$$SC_C = \frac{(776,952)^2 + (1323,364)^2 + (1314,788)^2}{30} - 129588,17$$

$$SC_C = 6532,30205$$

Tabla 5. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B

A	B		
	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{cn} - FC$$

$$SC_{celdas(A-B)} = \frac{(392,458)^2 + (501,594)^2 \dots + (713,332)^2}{15} - 129588,17 = 7011,3876$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 7011,3876 - 6560,01864 - 282,632878 = 168,736081$$

Tabla 6. 24 Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i.k.}^2}{bn} - FC$$

$$SC_{celdas(A-C)} = \frac{(0)^2 + (1323,364)^2 \dots + (1314,788)^2}{15} - 129588,17 = 142652,774$$

$$SC_{AC} = SC_{Celdas-AC} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{AC} = 142652,774 - 6560,01864 - 6532,30205 = 129560,454$$

Tabla 7. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores B-C

	C		
B	13	16	37
40	263,16	392,458	415,606
1000	258,228	501,594	441,414
2500	255,564	429,312	457,768

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.jk.}^2}{an} - FC$$

$$SC_{celdas(B-C)} = \frac{(263,16)^2 + (392,458)^2 \dots + (457,768)^2}{10} - 129588,17$$

$$SC_{celdas(B-C)} = 7242,09647$$

$$SC_{BC} = SC_{Celdas-BC} - SC_B - SC_C$$

$$SC_{BC} = 7242,09647 - 282,632878 - 6532,30205 = 427,161539$$

Tabla 84. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B-C

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	392,458	501,594	429,312
5,8GHz (A)	263,1	258,228	255,564	0	0	0

	37 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0
5,8GHz (A)	415,606	441,414	457,768

Fuente: Autor

$$SC_{Celdas-ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk.}^2}{n} - FC$$

$$SC_{celdas}(A - B - C) = \frac{(0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (392,458)^2 \dots + (457,768)^2}{5} - 129588,17$$

$$SC_{celdas}(A - B - C) = 144072,363$$

$$SC_{ABC} = SC_{celdas-ABC} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

$$SC(ABC) = 144072,363 - 6560,01864 \dots - 427,161539 = 541,058335$$

La SC_E se determina por la siguiente expresión:

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{celdas-ABC}$$

$$SC_E = 148504,392 - 144072,363$$

$$SC_E = 4432,02866$$

En el siguiente cuadro se ilustra en análisis de varianza para Retardo de Transmisión:

Tabla 9. ANOVA para Retardo de Propagación

Fuente de variación	Suma de cuadrados	grados de libertad	cuadrado medio	fo	valor p
Frecuencia (A)	6560,019	1	6560,019	106,570	0,000
Distancia (B)	282,633	2	141,316	2,300	0,108
#CPE (C)	6532,302	2	3266,151	53,060	0,000
AB	168,736	2	84,368	1,370	0,261
AC	129560,454	2	64780,227	1052,380	0,000
BC	427,162	4	106,790	1,730	0,152
ABC	541,058	4	135,265	2,200	0,078
Error	4432,029	72	61,556		
Total	148504,392	89			

Fuente: Autor

Tomando como referencia la tabla anterior, el efecto es significativamente estadístico cuando su P-Valor es menor al especificado para α , por lo que se sugiere tomar como estadísticamente significativos los valores cuyo P-Valor menos a 0,05 (5%).

El ANOVA se fundamenta en la descomposición de la variación completa de los datos de la variable en cuestión (Throughput) con respecto a la media global (SCTot), debido a los factores que intervienen en el proceso o experimento.

Ya que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los p – value comprueba la importancia estadística de cada uno de los factores. Teniendo en cuenta el análisis de varianza presentado anteriormente se identifican tres efectos con P-Valor menos a 0,05 (A,C, A-C). Estos factores muestran un efecto significativamente estadístico

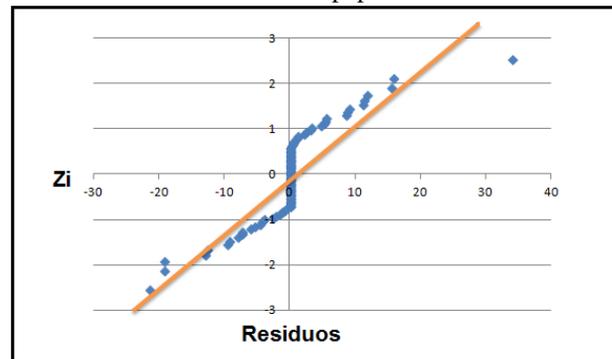
para throughput con un 95% de confianza, y que rechaza la hipótesis H_0 .

IV. VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DEL MODELO PAR RETARDO DE PROPAGACIÓN

A continuación se presentan gráficamente los tres (3) supuestos que dan veracidad al desarrollo del análisis ANOVA para la variable de salida Retardo de Transmisión:

Supuesto de Normalidad

Figura 11. Valores Residuales para Retardo de Transmisión en papel ordinario



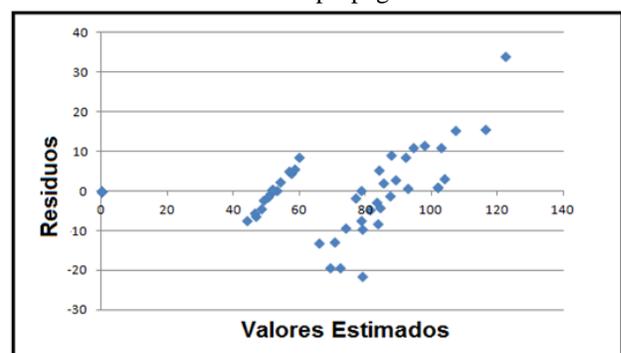
Fuente: Autor

En la gráfica anterior, se observa claramente que se cumple con el supuesto de normalidad teniendo en cuenta que los datos de los residuos están ubicados sobre una línea de referencia.

Supuesto de Varianza Constante

En la figura anterior, se observa que el supuesto de varianza constante en el que se grafica los valores residuales vs valores estimados es cumplido, teniendo como referencia los criterios puntualizados anteriormente donde indica un comportamiento sin un patrón claro en los datos graficados.

Figura 12. Valores residuales vs Valores estimados para retardo de propagación

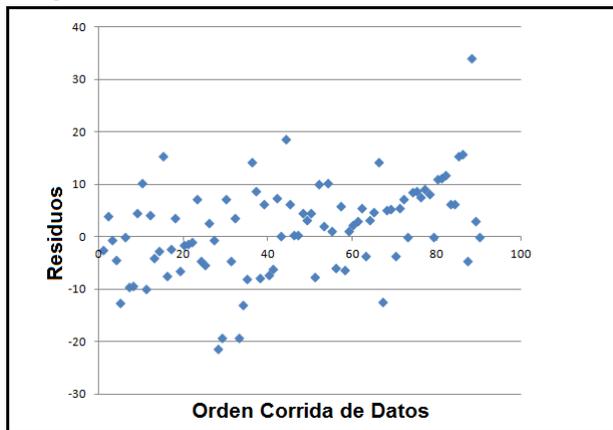


Fuente: Autor

Supuesto de Independencia

En la siguiente figura, el comportamiento de los puntos dentro de la banda horizontal es aleatorio, es decir no presenta un patrón claro, lo que indica que el supuesto de independencia es cumplido. Se demuestra con esto, que la experimentación es planeada, ejecutada y aleatorizada correctamente.

Figura 13. Residuos Vs el Orden en la Toma de Datos

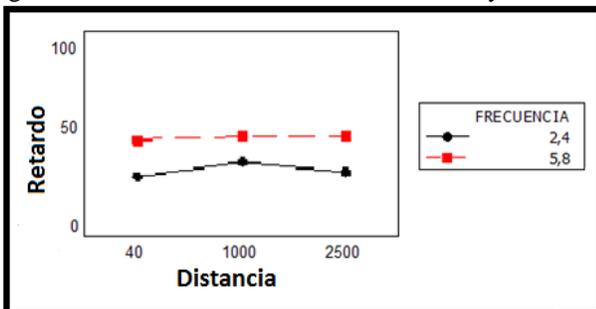


Fuente: Autor

V. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS ACTIVOS PARA RETARDO DE PROPAGACIÓN

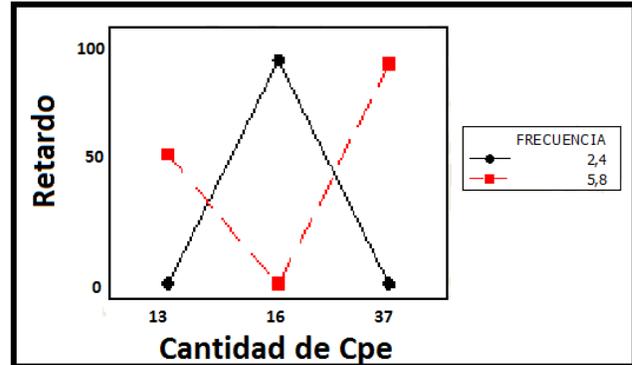
En la figura 14 se puede observar una baja relevancia entre el factor distancia y frecuencia de operación, ya que las líneas describen una forma paralela entre sí. Por otra parte, se evidencia que la pendiente de las rectas es prácticamente cero, demostrando la falta influencia entre el valor distancia y el throughput para las condiciones planteadas en el caso de estudio.

Figura 14. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia



Fuente: Autor

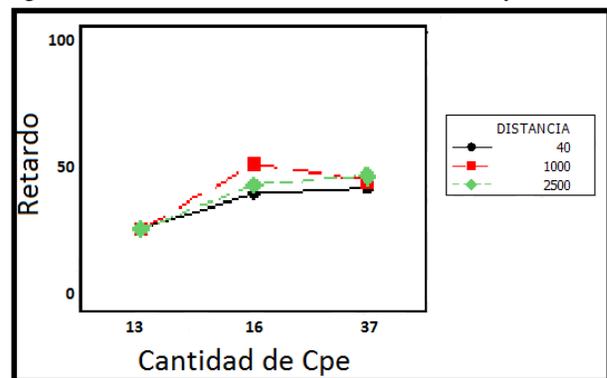
Figura 15. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia



Fuente: Autor

Observando la figura 15 y teniendo en cuenta las mediciones registradas se puede analizar una interacción bastante marcada pues las curvas mostradas presentan formas totalmente diferentes.

Figura 16. Interacción entre cantidad de CPEs y Distancia



Fuente: Autor

Al observar la figura se deduce el poco aporte que tiene la interacción de cantidad de CPEs y la Distancia, dado que las gráficas tiene la tendencia a una forma paralela. Se evidencia un aumento considerable en el retardo cuando crecen la cantidad de CPEs de trece (13) unidades a diez y seis (16) unidades; al aumentar la cantidad de CPEs a treinta y siete (37) unidades el retardo disminuye levemente, prácticamente manteniendo su promedio en las condiciones del sistema en estudio.

VI. CONCLUSIONES

Los sistemas de comunicación que operan bajo el estándar 802.11 han alcanzado altas tasas de transferencia, convirtiéndose en una alternativa para las diferentes aplicaciones en redes de datos. Entre los estándares 802.11 es importante resaltar los estándares 802.11n y el 802.11ac en actual auge, logrando altas velocidades de transmisión. El contexto del presente trabajo se enmarca en una red tipo infraestructura con evolución 802.11n la cual alcanza

velocidades de transmisión de hasta 40Mbps como se observa en la tabla 8.

Las mediciones efectuadas en el experimento resaltan mayores niveles de throughput para frecuencias de 5.8GHz en relación con las de 2.4GHz. Actualmente la alta proliferación de dispositivos de redes de datos y otros, operando en frecuencias de 2.4GHz genera altos niveles de interferencia lo que produce reducción en las tasas de transferencia de información. Para el caso particular, en la figura 21 se observan diferencias amplias para las dos frecuencias de la variable en mención.

Los resultados de la investigación muestran un comportamiento con poca variabilidad en las mediciones de throughput cuando se aumentan las distancias. El estándar 802.11 referencia en sus teorías distancias que sólo llegarían a alcanzar unos cientos de metros, pero los fabricantes han desarrollado dispositivos con tecnologías propietarias capaces de llegar incluso a decenas de kilómetros. Este comportamiento se evidencia en la tabla 18 donde se observa que la distancia (factor B) no es estadísticamente significativa en el modelo.

En todo modelo de diseño experimental es necesario crear inferencias sobre factores, variables y otros parámetros que en conjunto actúen en función del desarrollo y análisis de la investigación. El análisis de varianza ANOVA plasma en sus resultados los efectos individuales e interacciones estadísticamente significativas. Para el Throughput, la evaluación muestra efectos estadísticamente significativos en los factores A y C, además de la interacción entre ellos (AC). En el caso del Retardo de Propagación se observa también que los factores A, C y la interacción entre ellos (AC) son los efectos estadísticamente significativos.

Se observó una disminución de throughput a medida que aumenta la cantidad de CPE's conectados pero con tendencia a estabilización en determinado momento. Este fenómeno es de esperarse pues a más equipos conectados a un punto de acceso AP genera un acceso al medio más competido y en algunos casos saturación en los canales de transmisión. La figura 23 muestra una disminución fuerte entre los 13 y 16 CPE's conectados pero que se suaviza posteriormente; además se deduce que la interacción entre cantidad de CPE's y distancia no es estadísticamente significativa.

Los efectos estadísticamente significativos para el retardo de propagación en el estudio resultaron ser similares a los del throughput. Esta característica puede ser explicada pues son dos variables directamente relacionadas. La figura de interacción entre distancia y frecuencia muestra tiempos estables en la transmisión en las dos frecuencias sin importar las distancias; en la figura de interacción entre cantidad de CPE's y distancia, se representan tiempos más altos a medida que aumenta la cantidad de CPE's pero siendo más fuerte esta tendencia entre 13 y 16 CPE's conectados.

En el desarrollo de diseños experimentales en los cuales se utilice el análisis de varianza ANOVA como herramienta, es necesario comprobar la veracidad de los resultados obtenidos. La validez del ANOVA queda supeditada a los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia. En la presente investigación de rendimiento para una red inalámbrica operando bajo el estándar 802.11 se comprobaron los supuestos del modelo para Throughput y Retardo de Transmisión, garantizando con el análisis de gráficos residuales una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante.

REFERENCIAS

- [1] H. N. Roa Marín, "Análisis y optimización de la infraestructura de un proveedor de servicios de internet inalámbrico, que utiliza la tecnología WLAN para clientes corporativos," 2005.
- [2] K. Ahmavaara, H. Haverinen, and R. Pichna, "Integration of wireless LAN and 3G wireless - Interworking architecture between 3GPP and WLAN systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 41, no. 11, pp. 74–81, Nov. 2003.
- [3] M. Soleymani, B. Maham, and F. Ashtiani, "Analysis of the downlink saturation throughput of an asymmetric IEEE 802.11n-based WLAN," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, pp. 1–6.
- [4] F. Tramarin, S. Vitturi, M. Luvisotto, and A. Zanella, "On the Use of IEEE 802.11n for Industrial Communications," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 12, no. 5, pp. 1877–1886, Oct. 2016.
- [5] J. Trachewsky *et al.*, "A 2×2 MIMO baseband for high-throughput wireless local-area networking (802.11n)," in *2007 IEEE Hot Chips 19 Symposium (HCS)*, 2007, pp. 1–14.
- [6] M. Juutilainen, J. Ikonen, and J. Porras, "Evaluation of a next generation public wireless multi-ISP network," in *27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks, 2002. Proceedings. LCN 2002.*, pp. 405–414.
- [7] J. C. Salazar and A. B. Zapata, "Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación analysis and design of experiments applied to simulation studies," vol. 159, pp. 249–257, 2009.
- [8] C. L. Barrett, M. Drozda, A. Marathe, and M. V. Marathe, "Analyzing interaction between network protocols, topology and traffic in wireless radio networks," in *2003 IEEE Wireless Communications and Networking, 2003. WCNC 2003.*, vol. 3, pp. 1760–1766.
- [9] W. A. Syafei, "Implementation of K-Best method for MIMO decoder in WLAN 802.11n," in *2015 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, 2015, pp. 417–421.
- [10] D. Gong and Y. Yang, "Link-Layer Multicast in

- Large-Scale 802.11n Wireless LANs with Smart Antennas,” *IEEE Trans. Comput.*, vol. 65, no. 7, pp. 2118–2133, Jul. 2015.
- [11] L. A. Herrera S, “Análisis de la Varianza de un Grupo de Experimentos en Parcelas Subdivididas,” *Rev. la Fac. Ciencias Vet.*, vol. 52, no. 1, pp. 59–72, 2011.
- [12] W. Moreno, *Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos*. Bucaramanga, 2002.
- [13] V. D. Sousa, M. Driessnack, I. Amélia, C. Mendes, and A. De Atualização, “Revisión de diseños de investigación resaltantes para enfermería. parte 1: diseños de investigación cuantitativa revisão dos desenhos de pesquisa relevantes para enfermagem: parte 1: desenhos de pesquisa quantitativa,” vol. 15, no. 3.
- [14] G. B. P. Del Cañizo López JF, López Martín D, Lledó García E, “Diseño de modelos experimentales en investigación quirúrgica,” *Actas Urol Esp*, vol. 32, no. 1, pp. 27–40, 2008.

BIOGRAFÍA

Sergio Andrés Ardila Osorio. Ingeniero en Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás Bucaramanga y Magister en Telemática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Actualmente es Docente y Fundador de la empresa de Telecomunicaciones AROS ubicada en Cimitarra - Santander.

Miguel Alonso Ardila Osorio. Ingeniero en Telecomunicaciones de la Universidad Santo Tomás Bucaramanga y Magister en Telemática de la Universidad Autónoma de Bucaramanga. Actualmente es el representante legal y Fundador de la empresa de Telecomunicaciones AROS ubicada en Cimitarra - Santander.