



## Self-Similar Traffic Analysis at Network Layer Level. Part II: Application

---

Ginno Millán

EasyChair preprints are intended for rapid dissemination of research results and are integrated with the rest of EasyChair.

March 31, 2021

# Análisis de Tráfico Autosimilar a Nivel de Capa de Red. Parte II: Aplicación

## Self-similar Traffic Analysis at Network Layer Level. Part II: Application

Ginno Millán Naveas<sup>1</sup>

### RESUMEN

En un trabajo previo se ha propuesto y confirmado teóricamente que el análisis de los flujos de tráfico autosimilares con dependencia de largo alcance puede ser acotado a la capa de red. En este trabajo se aplica este nuevo concepto al estudio del tráfico registrado en un entorno de red IEEE 802.3u con el objetivo de demostrar su validez como una herramienta simple y eficiente para el análisis de los flujos de tráfico en redes de computadoras alta velocidad.

Palabras clave: Autosimilaridad, capa de red, dependencia de largo alcance, modelos de tráfico, red IEEE 802.3u.

### ABSTRACT

*In previous work has been proposed, and theoretically confirmed, that the self-similar with long-range dependence traffic flows may be limited to the network layer. In this paper applies this novel concept to the study of traffic recorded in an IEEE 802.3u network environment with the aim to prove their validity as a simply and efficient tool for high speed computer network traffic flows analysis.*

*Keywords: Self-similarity, network layer, long-range-dependent, traffic models, IEEE 802.3u computer network.*

### INTRODUCCIÓN

Resulta interesante reflexionar sobre la idea de que un proceso puramente aleatorio no es más que un concepto teórico, pero resulta mucho más interesante el hacerlo considerando que no se conoce, aún, serie alguna cuyas características se correspondan exactamente con las de dichos procesos. De igual forma resulta explicar que una determinada singularidad evolutiva de comportamiento sea atribuible a dos procesos estocásticos estacionarios en sentido amplio sin considerar sus orígenes, alcances e implicancias.

Para clarificar las dos afirmaciones anteriores, en [1] se encuentra una exhaustiva recopilación de antecedentes que comprende desde propuestas de investigaciones y sus resultados, hasta los fundamentos matemáticos que a todas ellas subyacen. Sin embargo, resulta inconclusa una idea básica: si todos los argumentos entregados no hacen otra cosa que realzar las bondades y ventajas del modelado parsimonioso de los flujos de tráfico en los actuales entornos de redes de alta velocidad, entonces, ¿porqué razón existe disenso sobre su uso?, y más importante aun, ¿porqué todos los resultados tratan a la autosimilaridad como ubicua no tan solo a las escalas temporales, hecho que por su puesto no se encuentra bajo tela de juicio alguna, sino que también al conjunto de circunstancias atribuibles a su origen?.

Con el objetivo de dar respuesta a estas interrogantes, en la misma investigación se plantea, y luego fundamenta la validez de la hipótesis de trabajo siguiente:

*“Es completamente factible acotar la evolución de un proceso estadísticamente autosimilar a un entorno de aplicación bien definido sin alterar su naturaleza y sus propiedades más relevantes, realzando con ello la validez de sus postulados y añadiendo una mayor plausibilidad a su interpretación física”*

aclarándose que la plausibilidad se refiere a la acción de conferir un carácter de admisible, luego atendible, a uno o varios parámetros componentes de un modelo analítico, cuyas interpretaciones no tan solo son idealizaciones de tipo matemático, y que la comprobación teórica de dicha hipótesis se basa fundamentalmente en la propuesta de Ryu y Lowen [2], consistente en realizar una distinción entre la autosimilitud observada en el nivel de aplicación y la autosimilitud observada en el nivel de red, pero con la sustancial diferencia de no considerar ningún modelo de tráfico particular como en el caso de los autores, en el cual la propuesta se elabora para avalar los análisis de los resultados obtenidos del empleo del modelo de procesos fractales puntuales (FPP), propuesto en [3], para realizar la caracterización de los flujos de tráfico en redes de alta velocidad. Conviene precisar que la propuesta original de Ryu y Lowen consiste en establecer una diferencia

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Santiago de Chile. Santiago, Chile. E-mail: ginno.millan@usach.cl

con base en el nivel OSI en el que se encuentra la fuente que origina los flujos de tráfico en los cuales se observa la autosimilitud, y que, por lo tanto, explica su origen. De esta manera, los autores concluyen que resulta más adecuado referirse a tráfico fractal de nivel de aplicación y tráfico fractal de nivel de red, en vez de englobar en la frase tráfico fractal toda una gama de comportamientos disímiles que encuentran sus explicaciones precisamente en los procesos internos inherentes a cada uno de estos niveles. Luego, resulta claro que esta división del tráfico fractal en estas dos subcategorías atiende efectivamente a las profundas diferencias existentes tanto en el diseño como en los procesos de control de las actuales redes de alta velocidad a estos niveles.

Concretamente, el tráfico autosimilar (fractal) de nivel de aplicación tiene su origen en una fuente que exhibe autosimilitud en un amplio rango de escalas de tiempo y de frecuencia sin que existan interacciones con la red, en otras palabras la autosimilaridad es inherente a la fuente, mientras que el tráfico autosimilar (fractal) de nivel de red, en contraste, exhibe autosimilaridad en un amplio rango de escalas de tiempo y frecuencia como resultado de numerosas interacciones con la red. Un ejemplo de fuente de tráfico autosimilar de nivel de aplicación es la secuencia de video VBR de [4], mientras que todas las aplicaciones basadas en TCP de [5]-[8] son ejemplos de fuentes de tráfico autosimilar de nivel de red. Conviene acotar que, en rigor, el comportamiento de una fuente de tráfico de nivel de aplicación puede ser afectado por las condiciones de red dependiendo de las funcionalidades de los protocolos de bajo nivel empleados. Sin embargo, este efecto es insignificante en comparación con lo que ocurre con una fuente de tráfico de nivel de red, como un cliente FTP, en idénticas condiciones, donde la razón del flujo de datos de salida con respecto al de entrada depende directa y críticamente de las condiciones de la red y en gran medida puede considerarse independiente de los tamaños de los archivos [9]. Así mismo, el tráfico autosimilar de nivel de aplicación puede ser gestionado en el contexto del control de admisión de asignación de recursos sometido a garantías de calidad de servicio, por cuanto es independiente de las condiciones de red en las que se envía.

En este trabajo se presenta una aplicación experimental que valida la hipótesis de [1]. Considerando un escenario real de red implementado bajo el estándar IEEE 802.3u, se desarrollan experimentos de captura de tráfico y su posterior análisis, restringiendo los resultados según los preceptos expuestos tanto anteriormente como en [1]. De esta forma este trabajo se centra en demostrar la validez del análisis de tráfico autosimilar restringido al nivel de capa de red como una herramienta simple y eficiente para estudiar el comportamiento de los flujos de tráfico en las actuales redes de computadoras alta velocidad.

## MEDICIONES DE TRÁFICO

### Descripción del entorno de red

En la Figura 1 se muestra el diagrama de la topología del escenario de red experimental implementado, mientras que la Figura 2 se muestra su diagrama de conexiones. Se trata de un entorno LAN IEEE 802.3u que posee las siguientes características operacionales principales:

- Diez estaciones de trabajo que ininterrumpidamente solicitan un servicio de video bajo demanda desde el equipo servidor de video dispuesto para ello. Tanto los equipos clientes como el servidor hacen uso de la aplicación VLC® Media Player para este efecto. La reproducción continua se logra predefiniendo una programación de videos en el equipo servidor, la que se exporta luego a cada equipo cliente de forma que los usuarios puedan realizar su selección. Se trata de una característica de la aplicación VLC®.
- Las diez estaciones mantienen un archivo XML con el índice de páginas del servidor web. El estado de la actualización del índice de páginas es consultado de forma aleatoria por cada una de las estaciones con el objetivo de siempre disponer de última versión del archivo.
- El equipo monitor de red (rotulado como “Sniffer en la Figura 2) dispone de la aplicación Ethereal® para realizar las capturas de paquetes de tráfico.
- Las funciones de acceso a Internet para efectos de actualización tanto de sistemas operativos como de aplicaciones antivirus se encuentran habilitadas y automatizadas en todos los equipos de la red.
- Las estaciones de trabajo emplean Windows® XP Professional como sistema operativo, mientras que los servidores Windows® 2003 Server, mientras que el equipo monitor de red emplea Mandriva® Linux 2008. 1 Spring.

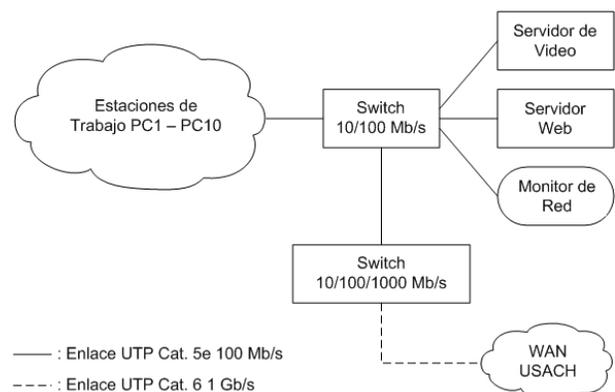


Figura 1. Disposición topológica de la red experimental.

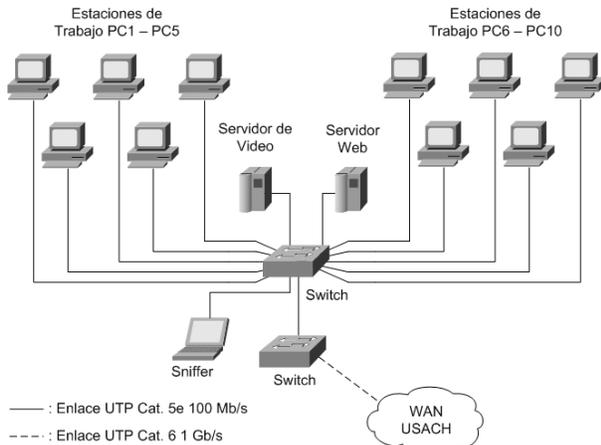


Figura 2. Conexión de la red experimental.

### Metodología de trabajo

El procedimiento seguido para realizar la experiencia consta de los pasos siguientes, listados en atención a su orden de ejecución:

- Programar los algoritmos para estimar los valores y estudiar el comportamiento del parámetro de Hurst, de los análisis Varianza-Tiempo, R/S y de densidad espectral. Todos los programas se desarrollan sobre Matlab debido a su disponibilidad.
- Comprobar la correcta operación de los algoritmos programados. Para realizar esta operación se utiliza la serie normalizada de muestras de tráfico de [5], BC-pAug89.TL, disponible para su descarga en [10], y luego se comparan los valores obtenidos con los reportados por los autores.
- Capturar tráfico de la red experimental mostrada en la Figura 2. Cabe señalar que la duración de cada uno de los períodos de captura de tráfico se rige tan solo por un criterio de disponibilidad de capacidad para almacenamiento en el equipo Sniffer, buscando la captura de la mayor cantidad posible de muestras para enfrentar un posible escenario de decisión basado en una cifra de mérito proveniente de la relación sesgo versus varianza.
- Empleando las capacidades de la aplicación Ethereal se realiza el filtraje de los paquetes capturados de forma tal de crear series temporales de datos que contengan las longitudes de paquetes y los tiempos de arribo de cada uno de ellos. Estas series son luego almacenadas en archivos de texto plano.
- Aplicar los análisis Varianza-Tiempo y R/S sobre las series de datos creadas según lo especificado en el punto anterior.

### Simulaciones

En la Tabla 1 se muestra el detalle de las tramas Ethernet capturadas. Al respecto las siguientes apreciaciones son necesarias:

- La resolución temporal de los tiempos de arribos que son registrados por el equipo Sniffer se establece en microsegundos. Esta resolución es entregada como medida por defecto por la aplicación Ethereal®. Se sugiere la existencia de fluctuaciones de tiempo que no son consideradas como las debidas a la latencia de los circuitos de la tarjeta de red del equipo y las debidas al tiempo de procesamiento del código por parte del equipo. Sin embargo, y no obstante el gran impacto que ambas pueden llegar a tener sobre los tiempos de registro finalmente apuntados, se opta por considerarlas anomalías propias de los sistemas de procesamiento de datos, y por lo tanto forman parte de sus comportamientos.
- Las capturas individuales presentan una resolución temporal de 6  $\mu$ s. Siendo este el valor promedio que se registró.
- Los conjuntos de datos traza-1 a traza-4 contienen los datos de las series temporales representativas de cada proceso de captura. Al respecto, cada serie se compone de un listado ordenado de pares de datos: el tiempo de llegada del paquete, registrado según las consideraciones anteriores en formato de coma flotante con seis posiciones, y el tamaño del paquete Ethernet capturado, que registra la longitud de datos Ethernet. En el valor registrado no se incluyen los siguientes campos: preámbulo, dirección de origen, dirección de destino, longitud, y CRC o secuencia de verificación. Se recuerda que el protocolo Ethernet fuerza que las tramas presenten un tamaño mínimo de 64 bytes y máximo de 1518 bytes, por lo tanto los valores registrados se encuentran en ese intervalo, siendo el valor de 1518 bytes el mayoritariamente registrado en todos los procesos de captura.
- El 99,9% de las PDU Ethernet son encapsuladas en datagramas IP.

Con la finalidad de probar los algoritmos programados para cada método, cuyas expresiones matemáticas están dadas por (1), (2) y (3), se comienza la secuencia de análisis empleando la serie de muestras BC-pAug89.TL, a partir de las Figuras 3, 4 y 5, con los análisis Varianza-Tiempo, R/S y de densidad espectral, respectivamente. Luego, y en el mismo orden, se muestran los análisis para cada uno de los cuatro conjuntos de datos. En la leyenda de cada figura se especifica el valor obtenido para el parámetro  $H$ .

Tabla 1. Descripción cualitativa de los conjuntos de capturas de tráfico.

Periodo de Medición		Conjunto de Datos	Cantidad de Paquetes
<b>Noviembre 2010</b>	Total (32 h)		2118505
	Inicio: Nov. 29, 6:00 am	traza-1	918896
	Término: Nov. 30, 8:00 pm	traza-2	1199609
<b>Diciembre 2010</b>	Total (38 h)		6096937
	Inicio: Dic. 1, 8:00 am	traza-3	1338789
	Término: Dic. 2, 10:00 pm	traza-4	4758148

Las Figuras 3, 4 y 5 exponen los resultados gráficos que se obtienen de la aplicación de los métodos de análisis varianza-tiempo (V-T), R/S y de densidad espectral para la serie de datos BC-pAug89.TL, respectivamente. Se considera una exactitud numérica de 4 decimales.

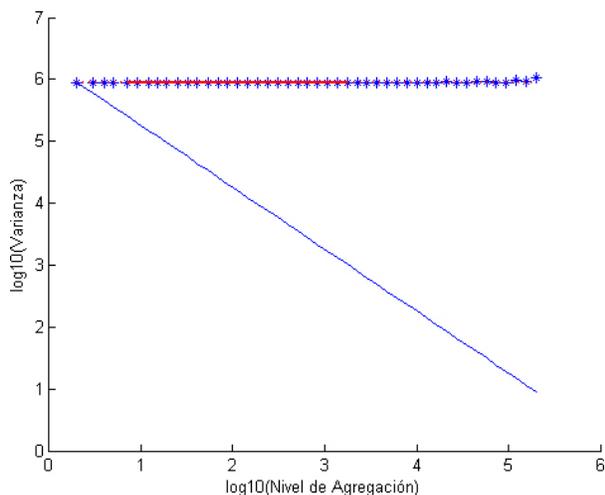


Figura 3. Análisis V-T.  $H = 0.9000$ .

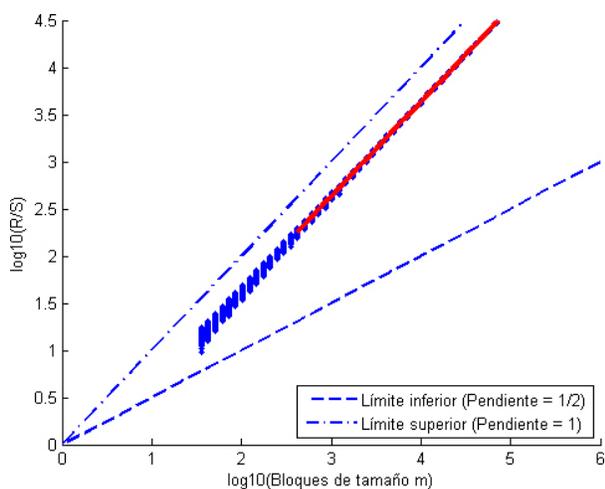


Figura 4. Análisis R/S.  $H = 0.8991$ .

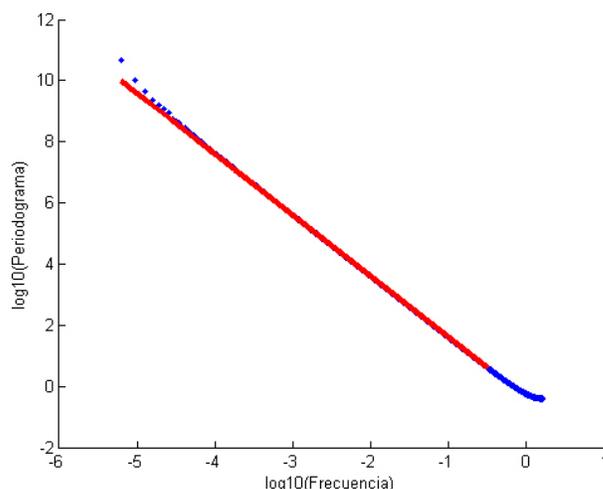


Figura 5. Análisis por el método del periodograma para la serie BC-pAug89.TL.  $H = 0.7681$ .

Para la serie traza-1, los resultados gráficos que se obtienen de la aplicación de los métodos de análisis varianza-tiempo (V-T), R/S y de densidad espectral, se muestran en las Figuras 6, 7 y 8, respectivamente.

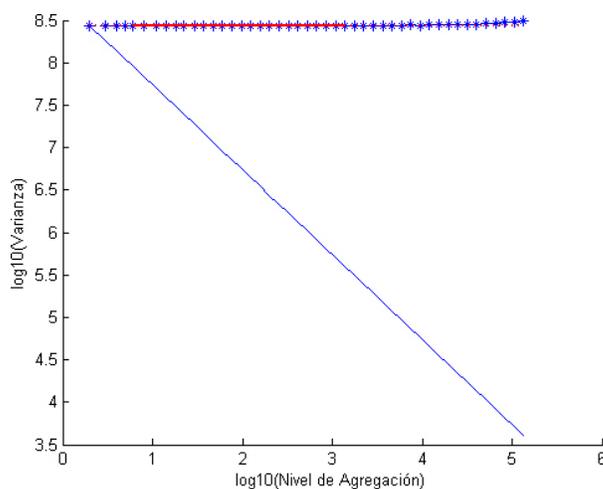


Figura 6. Análisis V-T.  $H = 0.8999$ .

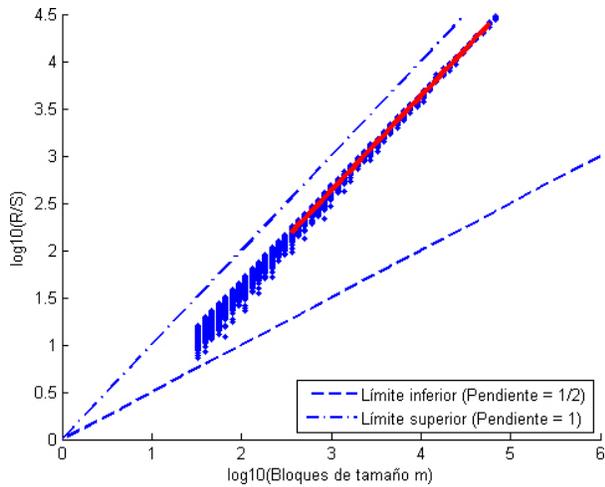


Figura 7. Análisis R/S de la serie traza-1.  $H = 0.8986$ .

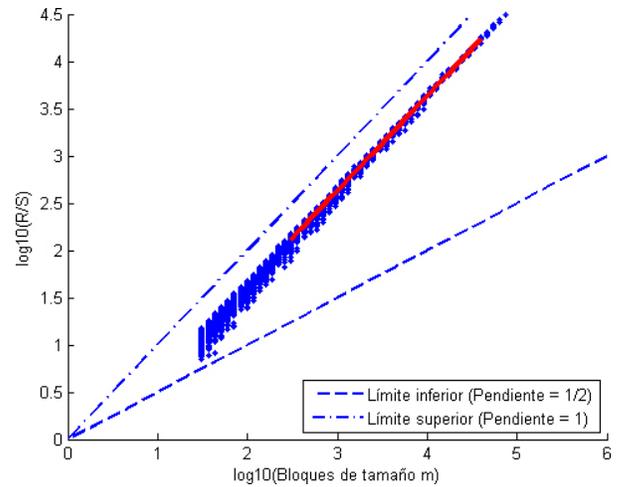


Figura 10. Análisis R/S de la serie traza-2.  $H = 0.8982$ .

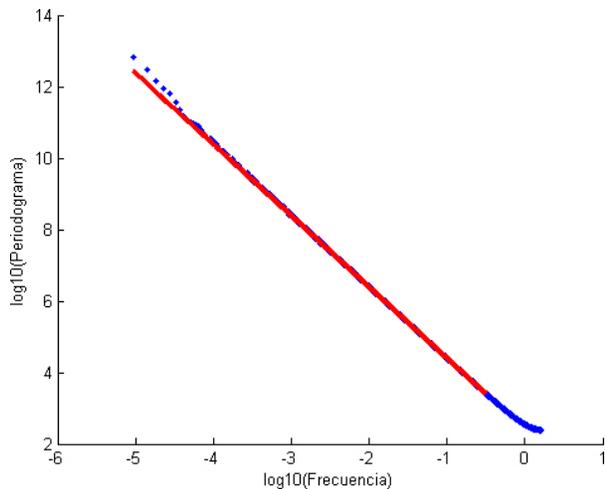


Figura 8. Análisis del periodograma de la serie traza-1.  $H = 0.7680$ .

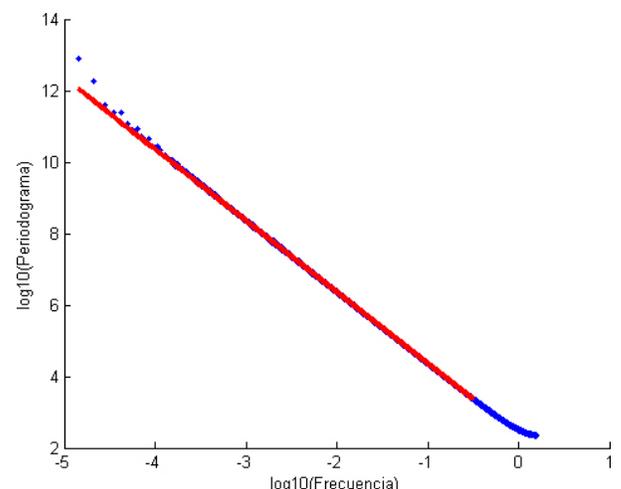


Figura 11. Análisis del periodograma de la serie traza-2.  $H = 0.7678$ .

Así mismo, para la serie de datos traza-2, se obtienen los resultados mostrados en las Figuras 9, 10 y 11.

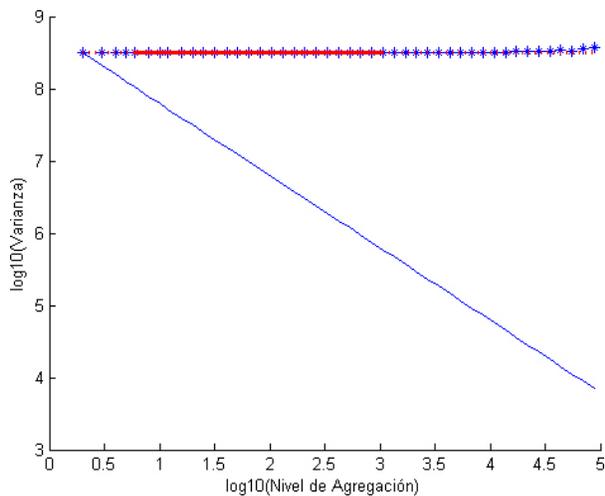


Figura 9. Análisis V-T de la serie traza-2.  $H = 0.8999$ .

Para la serie de datos traza-3, se obtienen los resultados gráficos mostrados en las Figuras 12, 13 y 14.

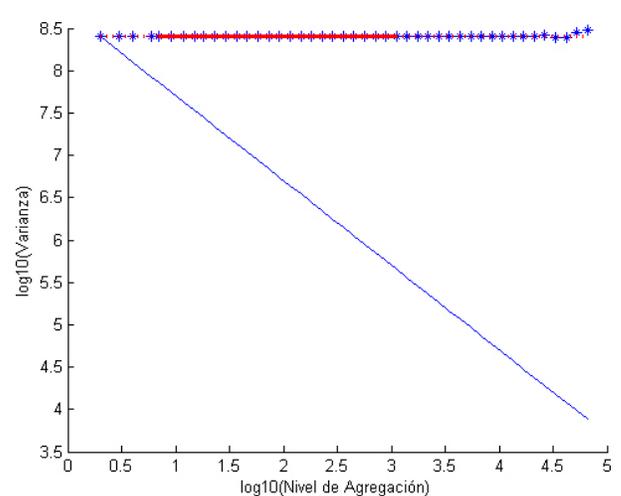


Figura 12. Análisis V-T de la serie traza-3.  $H = 0.8999$ .

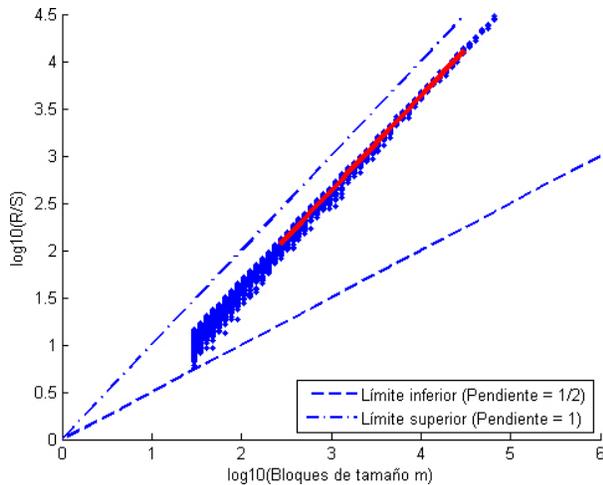


Figura 13. Análisis R/S de la serie traza-3.  $H = 0.8985$ .

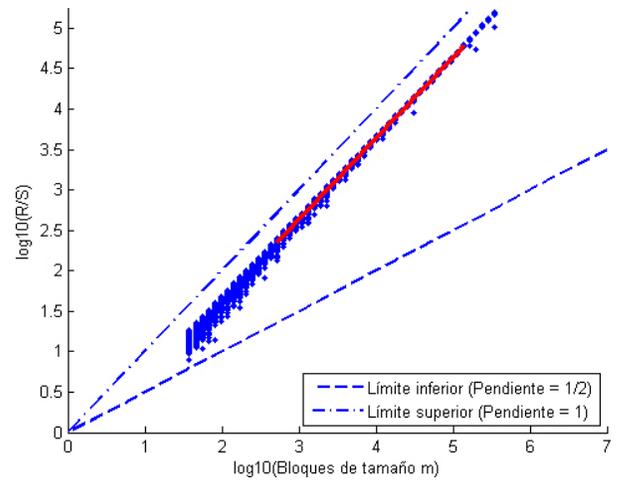


Figura 16. Análisis R/S de la serie traza-4.  $H = 0.8994$ .

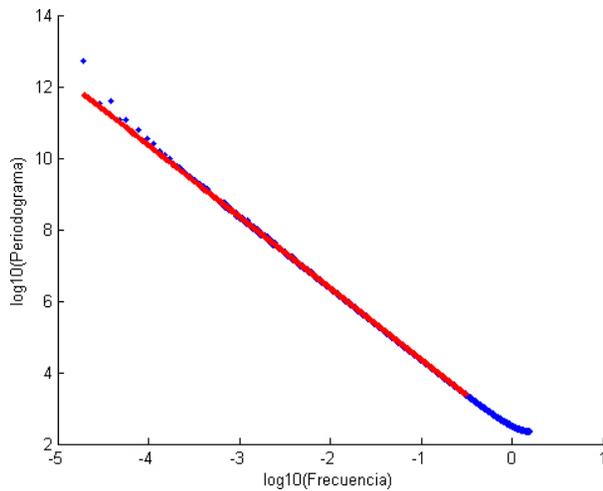


Figura 14. Análisis del periodograma de la serie traza-3.  $H = 0.7677$ .

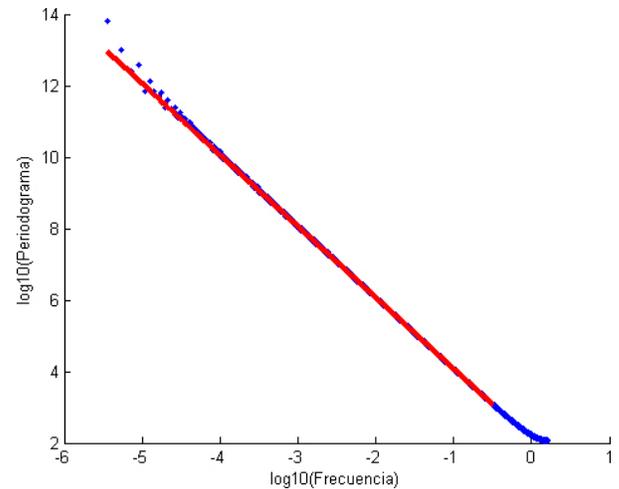


Figura 17. Análisis del periodograma de la serie traza-4.  $H = 0.7681$ .

Finalmente, para la serie traza-4, se obtienen los gráficos mostrados en las Figuras 15, 16 y 17.

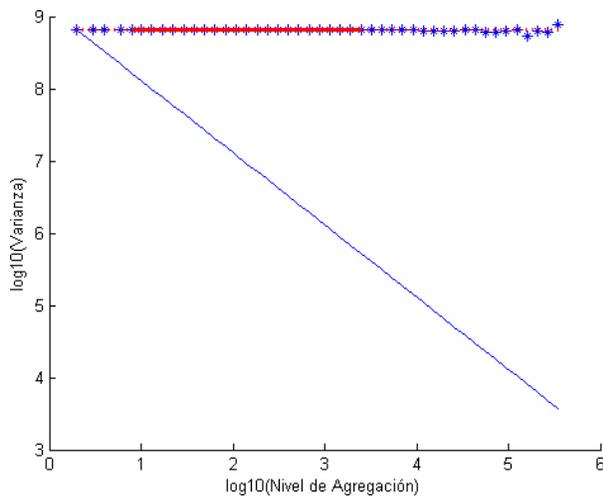


Figura 15. Análisis V-T de la serie traza-4.  $H = 0.9000$ .

### Discusión de resultados

En la Tabla 2 se resumen los resultados obtenidos. De ella se desprende que el valor de  $H$  encontrado para la serie de datos BC-pAug89.TL empleando los análisis Varianza-Tiempo y R/S, es correcto con respecto al valor determinado por los autores:  $H = 0.9$  empleando el método gráfico R/S. Además, se verifica que todos los valores de  $H$  encontrados para cada una de las series experimentales (traza-1, traza-2, traza-3 y traza-4) están dentro del intervalo de interés  $1/2 < H < 1$ , que implica ciertamente un comportamiento asintótico de la función de autocorrelación dada por [11]

$$r(k) \sim H(2H - 1)k^{2H-2} \text{ cuando } k \rightarrow \infty \quad (1)$$

que asegura que estas series presentan una caída de tipo hiperbólico en las colas de sus distribuciones, lo cual reafirma un comportamiento diferente al típicamente exponencial.

Tabla 2. Resumen de los resultados obtenidos para  $H$  luego de aplicados los diferentes métodos de análisis.

Método	Valor de $H$ para la Serie de Datos				
	BC-pAug89.TL	traza-1	traza-2	traza-3	traza-4
V-T	0.9000	0.8999	0.8999	0.8999	0.9000
R/S	0.8991	0.8986	0.8982	0.8985	0.8994
Periodograma	0.7681	0.7680	0.7678	0.7677	0.7681

Claramente, el teorema del límite central para procesos autosimilares reafirma la condición anterior al considerar que la función de autocovarianza de estos procesos en el intervalo de interés  $1/2 < H < 1$ , depende del valor del exponente de Hurst en la forma aproximada regida por la expresión [12]

$$\gamma(k) \sim Ck^{2H-2} \text{ cuando } k \rightarrow \infty \text{ con } C > 0 \quad (2)$$

La presencia de dependencia temporal de largo alcance se observa a partir de [13]

$$r(k) = r^{(m)}(k), \forall k \geq 1, \forall m \geq 1 \quad (3)$$

hecho que se evidencia a partir del comportamiento de tipo lineal de la relación subyacente entre diferentes niveles de agregación con respecto a la varianza, lo que queda en evidencia a partir del análisis de las gráficas mostradas en las Figuras 6, 9, 12 y 15.

El comportamiento autosimilar de los diferentes niveles de agregación, así mismo como su acusada dependencia de largo alcance, queda en evidencia con la linealidad exhibida por las gráficas de los bloques de tamaño  $m$ , con respecto al factor R/S. Ver Figuras 7, 10, 13 y 16.

El comportamiento autosimilar de las diferentes series de datos también es expuesto por los resultados de la última fila de la Tabla 2, que consideran la estimación espectral basada en el periodograma de la serie. Las notorias diferencias entre los valores de  $H$  para cada una de las series, radican en la ausencia de intervalos de confianza. Los análisis basados en las gráficas R/S y varianza-tiempo muestran casos límite simplificados, que no consideran interacciones finas entre componentes agregados cuando sus diferencias son pequeñas, esto es, al considerar, por ejemplo dos niveles de agregación inmediatamente contiguos. Al respecto, el análisis en frecuencia si las considera, pues el manejo espectral es, la mayoría de las veces, lo suficientemente exacto como para no omitir el sesgo generado entre el compromiso de la representación de las singularidades de cada nivel de agregación y sus valores generales en términos de la varianza. Luego, este es el motivo para considerar la agregación de frecuencias en relación al periodograma, en lugar de los tamaños de bloques con respecto a la varianza. Sin embargo, para el uso correcto de este

método debe acompañarse cada resultado con intervalos de confianza, los que en general se recomienda obtener partir del Estimador de Máxima Verosimilitud (MLE) de Whittle, pero esto escapa de los objetivos planteados para esta investigación, además que el interés radica en obtener una visión general de la presencia o ausencia de la característica de autosimilaridad, y no en su valor exacto. Pudiéndose por lo tanto considerar los valores obtenidos a través de los análisis varianza-tiempo y R/S como límites superiores con un mínimo de error en la interpretación final de los resultados.

Es importante notar que la parsimonia, aun cuando no se ha desarrollado modelo de tráfico alguno y tan solo se ha supuesto que los diferentes arribos se encuentran relacionados con un modelo On/Off, lo cual queda en evidencia con el uso de los estadísticos varianza-tiempo y R/S en términos de representar agregaciones, es una característica comprobable sobre la base de la cantidad de parámetros necesarios para establecer la autosimilitud y la dependencia de largo alcance.

Por otra parte, las propiedades más relevantes de los procesos autosimilares no sufren de variación alguna al considerarse acotadas al nivel de red, lo cual constituye una interpretación razonable, y recomendable, acerca del origen de la autosimilaridad. De hecho, se verifica que esta condición se cumple para todos los paquetes capturados, puesto que todos los atributos protocolares considerados son atribuibles a los procesos internos que ocurren a este nivel. Esto es, la longitud de las tramas Ethernet que se encapsulan en IP y los tiempos entre arribos sucesivos. Es más, el escenario considerado y la metodología de capturar las muestras habla sobre la característica más relevante de este nivel OSI, a saber, el cometido de hacer que los datos lleguen desde un origen aun destino aun cuando ambos no se encuentren conectados directamente, además que los controles de congestión de tráfico también lo son. Todo lo anterior, claro está, en directa alusión al direccionamiento lógico y la determinación de las rutas de los datos hasta los receptores finales. Se aclara que el término paquete se emplea puesto que se trata de la PDU del nivel de red.

Finalmente, la propuesta de acotar los resultados que se derivan de representar los flujos de tráfico en forma de series temporales de segundo orden autosimilares, al nivel de red, cuando sea necesario, claro está, resulta ser

no tan solo factible en base al conjunto de argumentos presentados, sino que además útil en pro de una correcta comprensión y búsqueda del origen de la autosimilitud (fractalidad) y de la dependencia de largo alcance que, eventualmente, exhiba. Al respecto, es innegable que resulta más adecuado interpretar la presencia de estas singularidades como producto de los procesos internos subyacentes a cada nivel OSI en particular, en vez de referirse a ellas como características intrínsecas de los flujos de datos, por la indeterminación a que conlleva. Luego, resulta verdadera la posibilidad de acotar un proceso estadísticamente autosimilar a un entorno de aplicación bien definido sin alterar su naturaleza y sus propiedades más relevantes, realizando con ello la validez de sus postulados y añadiendo mayor plausibilidad en su interpretación física, la cual se deriva precisamente de que no se está forzando una realidad a ajustarse a todos los parámetros de un determinado modelo, sino que por el contrario, se está atendiendo directamente a una característica de comportamiento de los flujos de tráfico que queda expuesta a través de su observación e interpretación matemática.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un nuevo punto de vista con respecto a la clasificación sistemática de procesos autosimilares con dependencia de largo alcance, cuya finalidad, aplicada al modelado parsimonioso de redes de computadoras de alta velocidad, es proponer un marco de trabajo común para la interpretación de los resultados derivados de la representación de flujos de tráfico en forma de series temporales estacionarias de segundo orden autosimilares. En este respecto, son de absoluta consideración, los aspectos derivados de la propuesta de interpretar resultados de autosimilaridad (fractalidad) en los flujos de tráfico y dependencias de largo alcance, entendidos como características que subyacen a los procesos internos de cada nivel OSI en particular donde estas tengan su origen. Luego, a través de una detallada discusión teórica y analítica, apoyada por simulaciones, se verifica la factibilidad de acotar la evolución de un proceso estadísticamente autosimilar a un entorno de aplicación bien definido, sin alterar su naturaleza y propiedades más relevantes, realizando con ello la validez de sus postulados y añadiendo mayor plausibilidad en su interpretación física, concretamente, cuando estos procesos son aplicados como modelos de tráfico de entrada en una red de computadoras de alta velocidad y su entorno de aplicación se restringe al nivel de red, confirmando, así, la validez de la hipótesis de trabajo planteada.

Apoyándose en el uso de un conjunto de cuatro muestras de tráfico de alta resolución temporal, se demuestra que

el comportamiento de los flujos de tráfico en una red de computadoras de alta velocidad es autosimilar y exhibe dependencias de largo alcance en un amplio rango de escalas temporales, lo cual queda en evidencia al analizar la dependencia que existe entre los diferentes niveles de agregación con respecto a sus estadísticos de segundo orden, y comprobar que indistintamente del nivel considerado la tendencia refleja linealidad. Esta linealidad implica un comportamiento que no depende de las escalas temporales bajo consideración, sino que un comportamiento inherente a los flujos de datos.

Los modelos matemáticos de las actuales redes de computadoras de alta velocidad deben considerar tanto la autosimilaridad como las dependencias de largo alcance. Si bien es cierto que la literatura en muchas ocasiones propone la equivalencia de ambos conceptos a partir de un tratamiento indistinto, resulta que estos conceptos son en rigor independientes, no siendo, necesariamente, uno la consecuencia del otro y, de forma más profunda, no implicando uno la existencia del otro; estas dos últimas consideraciones son indistintas de la dirección en que se las considere.

Considerar una restricción en la interpretación de los resultados derivados de representar flujos de tráfico como series temporales estacionarias autosimilares en relación al nivel OSI de observación resulta no tan solo factible, sino que debe considerarse como una práctica útil en pro de la exactitud en la determinación de los orígenes de la autosimilitud y la dependencia de largo plazo, y de una mejor comprensión de sus implicancias. En concreto cuando se trata con redes de computadoras de alta velocidad donde las dependencias protocolares en los flujos de datos requieren una interpretación adecuada para su uso práctico en ingeniería de redes. Al respecto, indudablemente, resulta mejor práctica interpretar estas singularidades como un producto de los procesos internos que subyacen a cada nivel OSI en particular, que a la indeterminación a que conlleva referirse a ellas como características intrínsecas de los flujos sin origen.

## REFERENCIAS

- [1] G. Millán, "Self-similar Traffic Analysis at Network Layer Level. Part I: Fundamentals," Mar. 2021. [Online]. Available: [osf.io/v47sp](https://osf.io/v47sp).
- [2] B.K. Ryu and S.B. Lowen, "Point Process Approaches for Modeling and Analysis of Self-Similar Traffic: Part II: Applications", in Proc. 5th International Conference on Telecommunications Systems, Modeling and Analysis, Nashville, TN, USA, Mar. 1997.

- [3] G. Millán, “On the Hurst Exponent, Markov Processes, and Fractional Brownian Motion,” 2021. arXiv:2103.05019 [eess.SP].
- [4] M.W. Garrett and W. Willinger, “Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic”, ACM SIGCOMM Computer Communication Review, Vol. 24, No. 4, pp. 269-280, Oct. 1994.
- [5] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, and D.V. Wilson, “On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 2, No. 1, pp. 1-15, Feb. 1994.
- [6] V. Paxson and S. Floyd, “Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling”, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 3, No. 1, pp. 226-244, Jun. 1995.
- [7] B.K. Ryu, “Implications of Self-Similarity for Providing End-to-End QoS Guarantees in High-Speed Networks: A Framework of Application Level Traffic Modeling”, in Lectures Notes in Computer Science (Proceedings of International Zurich Seminar on Digital Communications (IZS'96)), B. Plattner, Ed., Zurich, Switzerland, Springer-Verlag, 1996, Vol. 1044, pp. 65-79.
- [8] W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, and D.V. Wilson, “Self-Similarity Through High-Variability: Statistical Analysis of Ethernet LAN Traffic at the Source Level”, in Proc. ACM SIGCOMM '95, Cambridge, MA, Aug. 1995, pp. 100-113.
- [9] J. Aracil, R. Edell, and P. Varaiya, “A Phenomenological Approach to Internet Traffic Self-Similarity”, in 35th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing, Urbana-Champaign, IL, Sep. 1997.
- [10] <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/BC.html>.
- [11] K. Park and W. Willinger, “Self-similar network traffic: an overview”, in Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation, K. Park and W. Willinger, Eds. New York: John Wiley & Sons, Inc., 200, Ch. 1, pp. 19-20.
- [12] G. Millán, “Análisis de Autosimilaridad de Tráfico Telemático Restringido al Nivel de Red,” 2021 [Online]. Available: [thesiscommons.org/an89e](https://thesiscommons.org/an89e).
- [13] W. Stallings, “Tráfico autosimilar”, Redes e Internet de Alta Velocidad. Rendimiento y Calidad de Servicio, 2nd ed. Madrid, España: Pearson – Prentice Hall, 2004, Ch. 9, pp. 224- 237.