

Caracterización de las pérdidas de propagación a 700 MHz y 5.9 GHz para comunicaciones vehiculares

Herman Fernández⁽¹⁾, Vicent M. Rodrigo-Peñarrocha⁽²⁾, Juan Reig⁽²⁾ y Lorenzo Rubio⁽²⁾

⁽¹⁾Grupo de Investigación en Telecomunicaciones (GINTEL), Escuela de Ingeniería Electrónica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Sogamoso, Colombia

⁽²⁾Grupo de Radiación Electromagnética, Instituto Universitario de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia

herman.fernandez@uptc.edu.co, vrodrigo@dcom.upv.es, jreig@dcom.upv.es, lrubio@dcom.upv.es

Abstract—This paper presents a path loss characterization of the vehicular-to-vehicular (V2V) propagation channel. We have proposed a linear relationship between the path loss and the logarithm of the transmitter-receiver separation distance. The parameters of the path loss model have been derived from extensive narrowband channel measurements at 700 MHz and 5.9 GHz. The measurements have been collected in typical expected V2V communications scenarios, i.e., urban, suburban, rural and highway, for different road traffic densities, speed and driven conditions. Values of the path loss exponent for a 95 % confidence interval are reported.

I. INTRODUCCIÓN

Bajo el concepto de transporte inteligente (ITS, *Intelligent Transportation System*), se han propuesto, y se continúa proponiendo, nuevas aplicaciones relacionadas con la seguridad del tráfico rodado y gestión eficiente del mismo [1]. Estas aplicaciones requieren la integración de gestión de información y diferentes tecnologías de comunicaciones radio (tecnologías inalámbricas, celulares y nuevas tecnologías avanzadas de sensores) en los terminales embarcados a bordo de los vehículos y en los puntos de acceso de infraestructura desplegados a lo largo de las vías de tráfico. En este contexto, las redes vehiculares *ad hoc* (VANETs *Vehicular ad hoc networks*), como un caso particular de redes de comunicaciones, pueden extender la distancia de comunicación entre vehículos proporcionando información en tiempo real. Las características asociadas a las potenciales aplicaciones y servicios de comunicaciones vehiculares requiere el desarrollo e implementación de nuevas tecnologías de comunicaciones. En este tipo de comunicaciones entre vehículos (V2V, *Vehicular-to-Vehicular*), uno de los retos es la caracterización y modelado de las pérdidas de propagación, permitiendo evaluar los protocolos y soluciones propuestas bajo condiciones próximas a las que se tendría en la realidad [2], [3], [4].

Se han reservado bandas de frecuencias específicas en el espectro para el despliegue de las aplicaciones ITS propuestas. Así, en Estados Unidos, el FCC (*Federal Communication Commission*) asignó 75 MHz en la banda de 5.9 GHz (desde 5.850 hasta 5.925 GHz), denominada banda DSRC (*Dedicated*

Short-Range Communications). En Europa, el ETSI (*European Telecommunications Standard Institute*) asignó 50 MHz (desde 5.875 hasta 5.925 GHz) en la banda DSRC para aplicaciones ITS. Junto a la banda de 5.9 GHz, Japón ha asignado recientemente 10 MHz en la banda de 700 MHz (desde 755 hasta 765 MHz) también para aplicaciones ITS [5].

Los sistemas V2V se diferencian de los sistemas celulares tradicionales, o también sistemas F2M (*Fixed-to-Mobile*), principalmente en: (i) ambos terminales están en movimiento, con velocidades que pueden ser elevadas, (ii) se utilizan antenas en los terminales relativamente próximas al suelo y (iii) las bandas de frecuencia son distintas. Estas particularidades de los sistemas V2V, hace que los modelos de propagación desarrollados para los sistemas celulares no puedan ser extrapolados y utilizados en el despliegue de las futuras redes vehiculares. En este sentido, el conocimiento de las características del canal vehicular, y en particular las pérdidas de propagación, es esencial para la evaluación de los protocolos de redes vehiculares que se están proponiendo bajo condiciones de propagación próximas a la realidad. En estos últimos años se han llevado a cabo diferentes trabajos basados en medidas experimentales del canal vehicular en la banda DSRC a 5.9 GHz [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12]. Sin embargo, a excepción del trabajo realizado por Sevlian *et al.* [13], no se han realizado estudios de propagación en la banda de 700 MHz con aplicaciones a sistemas V2V.

En este artículo se analiza las pérdidas de propagación y se propone un modelo sencillo para su implementación en simuladores VANET. Los parámetros del modelo de propagación han sido obtenidos en base a medidas realizadas en escenarios típicos de comunicaciones vehiculares, con diferentes densidades de tráfico rodado y velocidades de los vehículos. Las medidas se han realizado mayoritariamente de forma simultánea¹ a 700 MHz y 5.9 GHz, facilitando así la comparación entre las dos bandas de frecuencia, y

¹Se han realizado medidas simultáneas en ambas bandas de frecuencia, si bien en este estudio se han considerado también medidas realizadas por separado.

bajo condiciones reales de conducción. En este sentido, los resultados aquí mostrados son interesantes en la simulación y diseño de las futuras redes vehiculares bajo condiciones reales de propagación.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se describe el sistema de medida y los escenarios de propagación. En la Sección III se presentan y analizan los resultados. Las conclusiones se muestran en la Sección IV.

II. METODOLOGÍA

En esta sección se describe el sistema de medida utilizado en las campañas de medidas, junto con los escenarios donde se han llevado a cabo.

A. Sistema de medida

Las medidas para caracterizar las pérdidas de propagación se han realizado en banda estrecha. En el vehículo transmisor (Tx) se han utilizado los generadores de señal HP8648C y HP83623A para transmitir de forma continua una portadora sin modular a 700 MHz y 5.9 GHz, respectivamente. Se han utilizado amplificadores de potencia para conseguir una PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) igual a +26.3 dBm y +23.8 dBm a 700 MHz y 5.9 GHz, respectivamente. En el vehículo receptor (Rx) se ha utilizado el analizador de espectros HP8590L para medir el nivel de señal a 700 MHz, mientras que para medir el nivel de señal recibida a 5.9 GHz se ha utilizado el analizador de redes vectorial ZVA-24 configurado como medidor de potencia a través de la medida del parámetro b_2 . En el Rx se utilizaron amplificadores de potencia media y cables de bajas pérdidas, consiguiendo una ganancia de sistema (suma de ganancias y atenuaciones totales) igual 60.45 dB a 700 MHz y 86.67 dB a 5.9 GHz.

A 700 MHz, la señal recibida fue medida seleccionando un SPAN de 0 Hz y un ancho de banda de resolución de frecuencia intermedia de 30 kHz. Se midieron trazas de 401 puntos (tamaño máximo de traza en el analizador de espectros), con un tiempo de barrido por traza de aproximadamente 15 ms. A 5.9 GHz, la señal recibida se midió en trazas de 5000 puntos, también con un SPAN de 0 Hz y un ancho de banda de frecuencia intermedia de 100 kHz, resultando en un tiempo de barrido por traza de 220 ms. Indicar que el ancho de banda de frecuencia intermedia se ha seleccionado como compromiso entre rapidez en la medida y nivel de ruido térmico en la misma.

El promediado de las muestras contenidas en una traza permite filtrar las variaciones a corto plazo como consecuencia del efecto multicamino. Esto es equivalente a considerar un tiempo de integración equivalente al tiempo de traza, resultando en un tiempo de muestreo (tiempo entre dos muestras consecutivas ya promediadas) próximo a 225 ms. a 700 MHz y 245 ms. a 5.9 GHz. Indicar que este tiempo de muestreo considera el tiempo de almacenamiento en disco de cada traza, que es mayor en el analizador de espectros.

Los equipos de medidas, analizador de espectros y analizador de redes, fueron controlados mediante dos ordenadores portátiles, encargados del proceso de automatización de las

medidas y posterior guardado. Se utilizaron antenas monopolo en el Tx y Rx, iguales en cada banda de frecuencia, montadas sobre el techo de los vehículos a través de una base magnética, a una altura de 1.41 m. y 1.43 m. sobre el nivel del suelo en los vehículos Tx y Rx, respectivamente. Las antenas transmitían con polarización vertical. Su diagrama de radiación se midió en una cámara anecoica montando las antenas sobre un plano metálico de tamaño 1×1 m., emulando así el techo de los vehículos. La ganancia medida en el plano horizontal (direcciones de conducción de los vehículos) fue -5.43 dB a 700 MHz y -2.56 dB a 5.9 GHz.

Junto con los equipos de RF, los terminales Tx y Rx fueron equipados con receptores GPS, proporcionando información sobre el tiempo de adquisición de las medidas, velocidad de los terminales y distancia de separación Tx-Rx.

B. Escenarios de medida

Las medidas se han realizado en cuatro escenarios de la ciudad de Valencia y alrededores: escenario urbano (URB), suburbano (SUB), rural (RUR) y de autovía (AUT). Las medidas en escenario urbano se han realizado en grandes avenidas y vías rápidas de la ciudad de Valencia, con una densidad de tráfico rodado media de 44200 vehículos/24 horas (según datos proporcionados por el Ayuntamiento de la ciudad). Se ha medido sobre un trayecto total de aproximadamente 45 km. Las medidas en escenario suburbano se han realizado en avenidas y vías alejadas del centro de la ciudad y próximas a su periferia, caracterizadas por una elevada densidad de tráfico, del orden de 71000 vehículos/24 horas. Se midió sobre un trayecto total de aproximadamente 10 km. Las medidas de escenario rural se realizaron en carreteras de 2 carriles (uno por cada sentido de dirección) en zonas abiertas, con vegetación y alguna casa aislada junto a la vía. Durante las medidas en este escenario la densidad de tráfico rodado fue baja. Se midió sobre una distancia total de aproximadamente 14 km. Las medidas en escenario de autovía se realizaron en la autopista A-7 y autovía V-21, en la parte norte de la provincia, midiendo sobre un recorrido de aproximadamente 50 km. Todas las medidas se realizaron con los vehículos Tx y Rx en el mismo sentido (convoy), con el Tx detrás y en condiciones reales de propagación. En la medida de lo posible, se trató de variar de forma uniforme la distancia de separación Tx-Rx, cubriendo un rango de distancias suficiente para analizar las pérdidas de propagación en términos de la separación Tx-Rx.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Diferentes trabajos relacionados con medidas experimentales del canal radio vehicular permiten establecer una relación lineal entre las pérdidas de propagación y el logaritmo de la distancia de separación Tx-Rx [4], [10], [12]. Se trata de un modelo de propagación a una pendiente, sencillo y con un elevado grado de exactitud que permite su fácil incorporación en simuladores de redes VANET. En este modelo, las pérdidas de propagación vienen dadas por la expresión

$$PL(d) = PL_0(d_0) + 10\gamma \log_{10}(d/d_0) + S, \quad d \geq d_0, \quad (1)$$

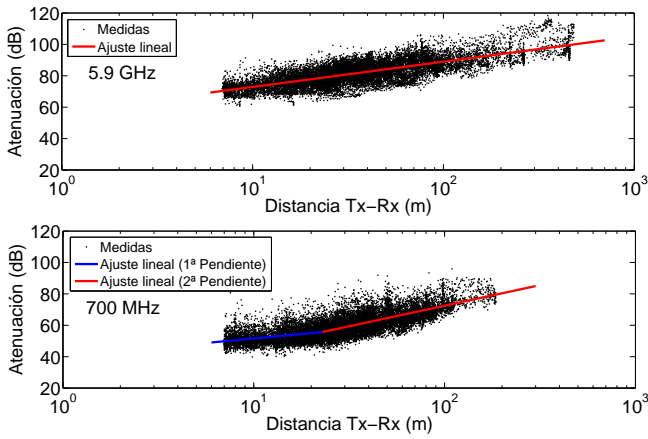


Fig. 1. Atenuación en función de la distancia de separación Tx-Rx.

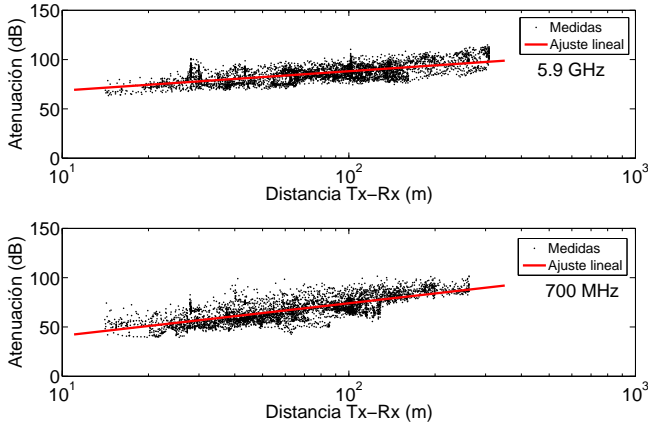


Fig. 2. Atenuación en función de la distancia de separación Tx-Rx.

donde d es la distancia de separación Tx-Rx, PL_0 son las pérdidas de propagación para una distancia de referencia d_0 , γ es el exponente de pérdidas, relacionado con el entorno, y S es una variable aleatoria con distribución normal, de media cero y desviación típica σ_S que modela los desvanecimientos a largo plazo. Dado que los parámetros del modelo van a ser extraídos a partir de las medidas experimentales mediante ajuste de regresión lineal por mínimos cuadrados, es más conveniente escribir (1) de la forma

$$PL(d) = PL_0 + 10\gamma \log_{10} d + S, \quad d_{min} \leq d \leq d_{max}. \quad (2)$$

En (2) el término PL_0 no corresponde a las pérdidas para una distancia de referencia d_0 , y el rango de validez del modelo queda restringido a las distancias Tx-Rx en las que se tomaron las medidas, donde $d_{min} \leq d \leq d_{max}$, siendo d_{min} y d_{max} la mínima y máxima separación Tx-Rx, respectivamente.

En la Figura 1 se muestra la relación entre las pérdidas de propagación y la distancia, en escala logarítmica, según los resultados medidos en el escenario urbano a 700 MHz y 5.9 GHz. En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos en escenario suburbano. Hay que señalar que a 700 MHz y en escenario urbano, no así en los otros tres, las pérdidas quedan mejor descritas utilizando un modelo a dos pendientes, con

una distancia crítica d_c , dado por

$$PL(d) = \begin{cases} PL_0 + 10\gamma \log_{10} d + S, & d_{min} \leq d \leq d_c \\ PL_{02} + 10\gamma_2 \log_{10} d + S_2, & d_c \leq d \leq d_{max} \end{cases} \quad (3)$$

Para el escenario urbano a 700 MHz se ha obtenido $d_c = 22.92$ m. Los parámetros del modelo de propagación obtenidos a partir de las medidas se resumen en la Tabla I. La Tabla II indica el rango de distancias para las que se han obtenido las medidas. El valor más bajo del exponente de pérdidas se ha obtenido en el escenario urbano, acompañado de un valor PL_0 alto. Los exponentes de pérdidas son mayores a 700 MHz para los cuatro entornos considerados. A 700 MHz los valores del exponente de pérdidas son mayores que 2, mientras que a 5.9 GHz los valores obtenidos son sensiblemente inferiores a 2. Es necesario indicar que estos valores han sido obtenidos mediante técnicas de regresión, por lo que un exponente de pérdidas inferior a 2 no significa necesariamente condiciones de propagación más favorables que en espacio libre. Se observa como tendencia que a media que disminuye el exponente de pérdidas aumenta el término PL_0 , resultando en unas pérdidas superiores a espacio libre. Este mismo comportamiento ha sido observado en [10], [12].

De los resultados mostrados en la Tabla I se deduce una mayor variabilidad, modelada por el término σ_S , a 700 MHz en escenarios urbanos y suburbanos, no así en entornos rurales y de autovía, donde la variabilidad es sensiblemente mayor a 5.9 GHz. En escenarios urbanos y suburbanos las condiciones de propagación son más favorables a 700 MHz, con un número elevado de contribuciones multicamino en el plano horizontal, lo que explicaría una mayor variabilidad o dispersión, mientras que en escenarios rurales y de autovía las pérdidas por difracción (ocultamiento entre vehículos) son mayores a 5.9 GHz y el número de contribuciones en el plano horizontal es más reducido que en escenarios urbanos y suburbanos.

A 5.9 GHz, los resultados que se han obtenido concuerdan muy bien con datos publicados en la literatura. En [7], [10] y [11] se han obtenido exponentes de pérdidas en escenarios urbanos iguales a 1.61, 1.68 y 1.83, respectivamente. En [6], [7] y [10] se han obtenido exponentes de pérdidas iguales a 2.1-2.5, 1.61 y 1.59 en escenarios suburbanos, respectivamente. En [7] se ha obtenido un exponente de pérdidas igual a 1.70 en áreas rurales, mientras que en [10], [7] y [11] se han obtenido exponentes de pérdidas iguales a 1.77, 1.85 y 2.21 en escenarios tipo autovía. Indicar que no hay trabajos publicados a 700 MHz con los que comparar nuestros resultados.

De los parámetros estimados del modelo de pérdidas, el más significativo es el exponente de propagación, que indica cómo varían las pérdidas de propagación en función de la distancia. Los valores indicados en la Tabla I son una estimación puntual a partir de las medidas. Para tener un conocimiento de su variabilidad, es necesario recurrir al intervalo de confianza en la estimación. En la Tabla III se recogen los intervalos de confianza al 95 %, que indica el intervalo en el que puede encontrarse el exponente de pérdidas con una probabilidad del

TABLE I
PARÁMETROS DEL MODELO DE PÉRDIDAS PARA DIFERENTES
ESCENARIOS: URBANO (URB), SUBURBANO (SUB), RURAL (RUR) Y
AUTOVÍA (AUT)

Entorno	700 MHz			5.9 GHz		
	PL_0 (dB)	γ	σ_S (dB)	PL_0 (dB)	γ	σ_S (dB)
	PL_{02} (dB)	γ_2	σ_{S2} (dB)			
URB	40.18	1.14	4.93	56.78	1.61	5.30
	20.04	2.62	5.65			
SUB	8.09	3.30	7.96	48.80	1.97	6.69
RUR	11.61	3.16	3.55	54.71	1.79	5.36
AUT	17.56	2.90	4.75	48.56	2.11	6.30

TABLE II
DISTANCIA TX-RX (EN METROS) DURANTE LAS MEDIDAS: ESCENARIO
URBANO (URB), SUBURBANO (SUB), RURAL (RUR) Y AUTOVÍA (AUT)

Entorno	700 MHz		5.9 GHz	
	d_{min}	d_{max}	d_{min}	d_{max}
URB	7	185	7	482
SUB	14	262	14	308
RUR	13	500	13	346
AUT	20	940	20	1475

TABLE III
INTERVALOS DE CONFIANZA AL 95 % DEL EXPONENTE DE PÉRDIDAS (γ):
ESCENARIO URBANO (URB), SUBURBANO (SUB), RURAL (RUR) Y
AUTOVÍA (AUT)

Entorno	700 MHz	5.9 GHz
URB	2.59-2.65	1.59-1.63
SUB	3.22-3.38	1.91-2.03
RUR	3.11-3.21	1.73-1.85
AUT	2.84-2.96	2.08-2.14

95 %. Este intervalo viene definido por [14]

$$\gamma \in \left(\hat{\gamma} \pm t_{\alpha/2, n-2} \frac{\hat{S}_R}{\sigma_d \sqrt{n}} \right), \quad (4)$$

donde $\hat{\gamma}$ son las estimaciones puntuales de la Tabla I y

$$\hat{S}_R^2 \triangleq \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i^2}{n-2}, \quad (5)$$

$$\sigma_d^2 = \frac{\sum_{i=1}^n 10 \log d_{Tx-Rx,i}}{n}. \quad (6)$$

$t_{\alpha/2, n-2}$ es el valor de la distribución t de Student-Fisher para un grado de significación $\alpha = 0.05$, que tiende a una distribución normal de media cero y varianza unidad para valores elevados de n (número de medidas), como es nuestro caso ($t_{\alpha/2} \rightarrow 1.960$).

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los resultados de la caracterización y modelado de las pérdidas de propagación a 700 MHz

y 5.9 GHz para comunicaciones vehiculares. Los resultados están basados en medidas experimentales realizadas en escenarios vehiculares. Junto con la estimación puntual mediante regresión de los parámetros del modelo, se indica el intervalo de confianza al 95 % del exponente de pérdidas. Los resultados aquí mostrados pueden integrarse en simuladores VANET con el fin de evaluar distintos protocolos de comunicación y configuraciones de redes vehiculares bajo condiciones de propagación próximas a la realidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la colaboración prestada en el proceso de adquisición de las medidas a José Andrés Campuzano, David Balaguer y Laura Moragón, así como a Bernardo Bernardo-Clemente y Antonio Vila-Jiménez por su apoyo en el desarrollo del sistema de medida.

REFERENCIAS

- [1] K. N. Qureshi and A. H. Abdullah, "A survey on Intelligent Transportation Systems," *Middle-East Journal of Scientific Research*, vol. 15, no. 5, pp. 629–642, Dec. 2013.
- [2] C.-X. Wang, A. Vasilakos, R. Murch, G. Stuber, X. Shen, W. Chen, and T. Kosch, "Guest editorial vehicular communications and networks: Part I," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 3, pp. 1–6, Jan. 2011.
- [3] —, "Guest editorial vehicular communications and networks: Part II," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 29, no. 3, pp. 497–500, Mar. 2011.
- [4] C. Mecklenbräuker, A. Molisch, J. Karedal, F. Tufvesson, A. Paier, L. Bernadó, T. Zemen, O. Klemp, and N. Czink, "Vehicular channel characterization and its implications for wireless system design and performance," *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1189–1212, July. 2011.
- [5] Ministry of Internal Affairs and Communications of Japan, Dec. 2013. [Online]. Available: <http://www.tele.soumu.go.jp/resource/search/myuse/use0303/335m.pdf>
- [6] L. Cheng, B. Henty, D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, "Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 GHz dedicated short range communication (DSRC) frequency band," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 1501–1516, Oct. 2007.
- [7] J. Kunisch and J. Pamp, "Wideband car-to-car radio channel measurements and model at 5.9 GHz," in *Proc. IEEE 68th Veh. Technol. Conf.*, Sept. 2008, pp. 1–5.
- [8] P. Paschalidis, M. Wisotzki, A. Kortke, W. Keusgen, and M. Peter, "A wideband channel sounder for car-to-car radio channel measurements at 5.7 GHz and results for an urban scenario," in *Proc. IEEE 68th Veh. Technol. Conf.*, Sept. 2008, pp. 1–5.
- [9] O. Renaudin, V. Kolmonen, P. Vainikainen, and C. Oestges, "Car-to-car channel models based on wideband MIMO measurements at 5.3 GHz," in *Proc. IEEE 3rd European Antennas and Propag. Conf.*, Mar. 2009, pp. 635–639.
- [10] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson, and A. Molisch, "Path loss modeling for vehicle-to-vehicle communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp. 323–328, Jan. 2011.
- [11] P. Paschalidis, K. Mahler, A. Kortke, M. Peter, and W. Keusgen, "Pathloss and multipath power decay of the wideband car-to-car channel at 5.7 GHz," in *Proc. IEEE 73rd Veh. Technol. Conf.*, May. 2011, pp. 1–5.
- [12] H. Fernández, L. Rubio, J. Reig, V. M. Rodrigo-Peñarrocha, and A. Valero, "Path loss modeling for vehicular system performance and communications protocols evaluation," *Mobile Netw. Appl.*, vol. 18, no. 6, pp. 755–765, Dec. 2013.
- [13] R. Sevlian, C. Chun, I. Tan, A. Bahai, and K. Laberteaux, "Channel characterization for 700 MHz DSRC vehicular communication," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2010, pp. 1–9, 2010.
- [14] J. M. Woodriddle, *Introductory Econometrics. A Modern Approach*. South-Western, 2003.