

# MODELO DE TOMA DE DECISIÓN AL INICIO DEL PERÍODO DE AMARILLO EN INTERSECCIONES SEMAFORIZADAS<sup>1</sup>

Fabiola E. Buitrago González<sup>2</sup> y Alberto M. Figueroa Medina<sup>3</sup>

**Resumen:** Las infracciones a la señal roja ("Red-Light Running", RLR) en una intersección con semáforo es un grave problema de seguridad. Un estudio de estos eventos fue llevado a cabo mediante el uso de tres cámaras de vídeo grabando de manera sincronizada la trayectoria de los vehículos de motor arribando a una intersección y el comportamiento de los conductores al inicio del período de cambio de la señal amarilla en una intersección del Municipio de Mayagüez en Puerto Rico. El estudio encontró que los tiempos promedio de entrada en los períodos de amarillo y de rojo en la intersección fueron de 3.00 segundos y 2.46 segundos, respectivamente, demostrando un alto nivel de agresividad de los conductores. Los análisis realizados demuestran la importancia de poder conocer la posición y la velocidad de los vehículos arribando a la intersección para estimar la probabilidad de que un conductor decida detenerse o seguir a través de la intersección. Modelos para estimar el tiempo de entrada en amarillo y la probabilidad de que un vehículo de motor siga o se detenga al inicio del período de amarillo fueron calibrados con datos recopilados de la distancia y la velocidad de los vehículos llegando a la intersección al momento del cambio de la señal.

**Palabras clave:** intersecciones con semáforos, infracciones a la señal roja.

## DECISION-MAKING MODEL AT THE BEGINNING OF THE YELLOW INTERVAL AT SIGNALIZED INTERSECTIONS

**Abstract:** The occurrence of Red Light Running (RLR) events at a signalized intersection is a road safety problem with a high potential for severe consequences. An analysis of these events was performed with the use of three coordinated video cameras installed at the side of one leg of an urban signalized intersection in the Municipality of Mayaguez, Puerto Rico. The video data was used to analyze the trajectories of motor vehicles approaching the intersection and to record the drivers' stop or go decisions at the start of the yellow change period. The observational study found a high level of driver aggressiveness at the intersection with an average yellow entry time and average red entry time of 3.00 and 2.46 seconds, respectively. Regression models were calibrated to estimate the probability of the driver stop or go decision at the intersection and the yellow entry time using the vehicle position and the speed at the moment of the start of the yellow change period.

**Key words:** red-light-running events, signalized intersections.

### INTRODUCCIÓN

La Década de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020 es una iniciativa a nivel mundial que busca promover la implantación de medidas concertadas y coordinadas para detener las aproximadas 1.3 millones de fatalidades que ocurren anualmente en carreteras (Sminkey, 2011). Los cinco pilares propuestos en el Plan de la Década de Acción son: 1) administración de la seguridad, 2) carreteras más seguras, 3) vehículos más seguros, 4) usuarios más seguros y 5) respuesta posterior al choque.

<sup>1</sup> Artículo recibido el 4 de diciembre de 2012 y aceptado para publicación el 20 de febrero de 2013.

<sup>2</sup> Consultor independiente, Ingeniero Civil, Mayagüez, PR 00680. E-mail: febuitrago@yahoo.com

<sup>3</sup> Catedrático Asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, PR 00681-9000. E-mail: alberto.figueroa3@upr.edu

En el año 2010 en los Estados Unidos, cerca de 33,000 personas perdieron su vida en un choque en la carretera (NHTSA, 2012a). El diez por ciento de los choques fatales en los Estados Unidos para ese mismo año se relacionaron a intersecciones con semáforos. En el 2010 en Puerto Rico ocurrieron 340 fatalidades en las carreteras, con cerca de 13 por ciento de los choques relacionados a intersecciones (NHTSA, 2012b).

La instalación de un semáforo en una intersección ayuda a controlar y separar el tráfico de movimientos en conflicto con el objetivo de mejorar la movilidad y distribuir la demora entre los diferentes accesos. La instalación de un semáforo puede además, en las circunstancias correctas, reducir la frecuencia y la severidad de los choques (Rodegerdts et al., 2004). Por otra parte, un semáforo indebidamente diseñado o localizado puede tener un efecto negativo en la seguridad de la carretera.

Una de las causas principales de los choques en una intersección con semáforo es cuando el conductor rebasa la línea de detención en una de las vías luego de que su señal roja ha sido expuesta, y como consecuencia, impacta otro vehículo de motor o usuario de la carretera. La Administración Nacional de Seguridad del Tránsito en la Carreteras (NHTSA, por sus siglas en inglés) reporta que los infractores de la señal roja en los Estados Unidos ocasionaron 676 fatalidades en el año 2008, representando un diez por ciento de los choques en intersecciones (2012a). En Puerto Rico se estima que cerca de 5,000 choques están relacionados anualmente a infracciones de la señal roja (Caro, 2006).

Los eventos RLR pueden estar asociados a una ingeniería inadecuada de la intersección (e.g. geometría, visibilidad, secuencia o tiempos de las fases) o a la conducta voluntaria o involuntaria de los usuarios (e.g. distracciones, exceso de velocidad). Para analizar el fenómeno de los eventos RLR se ha propuesto considerar el comportamiento de los conductores al inicio del periodo de cambio de amarillo y la decisión de parar o cruzar la intersección. Según Elmitiny et al. (2010), Gates et al. (2007) y Chang et al. (1985) la decisión de los conductores de vehículo de motor de detenerse por completo o de cruzar la intersección depende de la distancia y la velocidad a las cuales se encuentra el vehículo de motor al inicio del periodo de cambio de amarillo y su posición relativa en la sección de carretera. Bonneson et al. (2001) identificaron otros factores importantes como la presencia de intervalos cortos en una fase debido al flujo en el pelotón, el tipo de control del semáforo (actuado o tiempo fijo), la pendiente longitudinal del acceso, el intervalo de amarillo y la demora esperada para tomar la decisión de parar o cruzar la intersección. Otros estudios han investigado el tiempo de entrada en rojo para los vehículos RLR los cuales reflejan que los niveles altos de agresividad se asocian a una actitud intencional por parte de los conductores (Buitrago y Figueroa, 2010). Bonneson et al. (2002) examinaron 541 fases de semáforo en las que al menos ocurrió un evento RLR y demostraron que el tiempo promedio de entrada de rojo era menos de 0.5 segundos. Gates et al. (2007) observaron que la mayoría de los eventos RLR ocurren en un tiempo menor a un segundo después del comienzo de la señal roja.

Buitrago y Figueroa (2010) observaron la ocurrencia de eventos RLR en 32 accesos de nueve intersecciones con semáforos en Puerto Rico y encontraron que en promedio, un vehículo pasa la señal roja en una intersección cada 4 minutos. Un análisis de regresión reveló que las infracciones RLR aumentan según aumenta la razón de flujo de vehículos o la razón de flujo de vehículos con respecto a la longitud del ciclo.

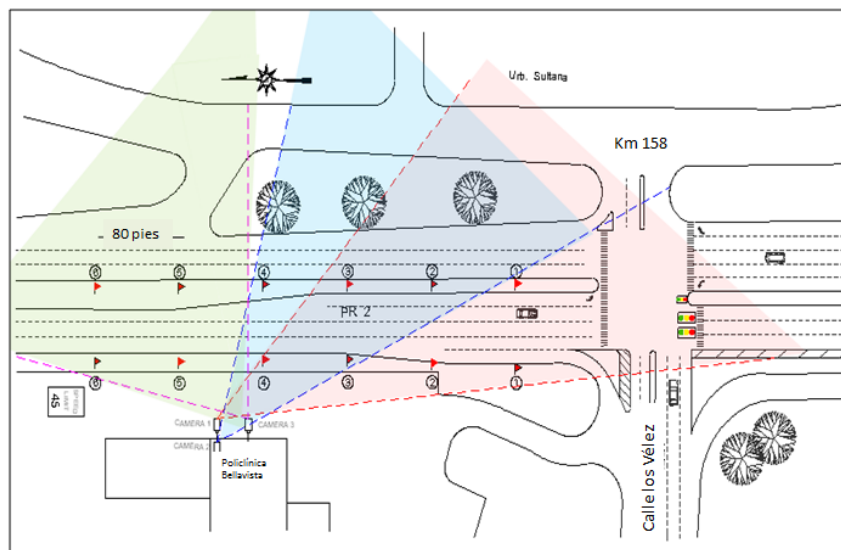
El objetivo de este artículo técnico es presentar los resultados de un análisis realizado de la trayectoria de vehículos arribando a una intersección con semáforo. El estudio recopiló datos de la posición y la velocidad de los vehículos arribando a la intersección al inicio del periodo de cambio de la señal amarilla. Esta información se utilizó para modelar la probabilidad de que un vehículo de motor se detenga o cruce la intersección, así como para determinar los cambios de velocidad que reflejen el comportamiento de los conductores en los eventos RLR. La finalidad del estudio es identificar estrategias locales para apoyar el sistema de carretera y proveer más seguridad a los usuarios.

## **METODOLOGÍA**

Para el estudio se utilizó el acceso norte de una intersección de cuatro accesos de la Carretera PR-2 en el Municipio de Mayagüez, al Oeste de Puerto Rico. La Carretera PR-2 es la vía arterial de mayor tráfico en el Municipio (hasta 70,000 vehículos por día en la cercanía a la intersección) recorriendo el área urbana de norte a sur. El acceso bajo estudio tiene cinco carriles: tres para el movimiento directo y dos carriles de deceleración, uno para virajes a la izquierda y otro para virajes a la derecha. El límite de velocidad es de 45 mph y el intervalo de amarillo es de 3 segundos.

## Toma de datos

Para registrar el comportamiento de los conductores al inicio de la señal amarilla se instalaron tres cámaras digitales de vídeo, apuntando hacia el acceso norte de la intersección, en la terraza de un edificio de tres pisos situado a 300 metros antes de la intersección, según muestra la Figura 1. Desde este sitio era posible observar el acceso hasta la línea de detención y las caras del semáforo. Un sistema de marcas de referencia a ambos lados de la calzada fue usado, a intervalos de 80 pies, a lo largo del acceso a partir de la línea de detención hasta 480 pies. Estas marcas fueron utilizadas para medir en los videos el tiempo que le toma a un vehículo pasar por cada tramo y calcular las velocidades de los vehículos individuales.



**Figura 1: Posición de las cámaras de vídeo con respecto a la intersección.**

La cámara 1 se colocó apuntando hacia la línea de detención en la intersección y fue utilizada para grabar el tráfico pasando a través de las marcas 1, 2 y 3. La cámara 2 graba los vehículos hasta aproximadamente 340 pies de la línea de detención, incluyendo las marcas 3 y 4. La cámara 3 cubre el último tramo a una distancia de 480 pies desde la línea de detención (marcas 4, 5 y 6).

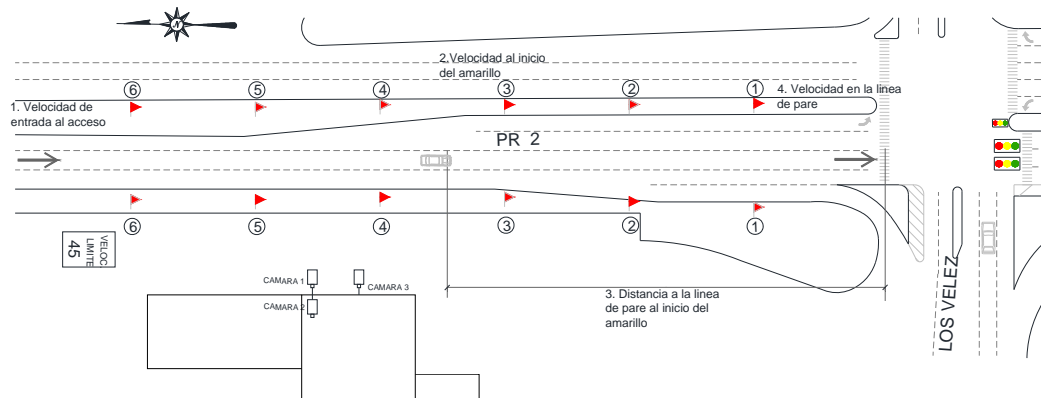
El tráfico vehicular y el tiempo de los semáforos se grabaron por un total de 10 horas durante periodos no pico en cuatro días de una semana. Los vídeos fueron sincronizadas utilizando el programa comercial Boilsoft Video Splitter v5.16 teniendo en cuenta la superposición entre los vídeos. De esta manera, se obtuvo continuidad en la trayectoria de los vehículos desde el tramo a 480 pies y hasta la línea de detención. Se grabó a una razón de video de 30 cuadros por segundo con un error estimado de 0.03 segundos garantizando un alto grado de precisión de los eventos relacionados con el tiempo en el estudio.

El arreglo de las tres cámaras permitió recopilar las siguientes cuatro variables para cada vehículo individual arribando a la intersección, según muestra la Figura 2:

- Velocidad a la llegada del área de estudio en el acceso
- Velocidad al inicio del periodo de cambio de la señal amarilla
- Distancia a la línea de detención al inicio del periodo de cambio de la señal amarilla
- Velocidad en la línea de detención en la intersección

La velocidad del vehículo a la llegada del área de estudio se utilizó para determinar la velocidad promedio a la cual llegaron los vehículos a la intersección antes del inicio del amarillo. La velocidad del vehículo y la distancia a la línea de detención al inicio del amarillo se utilizaron para determinar la distribución de los vehículos al inicio del

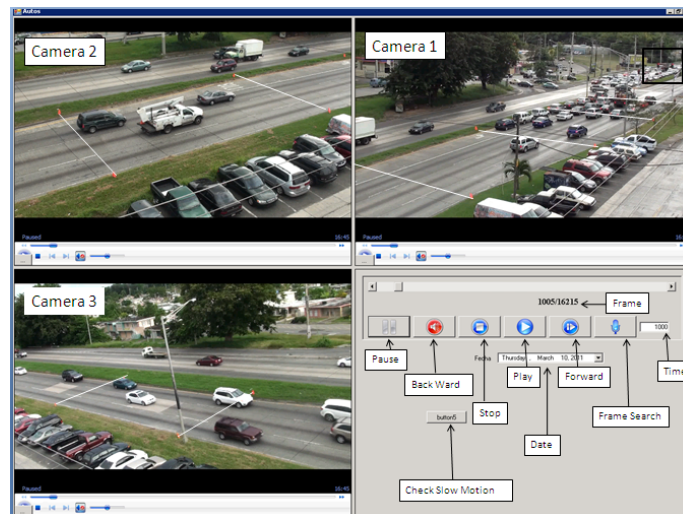
período de amarillo. La deceleración y la aceleración de los vehículos se determinaron usando la velocidad del vehículo en la línea de detención.



**Figura 2: Variables de la trayectoria del vehículo al arribar a la intersección.**

### Extracción de los datos

Para extraer los datos de las cámaras se desarrolló un programa llamado SVDCS (Simultaneous Video Data Collector System, por sus siglas en inglés) que permite manipular los videos en un solo equipo. La pantalla del programa se muestra en la Figura 3. Usando esta herramienta fue posible grabar los eventos continuamente desde el tramo ubicado a 480 pies hasta la línea de detención. El programa SVDCS puede ejecutar el vídeo en cámara lenta a una velocidad de 3 cuadros por segundo aumentando la precisión de los datos recopilados.



**Figura 3: Pantalla del programa SVDCS para la extracción de datos de los vídeos.**

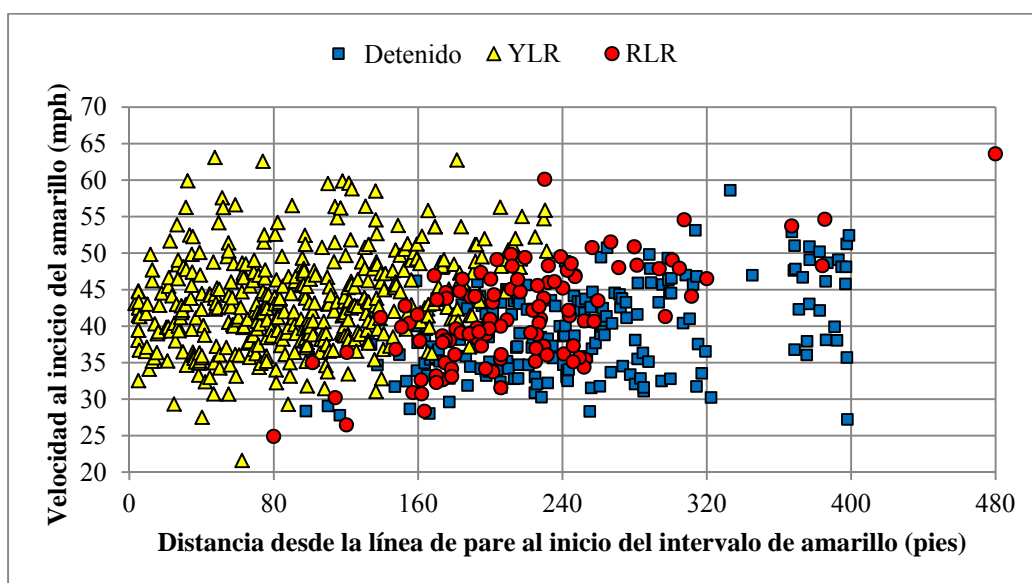
El programa SVDCS fue usado para recopilar los datos de los videos manualmente. Las funciones de recolección de datos fueron programados para tomar los siguientes eventos: cambios en los tiempos del semáforo (verde, amarillo y rojo); decisión del conductor de parar o cruzar la intersección; si el vehículo era líder o no del pelotón, el tipo de vehículo (pesado si su peso bruto es mayor de 11,001 libras, liviano si no, según la Ley 22 de vehículos y tránsito de Puerto Rico, 2000), el carril por donde transitaba el vehículo y si el evento es RLR (si el vehículo pasó o no la señal roja). Con estas observaciones se calculó la distancia desde el vehículo a la línea de detención al inicio de la señal amarilla, la velocidad promedio del vehículo y la velocidad al inicio de la señal amarilla. Se tomaron datos para cada vehículo que se aproximó a la intersección al cambiar de la señal verde a la señal amarilla y luego a la señal roja. El vehículo líder se identificó como el vehículo que estaba al frente del pelotón y que no tuviera ningún vehículo adelante que le impidiera que este acelerara para cruzar la intersección. La

distancia al otro vehículo fue tomada como 350 pies. Con base en cálculos estadísticos, se determinó que para un nivel de confianza de 95% y un error permitido de 5%, el tamaño de la muestra requerida debía ser un mínimo de 505 vehículos.

### Análisis de los datos

El estudio incluyó datos de 750 vehículos. De este total, 113 vehículos fueron adjudicados a un evento RLR y 437 vehículos cruzaron la intersección durante la señal amarillo (evento llamado “Yellow-Light Running” o YLR). De la muestra de vehículos, 202 vehículos fueron identificados como líderes y 548 como seguidores. Los vehículos pesados incluidos en la muestra aproximándose a la intersección al inicio del amarillo fueron 28, correspondiente al 4.02% de la muestra.

**Distribución de vehículos al inicio del amarillo.** La Figura 4 muestra la relación entre la posición de cada vehículo y su velocidad en el segmento al momento del inicio de la señal amarilla, así como el evento si el vehículo pasó la señal en amarillo o en rojo o si se detuvo en la intersección. La línea de detención del acceso está representada por la distancia de valor cero en el eje horizontal.



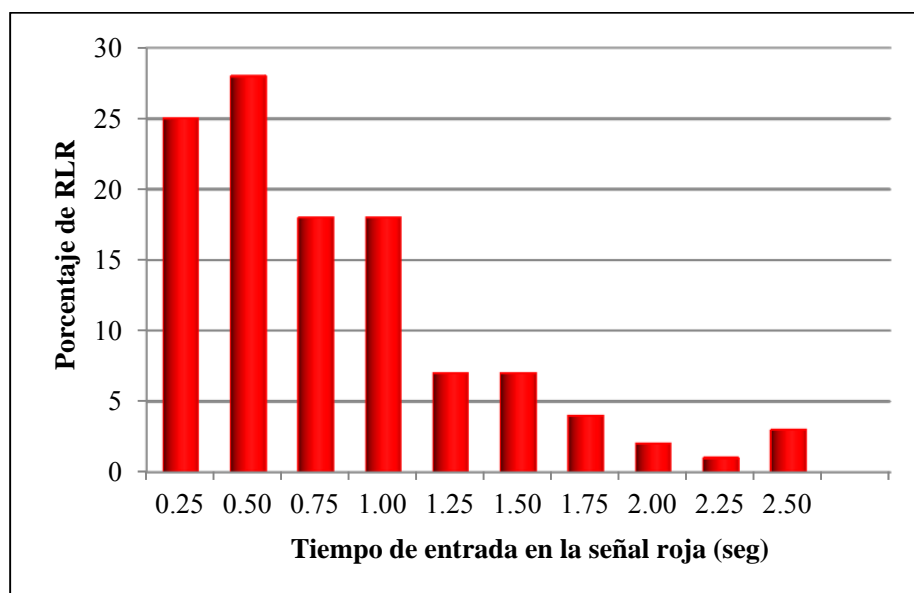
**Figura 4: Relación de la distancia desde la línea de detención y la velocidad con la decisión de parar o seguir al inicio de la señal amarilla.**

Al aproximarse a la intersección, el conductor debe percibir el cambio de la señal, reaccionar y tomar la decisión de detenerse o de cruzar la intersección. En la Figura se observa que todos los vehículos que se encontraron a menos de 80 pies de la línea de detención al inicio del amarillo cruzaron la intersección. De todos los vehículos observados que se encontraron en el tramo de 80 a 160 pies, el 13.1 por ciento se detuvo o cruzó la intersección en la señal roja. Las velocidades de los vehículos en este tramo variaron de 25 a 62 mph. En el segmento de 160 a 240 pies, la mayoría de los vehículos (68.6 por ciento) o se detuvieron en la intersección o la cruzaron en rojo. Los vehículos que pasaron la intersección en amarillo tuvieron que acelerar para alcanzar a cruzar. Ninguno de los vehículos que se encontraban en el segmento de 240 a 320 pies al iniciar la señal amarilla alcanzó a cruzar la intersección durante el periodo de la señal amarilla. El 73.1 por ciento de estos conductores tomó la decisión de parar, mientras que el 26.9 por ciento de estos pasaron durante la señal roja.

**Tiempo de entrada en rojo.** Los eventos RLR ocurrieron en un periodo de tiempo con un rango de 0.02 a 2.46 segundos después de iniciar la señal roja. Si bien puede ser aceptable que un alto porcentaje de los vehículos en el segmento que extiende desde 0 hasta 160 pies cruce la intersección en amarillo, es importante anotar que un gran número de vehículos situados más lejos de la línea de detención decide cruzar la intersección, aun durante el periodo de rojo. La alta frecuencia de eventos RLR es una indicación clara del comportamiento agresivo del conductor en

esta intersección. Además, los percentiles 15, 50 y 85 de los tiempos de entrada después del inicio de la señal roja para estos vehículos fueron 0.21, 0.55 y 1.25 segundos, respectivamente.

La Figura 5 presenta la distribución del tiempo de entrada de los vehículos en la señal roja. Esta variable indica el período de tiempo transcurrido después del inicio de la señal roja, cuando los vehículos cruzaron la línea de detención. La mayoría (79 por ciento) de los vehículos RLR cruzaron la intersección en el primer segundo después de que terminó el periodo de amarillo. Casi una cuarta parte de los vehículos (21 por ciento) cruzó la intersección después de pasar el primer segundo, aumentando la probabilidad de un choque en ángulo, debido a que los vehículos en conflicto tienen el derecho de paso.

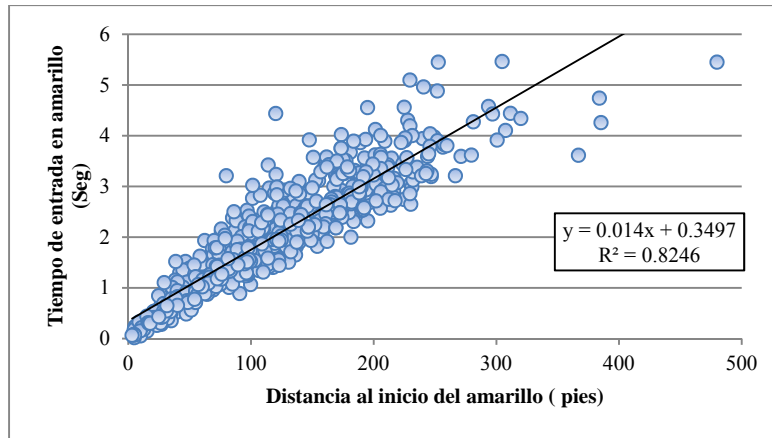


**Figura 5: Distribución de vehículos según su tiempo de entrada en señal roja.**

Los estudios del tiempo de entrada en rojo realizados por Bonneson et al. (2002) obtuvieron percentiles 50 y 80 de 0.5 y 1.0 segundos, respectivamente y aquellos realizados por Gates et al. (2007) obtuvieron percentiles 15, 50 y 85 de 0.02, 0.30 y 0.84 segundos, respectivamente. Cabe resaltar el hecho de que en la intersección evaluada, los conductores son más agresivos basados en los altos valores de tiempos de entrada a la intersección durante la señal roja. Como resultado, esto implica movimientos más conflictivos y aumenta la probabilidad de choques por RLR.

**Análisis del tiempo de entrada en amarillo.** Una medida contribuyente en el análisis de eventos RLR es la duración de tiempo desde el momento en que la señal amarilla empieza hasta que el vehículo cruza la intersección. La Figura 6 muestra la relación del tiempo de entrada en amarillo y la distancia a la línea de detención a la que se encuentra el vehículo en ese momento. Dado que el periodo de amarillo de la intersección estudiada es de 3.0 segundos, los puntos localizados por encima de este valor en el eje vertical se traducen en un evento RLR. Cabe señalar, que entre mayor sea este valor, mayor es la probabilidad de choque por RLR. Con estos datos se calibró un modelo de regresión lineal, que muestra la relación entre las variables con un coeficiente de determinación de 0.82.

La Tabla 1 presenta un resumen descriptivo de los tiempos de entrada en el periodo de amarillo. En promedio, el tiempo de entrada en amarillo es de 2.06 segundos con el valor máximo de 5.46 segundos, correspondiente a un intervalo de 2.46 segundos después del inicio de la señal roja. Como resultado del análisis, el tiempo promedio de entrada en amarillo fue mayor para los vehículos que eran líderes (2.10 segundos) que para los vehículos seguidores (2.04 segundos). Los valores promedio de tiempo de entrada en amarillo según el tipo de vehículo fueron similares (2.05 y 2.06 segundos, respectivamente). Estos datos podrían demostrar una tendencia de que los vehículos líderes cruzan la línea de detención por un intervalo mayor por la posibilidad de un choque posterior.



**Figura 6: Relación entre el tiempo de entrada en amarillo y la posición del vehículo.**

Con base en un modelo de regresión múltiple, las variables significativas para explicar el tiempo de entrada en amarillo fueron la distancia y la velocidad al inicio del amarillo (las dos variables con un valor-p = 0.000). Estas dos variables explican el 89 por ciento de la variabilidad del modelo. Las otras variables sobre el tipo de vehículo (valor-p = 0.642), si el vehículo era líder o no (valor-p = 0.328) y el carril (valor-p = 0.071) no fueron significativas para el modelo.

**Tabla 1: Estadísticas descriptivas para el tiempo de entrada en el período de amarillo.**

Factor	Sub-nivel	Cantidad	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo
Tipo de vehículo	Pesado	24	2.06	0.27	0.31	4.88
	Liviano	526	2.05	0.04	0.02	5.46
Líder /Seguidor	Seguidor	406	2.04	0.05	0.02	5.45
	Líder	144	2.10	0.09	0.14	5.46
Carril	Izquierdo	180	2.11	0.08	0.06	5.46
	Central	228	1.99	0.07	0.02	4.74
	Derecho	142	2.08	0.09	0.15	5.10

**Análisis de la velocidad al inicio del período de amarillo.** La Tabla 2 presenta un resumen descriptivo de las velocidades de los vehículos al inicio del período de cambio a la señal amarilla. Las velocidades se obtuvieron considerando todos los vehículos que llegaron a la intersección al inicio de la señal amarilla. La velocidad de los vehículos al inicio de la señal amarilla sigue una distribución normal con una velocidad promedio de 41.7 mph y una desviación estándar de 6.48 mph. La velocidad tiene un rango amplio de 42 mph, desde 21.6 mph a 63.6 mph. El percentil 85 es de 48.3 mph, mientras que el límite de velocidad de la carretera es de 45 mph, por lo que la velocidad de operación excede este valor por solo 3.3 mph. Las velocidades promedio más altas corresponden a los vehículos líderes (43.95 mph), en comparación con los vehículos que son seguidores (41 mph). Los vehículos que decidieron cruzar la intersección tenían una velocidad promedio más alta (42.95 mph) que los vehículos que se detuvieron (38.48 mph). Estos resultados son consistentes con los patrones de tráfico esperados.

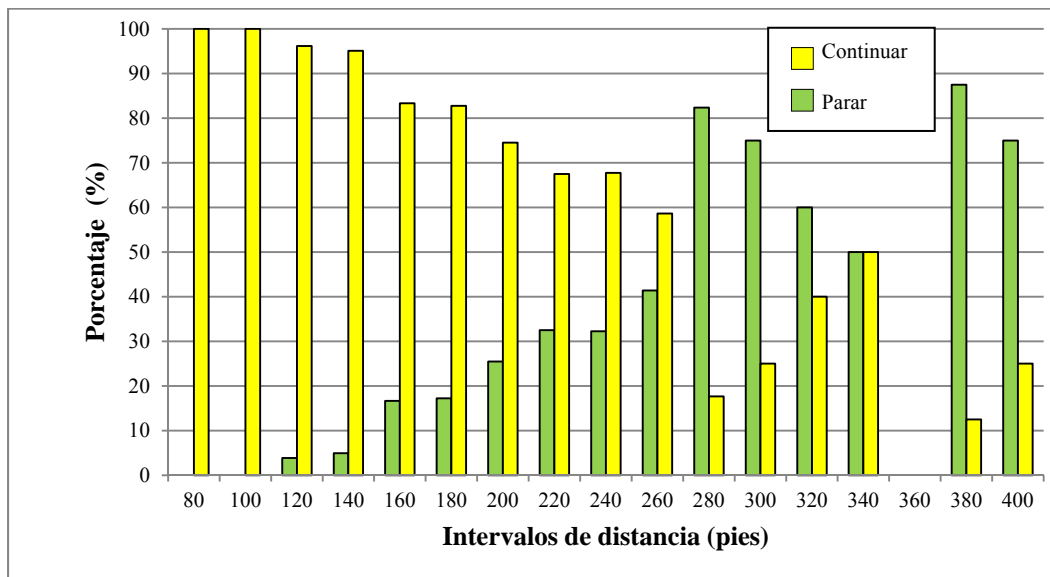
El promedio de las velocidades medias dependiendo del tipo de vehículo no parecen ser significativamente diferentes (vehículo liviano = 41.79 mph, en comparación con la velocidad promedio del vehículo pesado = 40.84 mph). Lo mismo aplica para los vehículos que se pasan en rojo (41.37 mph) y los vehículos que no se pasan en rojo (41.82 mph), mientras que existe diferencia entre los vehículos por carril y son también diferentes a las características generales de las velocidades del tráfico que generalmente opera en las intersecciones.

**Tabla 2: Estadísticas descriptivas para la velocidad al inicio del período de amarillo.**

Factor	Sub-Nivel	N	Promedio (mph)	Desviación estándar (mph)	Mínimo (mph)	Máximo (mph)
Tipo de vehículo	Vehículo pesado	28	40.84	1.15	28.70	56.30
	Vehículo liviano	722	41.79	0.24	21.56	63.60
Líder/Seguidor	Seguidor	548	40.9	0.26	21.56	63.13
	Líder	202	43.95	0.49	24.91	63.60
Para/Sigue	Para	200	38.48	0.38	21.56	53.14
	Sigue	550	42.95	0.27	21.62	63.60
RLR	No RLR	637	41.82	0.25	21.56	63.13
	RLR	113	41.37	0.62	24.91	63.60
Carril	Izquierdo	248	39.81	0.39	21.62	63.60
	Medio	302	42.81	0.34	31.56	63.13
	Derecho	200	42.58	0.49	26.48	62.60

**Decisión de parar o seguir.** La seguridad de intersecciones con semáforos depende en gran medida de la decisión que toma el conductor de parar o seguir una vez iniciado el cambio en la señal amarilla. Del estudio se observó que 200 conductores decidieron parar, mientras que 550 conductores tomaron la decisión de cruzar la intersección, aunque la señal ya había cambiado de verde a amarilla.

Las Figuras 7 y 8 presentan la distribución de vehículos basado en la decisión de parar o seguir al inicio de la señal amarilla y la distribución de los eventos RLR, dependiendo de la posición en la que se encontraban los vehículos, respectivamente. La Figura 7 muestra que a medida que la distancia a la intersección en la cual se encuentra el vehículo aumenta, la proporción de vehículos parando también aumenta y la probabilidad de vehículos continuando a través de la intersección disminuye, hasta una distancia de 280 pies. En el tramo de 280 a 340 pies, la proporción de vehículos parando disminuye mientras que la proporción de vehículos continuando aumenta hasta 50 por ciento. Es en este tramo que se observa la mayor variabilidad en la decisión de parar o continuar.

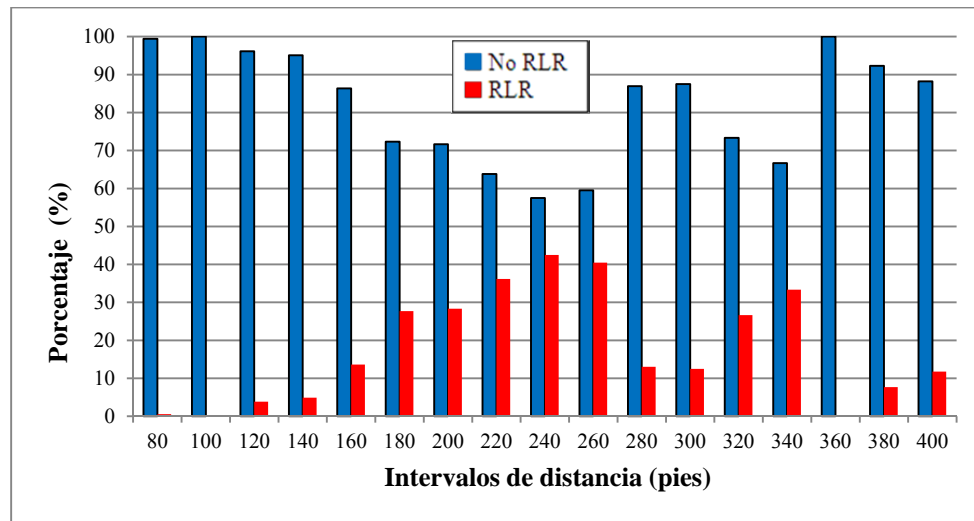


**Figura 7: Distribución de la decisión de parar o seguir en base a la posición de los vehículos.**

La Figura 8 demuestra que la mayor proporción de eventos RLR (aproximadamente un 40 por ciento) se presenta en el tramo de 180 a 260 pies de la intersección alcanzando. Los eventos RLR disminuyen en el tramo de 260 a 320



pies y vuelven a aumentar en el tramo de 320 a 360 pies, indicando un alto nivel de agresividad de los conductores. La tendencia esperada era que los eventos RLR mantuvieran la reducción a medida que la posición de los conductores sea más lejana a la intersección. El aumento inesperado en los eventos RLR podría estar asociado a la zona de decisión en la intersección, por lo que se amerita desarrollar análisis adicionales.



**Figura 8: Distribución de los eventos RLR en base a la posición de los vehículos.**

**Modelo de decisión de parar o seguir.** Para determinar la probabilidad de que un vehículo que llegue a la intersección al inicio de la señal amarilla se detenga o continúe hasta cruzar la intersección, se desarrolló un modelo de regresión logística binaria, utilizando el programa estadístico SPSS 17<sup>®</sup>. El modelo se describe como:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-z_i}} \quad (1)$$

donde  $P_i$  es la probabilidad de que el vehículo  $i$ -ésimo se detenga y  $z_i$  es el resultado de una función lineal de diferentes factores (variables explicativas), con la forma:

$$z_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_k x_k \quad (2)$$

donde  $\beta_0$  es la constante o el término independiente y  $\beta_i$  se refiere a los coeficientes de las covariables mientras  $x_i$  son las covariables que forman parte del modelo. Las variables que fueron evaluadas para ser incorporadas en el modelo incluyeron:

- Distancia del vehículo desde la línea de detención al inicio de la señal amarilla (pies)
- Velocidad del vehículo al inicio de la señal amarilla (mph)
- Variable categórica sobre la decisión de si el vehículo se detiene en la intersección
- Variable categórica sobre la condición de si el vehículo es líder del pelotón
- Variable categórica sobre la posición del vehículo en los carriles del acceso
- Variable categórica del tipo de vehículo

La Tabla 3 presenta los factores que resultaron ser estadísticamente significativos en la probabilidad de parar con un nivel de confianza del 95 por ciento. Estas variables incluyen la distancia a la cual se encontraban los vehículos

desde la línea de detención y la velocidad del vehículo al inicio del cambio de la señal amarilla. El valor del  $R^2$  de Nagelkerke corresponde a 0.66.

**Tabla 3: Resultados de la calibración del modelo sobre la decisión de parar o seguir.**

Factores	$\beta$	S.E.	Wald	df	Sig.	Exp( $\beta$ )	95% I.C. para EXP( $\beta$ )	
							Inferior	Superior
Distancia	.030	.002	158.456	1	.000	1.030	1.026	1.035
Velocidad	-.226	.025	79.793	1	.000	.798	.759	.838
Constante	2.541	.856	8.817	1	.003	12.687		

El modelo resultante sobre la probabilidad de que un conductor tome la decisión de parar en la intersección ante el comienzo de la señal amarilla tiene la siguiente forma:

$$P_i = \frac{1}{1 + e^{-(2.541 + 0.03(Distancia) - 0.226(Velocidad))}} \quad (3)$$

La velocidad tiene un coeficiente negativo lo que implica que los conductores que viajen a velocidades mayores al inicio del cambio a la señal amarilla son más propensos a tomar la decisión de seguir hasta cruzar la intersección. La razón de probabilidades para la velocidad es de 0.798 (IC = 0.759 a 0.838), indicando que los vehículos que viajen 1 mph más rápido que la velocidad media, en promedio, tienen una probabilidad de 0.798 veces menos de detenerse en la intersección.

La distancia del vehículo al momento del inicio de la señal amarilla tiene un coeficiente positivo lo que implica que los conductores localizados a una distancia mayor de la línea de detención tienen una probabilidad mayor de tomar la decisión de parar. El valor de la razón de probabilidades para la distancia es de 1.030 (IC = 1.026 a 1.035) indicando que un conductor que esté localizado un pie más alejado que la distancia media tiene una probabilidad de 1.030 veces mayor de detenerse en la intersección.

## CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento del conductor y su actitud ante las señales en una intersección tiene gran relevancia en la búsqueda de soluciones que reduzcan las muertes y las lesiones en las carreteras. Uno de los problemas más críticos en intersecciones son las infracciones a la señal roja, las cuales pueden estar asociadas a factores voluntarios e involuntarios de los conductores.

En este artículo técnico se presentaron los resultados de un estudio que mediante el uso de cámaras de video estratégicamente colocadas en el lateral de un acceso a una intersección pudo seguir las trayectorias de los vehículos y observar las decisiones de los conductores sobre detenerse o seguir cruzando la intersección ante el cambio de la señal. La oportunidad de observar estos eventos permitió confirmar y calibrar los efectos significativos de la velocidad y la posición del vehículo con respecto a la línea de detención.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas en las velocidades de los vehículos que cruzaron la intersección al inicio de la señal amarilla en comparación con los vehículos que se detuvieron. Estas velocidades variaron dependiendo de la distancia a la intersección a la cual se encontraban los vehículos en ese instante. Los vehículos que cruzan la intersección tienden a moverse a velocidad constante o tienden a acelerar, mientras que los vehículos que se detienen al inicio de la amarilla deceleran mientras se aproximan a la intersección.

Con base en la duración del tiempo de entrada a la intersección en rojo, los eventos RLR de este estudio muestran un mayor grado de agresividad en los conductores que en otras jurisdicciones. Es necesario entonces estudiar la relación entre la probabilidad de choques en ángulo de ocurrir un evento RLR o la probabilidad de un choque posterior del vehículo detenerse. Una fase futura de investigación conlleva la calibración de los parámetros del modelo de la zona de decisión en la intersección.

Basado en el modelo de probabilidad de la decisión de parar o seguir, la distancia del vehículo desde la línea de detención y la velocidad al inicio del amarillo son los factores estadísticamente significativos en la determinación de la probabilidad de que los conductores paren o no en una intersección ante el cambio de la señal. Una posible aplicación de este modelo de toma de decisión de seguir o parar es mediante la utilización de sensores en la carretera para extender los tiempos de verde o amarillo ajustándose a base de las velocidades y las posiciones de los vehículos a tiempo real. Además, con el uso de la tecnología de infraestructura y vehículos más seguros, la intersección puede recibir esta información y “comunicarse” con el vehículo para permitir una reacción más segura del conductor ante el cambio de la señal.

## REFERENCIAS

- Bonneson, J., Brewer, M. y Zimmerman, K. (2001). “Review and Evaluation of Factors that Affect the Frequency of Red-Light-Running”, Report FHWA/TX-02/4027-1, Texas Department of Transportation, Texas.
- Bonneson, J., Zimmerman, K. y Brewer, M. (2002). “Engineering Countermeasures to Reduce Red-Light Running”, Report FHWA/TX-03/4027-2, Texas Transportation Institute, Texas.
- Buitrago, F. y Figueroa, A. (2010). “Red Light Running Study at Signalized Intersections”, *Revista Dimensión del Colegio de Ingenieros y Agrimensores de Puerto Rico*, Vol. 24, No. 3, pp 17-20.
- Caro, L. (2006). “Aumenta Multa por Rebasar Luz Roja”, *Periódico Primera Hora*, viernes, 29 de diciembre de 2006, Puerto Rico.
- Chang, M., Messer, C. J., y Santiago, A. J. (1985). “Timing Traffic Signal Change Intervals Based on Driver Behavior”, *Transportation Research Record*, No. 1027, pp. 20-30.
- Elmitiny, N., Yan, X., Radwan, E., Russo, C. y Nashar, D. (2010). “Classification Analysis of Driver’s Stop/Go Decision and Red Light Running Violation”, *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 42, pp. 101-111.
- Gates, T., Noyce, D., Laracuente, L. y Nordheim, E. (2007). “Analysis of Driver Behavior in Dilemma Zones at Signalized Intersections”, *Transportation Research Record*, No. 2030, pp. 29-39.
- National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA (2012a). *Fatal Analysis Reporting System Encyclopedia*, National Highway Traffic Safety Administration, United States Department of Transportation, Washington, D.C.
- National Highway Traffic Safety Administration – NHTSA (2012b). *Traffic Safety Facts: Puerto Rico 2007-2011*, National Highway Traffic Safety Administration, United States Department of Transportation, Washington D.C.
- Rodegerdts, L., Nevers, B., Robinson, B., Ringert, J., Koonce, P., Bansen, J., Nguyen, T., McGill, J., Stewart, D., Suggett, J., Neuman, T., Antonucci, N., Hardy, K., y Courage, K. (2004). “Signalized Intersections: Informational Guide”, Report FHWA-HRT-04-091, Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, Washington, D.C.
- Sminkey, L. (2011). *Plan Mundial para la Década de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020*. World Health Organization, Ginebra, Suiza.

