

HACIA LA COMPRENSIÓN DE LA DISCIPLINA DE PISTAS: CARACTERIZACIÓN DE LA CORRELACIÓN TEMPORAL DE LA POSICIÓN LATERAL DE VEHÍCULOS EN AUTOPISTAS.

Magdalena Vargas, Universidad de los Andes mtvargas@miuandes.cl

Rafael Delpiano Costabal, Universidad de los Andes rdelpiano@uandes.cl

RESUMEN

La reciente extensión de los modelos microscópicos de tráfico a la dimensión lateral ha contribuido a la reproducción y explicación de diversos fenómenos. La inminente irrupción de los vehículos autónomos, por su parte, presenta nuevos desafíos a la comprensión de esa dimensión en el tráfico actual, para lograr una convivencia armónica.

En este artículo se estudia, mediante técnicas estadísticas, las relaciones entre variables cinemáticas de vehículos en tráfico ininterrumpido, con especial atención a la autocorrelación temporal de la posición lateral, y otras en esa misma dimensión. El objetivo es que sirva de insumo para perfeccionar modelos de tráfico bidimensionales.

Palabras Clave: Disciplina de Pistas, Modelo de Tráfico en Dos Dimensiones, Kernel Density Estimation.

ABSTRACT

The extension in recent years of microscopic traffic models to the lateral dimension, has contributed to reproduce and explain a number of phenomena. In turn, the impending irruption of autonomous vehicles poses new challenges to the understanding of that dimension on current traffic to achieve a harmonious coexistence.

In this paper, statistical tools are used to study the relationship between cinematic variables of vehicles in uninterrupted traffic, with special attention to the temporal autocorrelation of lateral position, and others in that same dimension. The goal is that this can be an input to improve two-dimensional traffic models.

Keyword: Lane Discipline, Two-Dimensional Traffic Model, Kernel Density Estimation.

1. INTRODUCCIÓN

En 60 años de desarrollo, los modelos microscópicos de tráfico han mostrado ser de gran utilidad para la simulación y la comprensión de diversos fenómenos. En los últimos diez años, se ha comenzado a prestar atención a la dimensión lateral del tráfico, principalmente en contextos acotados, como el tráfico no basado en pistas (Gunay, 2007; Jin et al., 2010), los espacios compartidos con peatones (Fellendorf et al., 2012), o la ejecución gradual de los cambios de pista (Yang et al., 2016).

En trabajos previos (Delpiano, 2015) se ha verificado mediante un modelo microscópico de tráfico en dos dimensiones que la dimensión lateral permite reproducir con mayor fidelidad fenómenos como la fricción lateral, la caída de capacidad y la anomalía colateral. En dicho modelo se definían tres *fuerzas sociales* (de aceleración, repulsión y pista) que representan las principales tendencias de comportamiento que gobiernan las decisiones de aceleración de los conductores en ambos ejes.

Un paso lógico dentro de esta evolución es la modelación de la disciplina de pistas. Se entiende por disciplina de pistas la capacidad de los conductores de mantenerse centrados en la pista o carril por el que han decidido viajar. Se observa que la posición lateral de los vehículos dentro de cada pista se puede estudiar como una muestra de una variable aleatoria que interesa caracterizar. Por ejemplo, en lugares con mejor disciplina de pistas se espera una desviación estándar menor.

Adicionalmente, comprender la manera en que los conductores humanos toman decisiones respecto a su posición lateral, contribuirá a la programación de conductores autónomos que convivan mejor con sus pasajeros y los vehículos circundantes.

Gunay (2007) compara la disciplina de pista en sitios de Turquía y Alemania, en la forma de histogramas de posición lateral, mostrando una desviación estándar mucho menor en este último país. Recientemente se ha mostrado que los conductores prefieren posiciones laterales más lejanas cuando tienen otro vehículo al lado (Delpiano et al., 2015), y que este efecto sería mayor al aumentar la velocidad (Budhkar y Maurya, 2017), tal como había sido conjecturado. Quedan aún varias preguntas por responder de cara tanto a la modelación como a la validación de supuestos de las actuales tecnologías de automatización de vehículos.

Por ejemplo, interesaría saber en qué medida aumenta el distanciamiento lateral con la velocidad, y qué forma tiene (lineal, cuadrático, etc.), con qué intensidad buscan centrarse los vehículos, en función de su posición y velocidad relativas al centro de la pista, o si la posición lateral varía en mayor medida o no al aumentar la velocidad. Sobre esto último hay argumentos a favor de ambas alternativas: por un lado, a igual dirección y mayor velocidad longitudinal, es natural que la lateral también aumente, por otro la reducción del campo visual con la velocidad podría ayudar a una mejor disciplina de pistas. Finalmente, en relación a los vehículos que se centran automáticamente (como el Autopilot de Tesla), existe la duda razonable acerca de si los conductores humanos manejan preferentemente en un lugar distinto del centro de la pista. De ser así, la interacción con esta tecnología podría aumentar el efecto de la fricción lateral, sobre todo en pistas angostas.

En el presente artículo, se busca dar respuesta a algunas de estas interrogantes, mediante la caracterización de la interacción temporal e instantánea de las variables cinemáticas de vehículos en autopistas. Específicamente, se busca estudiar cómo la posición y velocidad lateral, así como

la velocidad longitudinal de un vehículo en un instante de tiempo influyen en su posición lateral en el futuro próximo.

Para ello, se seleccionará trayectorias de vehículos que no cambien de pista en el conjunto de datos de la autopista I-80 del programa NGSIM (Federal Highway Administration, 2006). Tomando precauciones sobre el ruido, se reconstruirá, a través de estimación de densidad con *kernel* (*kernel density estimation*, o KDE) la densidad de probabilidad conjunta:

$$P(x(t + \tau), \dot{x}(t), \dot{y}(t)), \quad (1)$$

donde x y \dot{x} representan respectivamente la posición y la velocidad en dirección lateral, \dot{y} representa la velocidad longitudinal y τ un intervalo de tiempo breve. También se entregará resultados de inferencia de las distribuciones de probabilidad derivadas relevantes (p.ej., $E[x]$).

Los resultados obtenidos, además de caracterizar la disciplina de pistas de los conductores estudiados, servirán como insumo para el perfeccionamiento de la fuerza social de pista que perfeccione el modelo previamente desarrollado, y como fuente de estándares de calibración.

La estimación de densidad con *kernel* es una técnica no paramétrica propuesta a mitad del siglo XX para la estimación de la función de densidad de probabilidad de variables aleatorias (uni- o multivariadas) a partir de una muestra, convolucionando los datos con una función núcleo (*kernel*), generalmente gaussiana. Como resultado se obtiene una función continua, poco dependiente de los *outliers*. En la elección de un kernel y ancho de banda adecuados está la clave para no perder fidelidad a nivel local. Silverman (1986) propuso la siguiente regla para determinar un ancho de banda, h , apropiado para datos aproximadamente normales:

$$h = \left(\frac{4\hat{\sigma}^5}{3n}\right)^{\frac{1}{5}} = 1,06\hat{\sigma}n^{-\frac{1}{5}} \quad (2)$$

El conjunto de datos I-80 de NGSIM, fue obtenido en 2005 en la autopista interestatal 80, en Emeryville (California, EE.UU.). Recoge las trayectorias en ambos ejes para todos los vehículos durante 45 minutos de tráfico ininterrumpido, en un segmento de poco más de 500 m de longitud cercano a rampas de entrada y salida. Proporciona la posición lateral y longitudinal de los vehículos cada 0,1 segundos, así como su pista y un número identificador que permite hacer seguimiento de vehículos individuales, entre otros datos.

Los datos de NGSIM han sido criticados por el ruido en la medición: 1) Por un lado, el análisis de los datos confirma lo dicho por Montanino y Punzo (2013) en el sentido de la existencia de un ruido atribuible a la técnica de detección. Dicho ruido incluye, según ellos, un número de *outliers* excesivamente desviados, lo que sugiere una distribución aleatoria de cola más bien pesada. Lamentablemente, no existe una mejor caracterización de dicha distribución, ni se puede asumir que no induzca un sesgo a las mediciones: p.ej., al menos algunas de las cámaras están ubicadas a la derecha de la autopista, lo que podría incidir en la posición lateral de los vehículos. 2) El mismo análisis permite comprobar una segunda fuente de sesgo en el post-procesamiento de las trayectorias: en efecto, se observa un exceso improbable de velocidades longitudinales múltiplos de 5 ft/s, y consiguientemente un aumento de aceleraciones iguales a cero (esto último se verifica también en dirección lateral).

El primer tipo de error en la medición tiende naturalmente a magnificarse al calcular velocidades y aceleraciones por diferencias finitas, dando lugar a velocidades (y, sobre todo, aceleraciones) inverosímiles. Aunque el segundo tipo no debiera aumentar por la misma causa, ambos deben ser tenidos en cuenta en los experimentos y en la elaboración de las conclusiones respectivas: por ejemplo, prestando más atención a medianas o medias de grandes cantidades de datos, ignorando resultados ruidosos en las colas, considerando intervalos de tiempo más largos para el cálculo de diferencias finitas, etc.

El resto del artículo está ordenado de la siguiente manera: En la sección 2 se muestra la metodología para el procesamiento de los datos y detalles técnicos sobre la estimación de densidad con *kernel*. En la sección 3 se detallan los experimentos propuestos para responder las preguntas de interés, y en la sección 4 sus respectivos resultados. Luego en la sección 5 se encuentran las conclusiones y discusiones, para finalizar en la sección 6 con propuestas de investigación futura.

2. METODOLOGÍA

El área de estudio tiene 5 pistas de 12 ft (3,66 m) de ancho, una sexta que varía al mezclarse con la rampa de entrada, y la rampa misma. Sólo se consideró las pistas de ancho fijo (pistas 1 a 5).

Para estudiar la disciplina de pistas, interesa descartar aquellos puntos de trayectorias de vehículos que estén en el proceso de cambiarse de pista. Concretamente, un vector $[\mathbf{i}, \mathbf{t}, \mathbf{x}_i(\mathbf{t}), \mathbf{y}_i(\mathbf{t})]$ que representa la posición del vehículo i en el instante t se elimina del conjunto de datos de interés si su posición lateral 5 segundos antes o después $\{\mathbf{x}_i(\mathbf{t} - 5s), \mathbf{x}_i(\mathbf{t} + 5s)\}$ está fuera del área de estudio y por lo tanto se desconoce, o es tal que pertenece a otra pista. El límite de 5s en este conjunto de datos, se basa en el hallazgo de Moridpour et al. (2010), de la duración promedio de un cambio de pista de 4,9 s, y la necesidad de no reducir excesivamente el conjunto de datos útiles.

Una vez conocido el conjunto de posiciones, se obtienen las velocidades por el método de diferencias finitas. Para paliar el efecto del ruido, se toma un intervalo, τ , de 0,5 s (i.e., 5 veces el intervalo de captura de datos). Esto permite eliminar el efecto de un *outlier* en la velocidad si éste tiene lugar en los instantes de tiempo descartados, y dividirlo por 5 en caso contrario. Adicionalmente, también reduce el efecto de un ruido hipotético que estuviera presente en todos los puntos (p.ej., si ese ruido general fuera gaussiano, se reducirá a menos de la mitad, por la propiedad aditiva de la distribución normal). El mismo criterio se siguió para la obtención de la posición futura con miras a la correlación temporal.

Respecto a la posición lateral, después de filtrados los vehículos que cambiaron de pista, sólo interesa su valor relativo, es decir, su magnitud respecto al centro geométrico de la pista: esto se logra mediante una transformación lineal dependiente de la pista, y entrega como resultado posiciones en el intervalo $[-1,83 \text{ m}; 1,83 \text{ m}]$.

Luego de esto, se obtuvo un conjunto de más de 400.000 vectores de la forma:

$$[\mathbf{x}(\mathbf{t}), \dot{\mathbf{x}}(\mathbf{t}), \mathbf{x}(\mathbf{t} + \tau), \dot{\mathbf{y}}(\mathbf{t})], \quad (3)$$

cuya distribución de probabilidad conjunta interesa estudiar.

En general, se siguió el método de Silverman para la obtención de los anchos de banda, con excepciones puntuales, para atenuar el efecto del sesgo explicado en la introducción.

3. EXPERIMENTOS

Reconstruida la densidad de probabilidad conjunta, interesa estudiar las siguientes propiedades:

- La distribución marginal de $x(t)$, para estudiar la manera en que los vehículos se centran en su pista, y si existe algún sesgo.
- El comportamiento de $P(x(t)|\dot{y}(t))$, la posición lateral en función de la velocidad longitudinal.
- El comportamiento de $P(\dot{x}(t)|\dot{y}(t))$, la velocidad lateral en función de la longitudinal: específicamente, si su variabilidad (medida a través de la desviación estándar) cambia, y cómo.
- La autocorrelación temporal de $x(t)$. Nótese que existe una dependencia lineal entre $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $x(t + \tau)$ y $\dot{x}(t)$ a través del cálculo por diferencias finitas:

$$\ddot{x}(t) = \frac{2}{\tau^2} (x(t + \tau) - x(t) - \tau \dot{x}(t)). \quad (4)$$

Como la aceleración es más relevante para los modelos de tráfico, se la preferirá por sobre la posición futura. De particular interés para la modelación microscópica en dos dimensiones, son los valores y la forma de $f(x) = E[\ddot{x}|x]$ y $g(\dot{x}) = E[\ddot{x}|\dot{x}]$.

4. RESULTADOS

4.1. Distribución marginal de $x(t)$.

Se obtuvo una distribución de apariencia gaussiana, pero con una asimetría (*skewness*) relativamente alta de 0,283. Con más de 400.000 datos, se puede asumir los supuestos del teorema central del límite para la media, con un error despreciable y obtener un intervalo al 95% de confianza de **[-0,2441; -0,2414]** [m], es decir, en promedio los vehículos se observan 24 cm a la izquierda del eje central de la pista. La tendencia se repite, sin una tendencia lineal evidente, en las cinco pistas.

4.2. Estimación de densidad con *kernel*

4.2.1. Posición Lateral vs Velocidad Longitudinal

La tabla 2 resume los resultados de las medias de las posiciones laterales en función de la velocidad longitudinal del vehículo, lo que se ve respaldado por las figuras 1 a 3. La figura 1 muestra la función de densidad de probabilidad condicionada a distintas velocidades. Se observa claramente que a medida que aumenta la velocidad, su media también va cambiando hacia posiciones laterales

más negativas. Por otro lado, la figura 2 muestra las curvas de nivel de la función de densidad de probabilidad conjunta obtenida mediante KDE.

Tabla 2: Posición lateral media en función de la velocidad longitudinal

$\dot{y}[\text{m/s}]$	0	3	6	9	12	15
$E[x][\text{m}]$	-0,18	-0,2	-0,22	-0,302	-0,47	-0,46

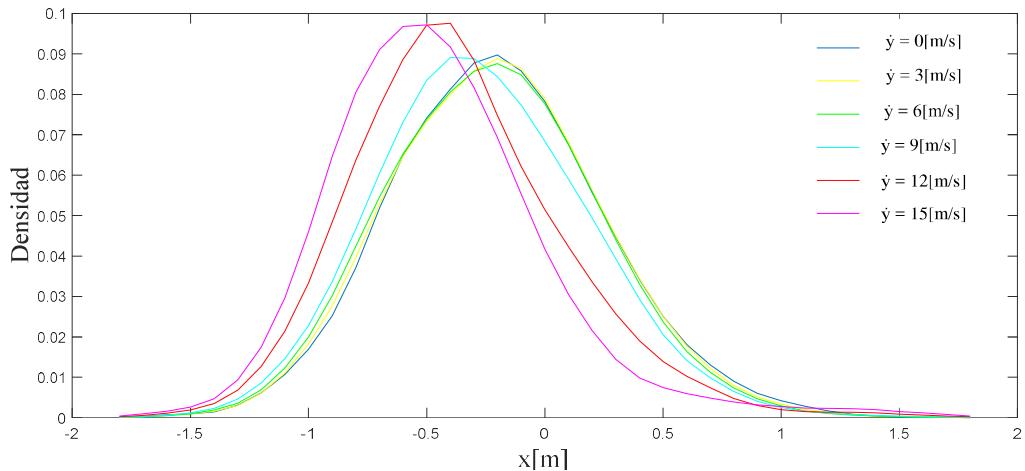


Figura 1: Densidad de probabilidad de posición lateral condicionada a la velocidad longitudinal

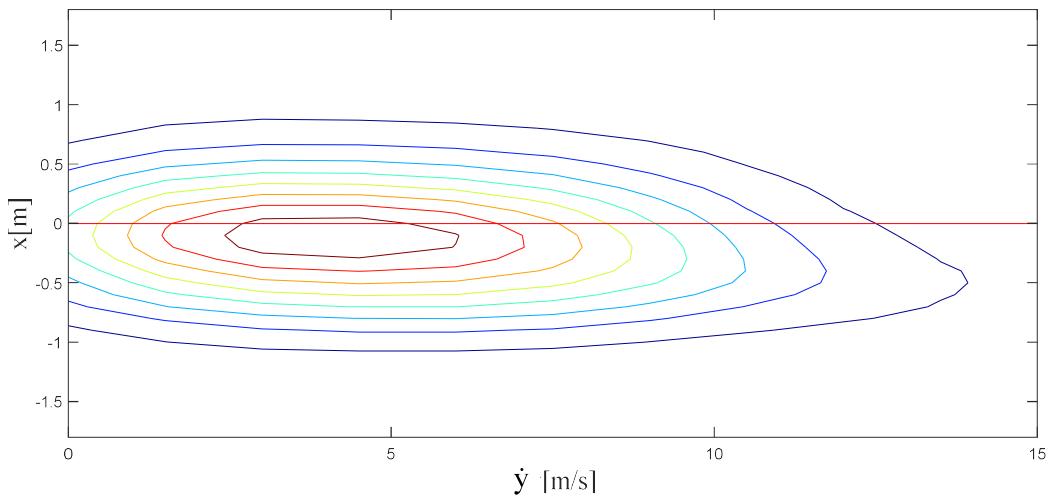


Figura 2: Curvas de Nivel para Velocidades Longitudinales en Función de Posición Lateral

La velocidad longitudinal pareciera jugar un papel importante: a medida que la velocidad aumenta los vehículos tienden a separarse aún más del centro de la pista, hacia la izquierda. En promedio los vehículos, aun estando detenidos, se desvían hacia la izquierda.

La figura 3 representa gráficamente y con mayor resolución los resultados expuestos en la tabla 2. En ella se aprecia con claridad cómo afecta la velocidad longitudinal a la posición lateral de los vehículos. Se puede notar que el desplazamiento hacia la izquierda va en pequeño aumento hasta 11 m/s aproximadamente, para luego moverse considerablemente a mayores velocidades. Es posible que ese salto se deba a factores fuera del alcance de este trabajo. Arriba de 16 m/s, la concentración de vehículos es menor a la décima parte que en torno a los 5 m/s, por lo que el error estándar consecuentemente es mayor.

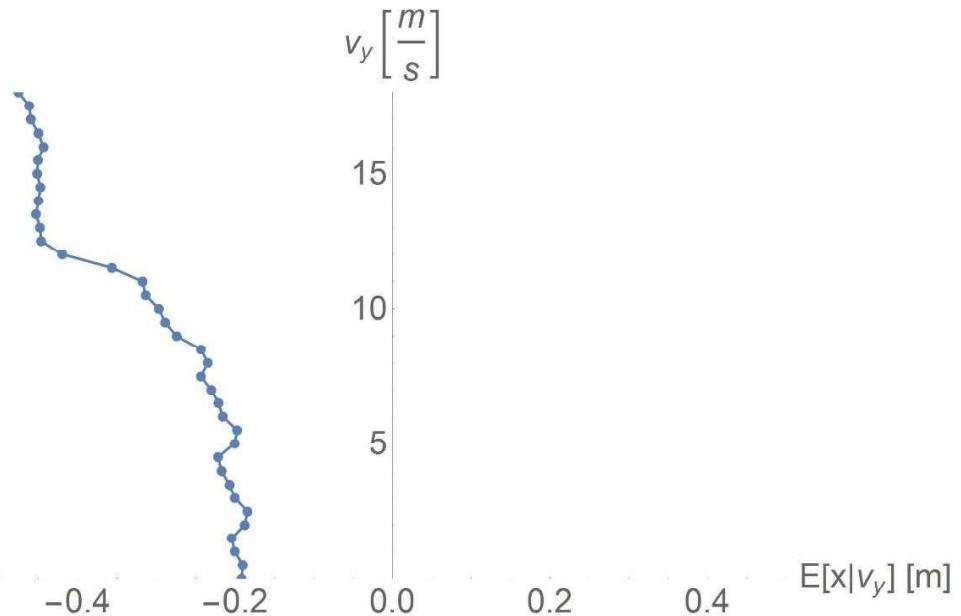


Figura 3: Esperanza de Posición Lateral dada Velocidad Longitudinal

4.2.2. Velocidad Lateral

La figura 4 muestra las curvas de nivel de la función de densidad de probabilidad conjunta $f(x(t), x(t + \tau))$, como un paso previo al estudio de la velocidad y la aceleración. Se observa que luego del intervalo τ (0,5 segundos) las posiciones tienden a moderarse.

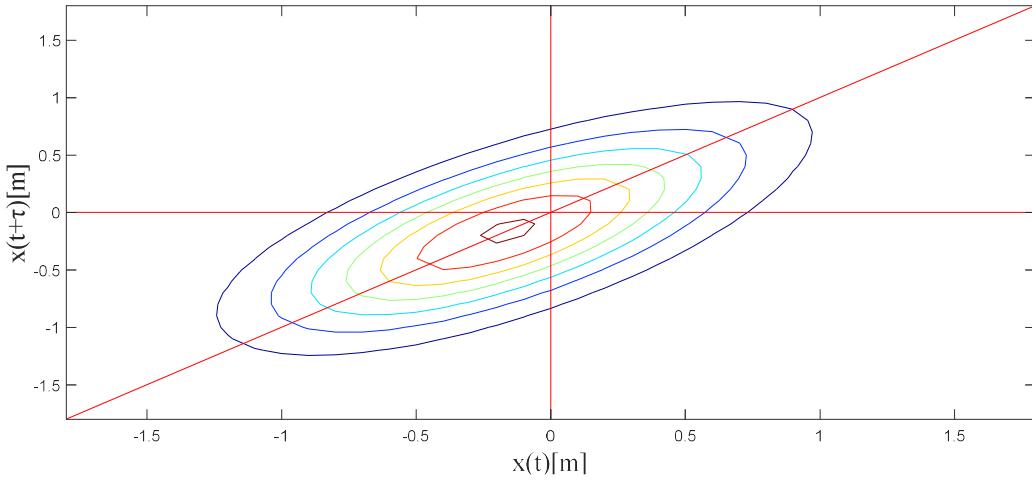


Figura 4: Curvas de Nivel Posición Lateral en Distintos Instantes de Tiempo

4.2.3. Aceleración Lateral

Las figuras 5 y 6 ilustran las funciones de valor esperados de la distribución conjunta condicionada de la aceleración lateral dadas la velocidad y la posición en el mismo eje, respectivamente. Se observa una forma sigmoidal para la primera y una aproximadamente lineal por partes para la segunda. Para el tratamiento de la velocidad lateral fue necesario un *kernel* de ancho de banda variable dada la alta concentración de velocidades muy cercanas a cero y la relativa escasez de velocidades más altas.

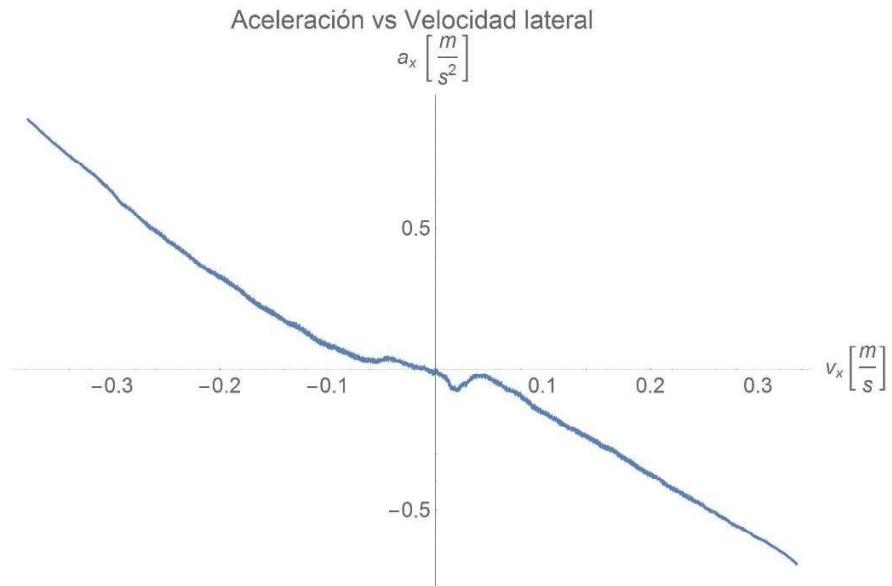


Figura 5: Aceleración en función de la velocidad lateral

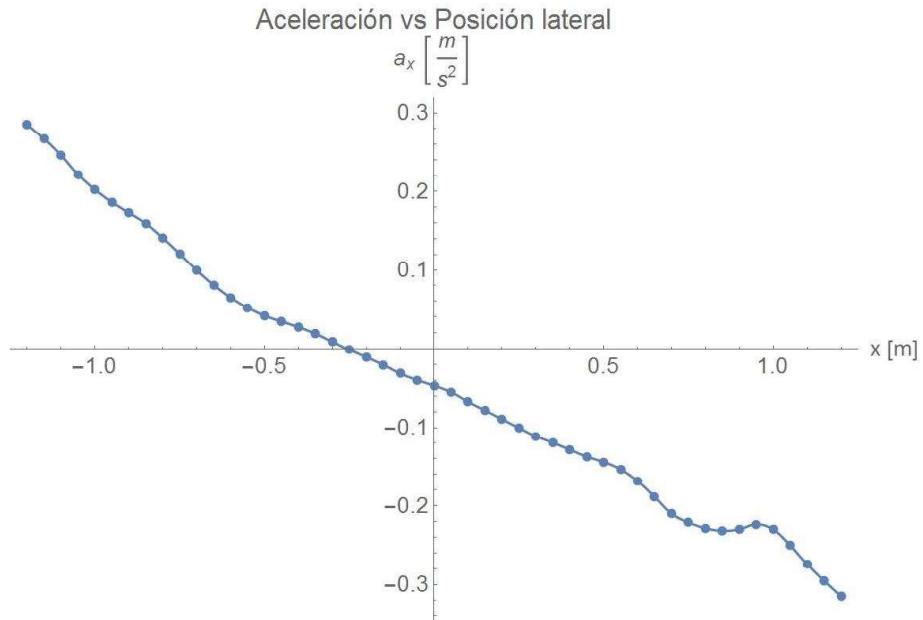


Figura 6: Aceleración en función de posición lateral

Se puede notar que la aceleración nula se produce a la izquierda del eje central de la pista, lo que es consistente con una media desviada hacia la izquierda. Esto podría deberse a un sesgo de percepción del centro de la pista de parte de los conductores. Despejada la variabilidad (al describir los valores esperados) queda en evidencia la tendencia de los conductores hacia el lado contrario de su posición actual.

Otro resultado interesante se ve en la figura 6. En torno a las velocidades laterales pequeñas (negativas o positivas) parece ser que la reacción es relativamente baja, mientras que, a velocidades altas, se vuelve prácticamente lineal al estímulo.

4.2.4. Desviación estándar de la velocidad lateral en función de la velocidad longitudinal

El comportamiento de la desviación estándar de la velocidad lateral dadas distintas velocidades longitudinales, se puede apreciar en la figura 7. Se observa una función creciente con desviaciones entre 0,1 y 0,3 m, siendo mayor mientras mayor sea la velocidad longitudinal.

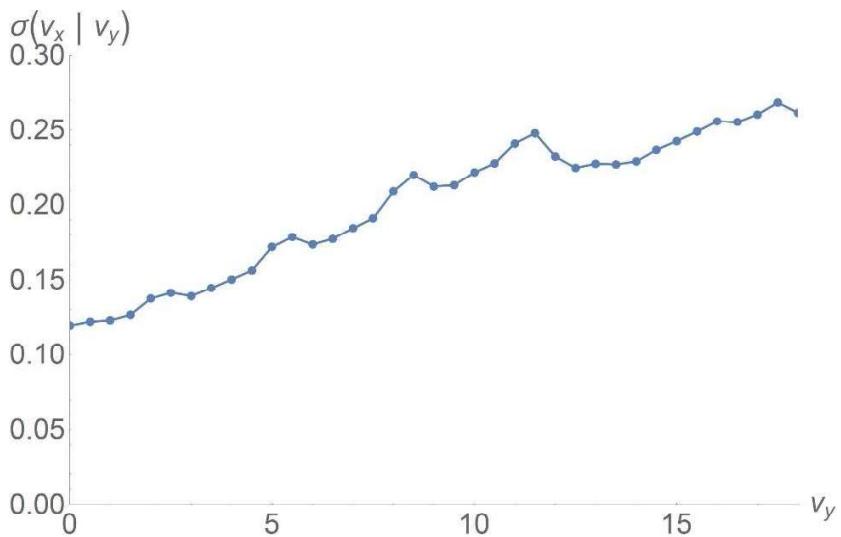


Figura 7: Desviación estándar de la posición lateral en función de velocidad longitudinal

5. CONCLUSIONES

Se observa que la media de las posiciones laterales es de 24 cm a la izquierda del eje central de las pistas. Aunque no se puede descartar que esto se deba en parte a un sesgo en la adquisición de los datos (p.ej., a causa de la posición de las cámaras), tampoco se puede atribuir enteramente a ello, por las siguientes razones: i) la desviación respecto al eje central aumenta con la velocidad, ii) en todas las pistas se observa una asimetría (*skewness*) positiva de la distribución de posiciones laterales, sin una tendencia sostenida entre ellas, iii) entre más a la izquierda la pista, más se concentran las densidades altas hacia la izquierda también, sin que la cola de la derecha cambie consistentemente.

En cambio, este *desvío hacia la izquierda* es coherente con la tendencia de los conductores a evitar la proximidad de otros vehículos también en dirección lateral —que aumenta con la velocidad, según Budhkar y Maurya (2017) y lo planteado por Delpiano et al. (2015)—: las pistas de más a la derecha son las más lentas, y por lo tanto las con menos incentivo a descentrarse, obligando a los vehículos de las pistas de la izquierda, que en promedio van más rápido, a alejarse. De hecho, tanto la media como la moda de las posiciones laterales se desvía más en las pistas de más a la izquierda. El desvío, presente en todas las pistas e incluso a velocidad cero, también es consistente con un hipotético sesgo de percepción de los conductores respecto de la alineación del centro del vehículo con el centro de la pista.

Por otro lado, se verifica que la desviación estándar de las velocidades laterales crece al crecer la velocidad longitudinal. Dicho aumento no parece distanciarse significativamente de una función lineal, aunque el final de la curva siembra la duda sobre lo que sucede a velocidades mayores y se sugiere un nuevo análisis con datos de tráfico a mayor velocidad para obtener conclusiones más firmes.

La aceleración lateral esperada de un vehículo parece cambiar linealmente cuando se está lejos del centro, de manera que los vehículos a la izquierda tienden a acelerar positivamente y los de la

derecha negativamente, con el fin de centrarse. Consistentemente con el desvío hacia la izquierda del set de datos, la pendiente no es la misma a ambos lados ($0,38$ v/s $0,2$ [$1/s^2$]) y se ajusta en torno a la mediana. La velocidad lateral, a su vez, parece influir más en la aceleración a velocidades mayores. A más de $0,1$ m/s en ambos sentidos, se comporta de manera lineal, con una zona de pendiente menos pronunciada para velocidades bajas: se tolera una desviación pequeña, pero cuando crece la reacción es proporcional a su magnitud.

6. INVESTIGACIÓN FURURA

Este trabajo es parte de una línea de investigación para perfeccionar el modelo de tráfico en dos dimensiones basado en fuerzas sociales (Delpiano, 2015). En ese paradigma, se modela tendencias de diversa índole entre los conductores como si fueran fuerzas físicas, y los vehículos, objetos pasivos sujetos a dichas fuerzas. Una continuación concreta de este trabajo es su uso como insumo para la reformulación de las fuerzas de repulsión y de pista, que modelan respectivamente la tendencia a evitar colisiones y a mantener la disciplina de pistas.

También resulta interesante basarse en la variabilidad encontrada para calibrar un modelo que reproduzca la variabilidad de conductores en dirección lateral, por ejemplo, a través de caminatas aleatorias confinadas.

Otro campo a explorar es el del alcance de estas conclusiones fuera de la realidad concreta del conjunto de datos I-80. Se recomienda repetir los análisis con datos de circunstancias de origen diversas: geográficas, culturales, de velocidad, etc., e idealmente en condiciones en que se conozca o se pueda minimizar el ruido desde su origen.

Es relevante comprobar los resultados de forma independiente (con otros datos y en algunos casos experimentos diferentes), y de poner a prueba algunas hipótesis cuya verificación queda fuera del alcance de este trabajo, como la existencia o no de un sesgo de percepción de los conductores, o lo que sucede a velocidades longitudinales más altas (p.ej., sólo un 1% de los datos corresponde a velocidades longitudinales mayores a 66 km/h, lo que impide sacar conclusiones significativas sobre formas de las respectivas curvas).

REFERENCIAS

- Budhkar,A., Maurya.A.(2017). Characteristics of lateral vehicular interactions in heterogeneous traffic with weak lane discipline.
- Delpiano, R. (2015). **Modelo Microscópico de Trafico en Dos Dimensiones Basado en Fuerzas Sociales** (PhD). Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Delpiano, R., Herrera, J. C., y Coeymans, J. E. (2015). Modelo Microscópico de Trafico en Dos Dimensiones Basado en Fuerzas Sociales. En **XVII congreso chileno de ingeniería de transporte**. Concepción, Chile.

Fellendorf, M., Schonauer, R., y Huang, W. (2012). Social force based vehicle model for twodimensional spaces. En **Transportation research board 91st annual meeting**.

Federal Highway Administration. (2006). **Interstate 80 freeway dataset, FHWA-HRT-06-137**. Descargado 2013-05-09, de <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/06137/index.cfm>

Gunay, B. (2007). Car following theory with lateral discomfort. **Transportation Research Part B: Methodological**, 41 (7), 722–735. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261507000161> doi:doi:10.1016/j.trb.2007.02.002

Jin, S., Wang, D., Tao, P., y Li, P. (2010, noviembre). Non-lane-based full velocity difference car following model. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, 389 (21), 4654–4662. Descargado 2011- 07-07, de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437110005042> doi: 16/j.physa.2010.06.014

Montanino, M., & Punzo, V. (2013). Making NGSIM Data Usable for Studies on Traffic Flow Theory: Multistep Method for Vehicle Trajectory Reconstruction. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2390, 99–111. <https://doi.org/10.3141/2390-11>

Moridpour, S., Sarvi, M., & Rose, G. (2010). Modeling the Lane-Changing Execution of Multiclass Vehicles Under Heavy Traffic Conditions. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2161(1), 11–19. <https://doi.org/10.3141/2161-02>

Silverman, B.W. (1986). Density Estimation for Statistics and Data Analysis. **London: Chapman & Hall/CRC**. p. 48. ISBN 0-412-24620-1.

Yang, D., Zhu, L., Ran, B., Pu, Y., y Hui, P. (2016). Modeling and Analysis of the Lane-Changing Execution in Longitudinal Direction. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, PP (99), 1–9. doi: 10.1109/TITS.2016 .2542109