

Estudio de los accidentes de tránsito usando modelos de regresión locales para la planificación de la seguridad en el transporte

Vladimir Hernández & César Fuentes

V. Hernández & C. Fuentes

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro 610 norte, C.P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
El Colegio de la Frontera Norte, A.C., Av. de los Insurgentes 3708, C.P 32350, Ciudad Juárez, Chihuahua, México
vladimir.hernandez@uacj.mx

M. Ramos.,V.Aguilera.,(eds.). Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago, Guanajuato, 2014.

Abstract

The objective of this paper is to develop a model to estimate traffic accidents at the level of basic geo-statistical areas (ageb) in Ciudad Juarez, Chih. Generation and attraction of trips variables were used with a Geographically Weighted Poisson Regression (GWPR). The GWPR model results show a better fit than the global model. Traffic accidents in Ciudad Juarez indicate the non-stationary state in the relationships between the number of traffic accident and independent variables. With the use of this technique, it is possible to identify intra-urban areas with greater effects on estimates of traffic accidents. Finally, the contributions of this work to issues such as transport planning, urban planning and road-urban security.

29 Introducción

En las zonas urbanas de muchas ciudades del mundo, incluidas ciudades de la frontera norte de México, los incidentes de tránsito han sido estudiados mediante el empleo de modelos a nivel macro-analíticos (Graham y otros 2005; Graham y Stephens, 2008; Wier y otros, 2009; Dissanayake y otros 2009; Fuentes y Hernández, 2009, 2013; Fuentes, 2012). Las variables de estudio han sido agregadas en diversos niveles; por ejemplo, zonas de análisis de tránsito, o en el caso de las ciudades mexicanas a nivel de áreas geoestadísticas básicas (ageb). Entre las variables de estudio se pueden mencionar un gran rango desde las características demográficas hasta aquellas relacionadas con los flujos vehiculares. Un ejemplo son las variables relacionadas con los usos de suelo y las zonas generadoras y atractoras de viajes. (Graham y otros 2005; Graham y Stephens, 2008; Fuentes y Hernández, 2009, 2013; Hadayeghi y otros 2010; Pulugurtha y otros 2013).

La estimación de la demanda de viaje juega un papel clave como un paso fundamental en la planificación del transporte a largo plazo, lo mismo se puede generalizar para las zonas generadoras de tránsito. Es ampliamente reconocido que el riesgo a accidentes de tránsito es una función de la cantidad de viajes generados y producidos, además de la cantidad de kilómetros recorridos (Hakkert y Brainmaister, 2002; Qin y otros 2004; Jiang y Lyles, 2010). En este tema destacan los trabajos que han propuesto la estimación de modelos predictivos de accidentes de tránsito que ayudan en la construcción de instrumentos de planeación del transporte, en especial en el rubro de la seguridad vial. (Graham y otros 2005; Graham y Stephens, 2008; Fuentes y Hernández, 2009, 2013; Hadayeghi y otros 2010; Pulugurtha y otros 2013).

La técnica más utilizada en los modelos revisados se denomina modelo lineal generalizado, es una técnica que estima el promedio de la relación entre una variable dependiente, habitualmente el número de accidentes de tránsito por zona, y un grupo de variables explicativas o independientes (Graham y otros 2005; Graham y Stephens, 2008; Wier y otros, 2009; Dissanayake y otros 2009; Fuentes y Hernández, 2009, 2013). Otro grupo de investigaciones se han enfocado en la identificación de factores urbanos en la incidencia de los accidentes de tránsito, pero sobre todo desde su análisis espacial. Es decir, que hay factores espaciales que tienen mayor o menor pesos en la distribución de los accidentes de tránsito en cada una de las zonas urbanas (Graham y otros 2005; Graham y Stephens, 2008; Fuentes y Hernández, 2009, 2013; Hadayeghi y otros 2010; Pulugurtha y otros 2013).

Con todos los avances en el tema, la mayoría de las propuestas revisadas asumen la interdependencia en los errores de la técnica estadística utilizada. El resultado consiste en un grupo de coeficientes globales estimados muy similares a los convencionales obtenidos a través de una regresión por mínimos cuadrados ordinarios. Por lo anterior, otros trabajos proponen incorporar explícitamente la variable espacial en sus modelos y con ello hacer frente entre otros puntos al tema de la autocorrelación espacial (Hadayeghi y otros 2010; Pulugurtha y otros 2013). Este trabajo propone hacer uso de la regresión geográficamente ponderada de tipo Poisson (RGPP).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es realizar un modelo RGPP para investigar la variación espacial y la relación entre el número de incidentes viales y potenciales predictores de planificación del transporte como son las variables relacionadas con la generación y atracción de viajes.

29.1 Materiales y métodos

Datos

Los datos de este estudio se obtuvieron de tres bases principales. En primer lugar, la base de datos de accidentes de tránsito de la Dirección General de Tránsito Municipal de Juárez, Chihuahua. De la base de datos provenientes del Censo General de Población y Vivienda 2010, y de la base de datos Censos Económicos 2009 ambas disponibles a nivel de áreas geoestadísticas básicas (ageb).

Accidentes de tránsito

Los datos de accidentes de tránsito consisten en informes de accidentes que abarcan el período de enero de 2008 a agosto de 2009. Los datos fueron geocodificados y agrupados a nivel de ageb utilizando las herramientas de los sistemas de información geográfica (SIG).

Generación y atracción de viajes

Se construyeron medidas aproximadas para identificar zonas atractoras y generadoras de viaje a partir de las variables de total de personal ocupado (ecuación 1) y población total (ecuación 2) del Censo Económico 2009 y Censos Generales de Población y Vivienda 2010 (INEGI). Con los datos de empleo se construyeron dos medidas de densidad de empleo a) población total ocupada en comercio y servicios y b) población total ocupada en industria, igual a nivel de ageb. Se construyó una matriz de distancias euclidiana con Arcview 3.3 utilizando la extensión (distance point feature script), y las fórmulas para calcular las medidas aproximadas son:

$$EP = \sum_j^{i \neq j} \frac{E_j}{d_{ij}} \quad (29)$$

$$PP = \sum_j^{i \neq j} \frac{P_j}{d_{ij}} \quad (29.1)$$

Donde:

E_j = el empleo total por ageb

P_j = la población total por ageb

d_{ij} = es la distancia del ageb i al ageb j

Especificación del modelo

a) Modelos lineales generalizados (MLG)

Los modelos lineales generalizados son las técnicas más utilizadas en la predicción de los accidentes de tránsito. (Lovegrove, 2012) Estos modelos tienen dos variantes; por un lado los modelos denominados Poisson, y por otra parte, los denominados binominal negativos; en ambos, la principal ventaja es el uso de datos discretos, positivos y “raros” como son los accidentes de tránsito. En un modelo de regresión tipo Poisson la probabilidad de accidentes en una ageb está dada por:

$$Prob(y_i) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^{y_i}}{y_i!} \quad (29.2)$$

Donde:

$Prob(y_i)$: La probabilidad que y accidentes de tránsito ocurran en una ageb

y_i : El número de accidentes de tránsito ocurridos en una ageb

λ : El numero esperado de accidentes de tránsito

La media condicionada de y_i puede ser especificada como una función exponencial de las variables independientes:

$$E(y_i|x_i) = \lambda_i = e^{x_i T \beta} \quad (29.3)$$

Donde:

X: el grupo de variables independientes

β : el grupo de coeficientes estimados

Se supone el logaritmo natural de λ_i como una función lineal de las k variables independientes esto es:

$$Ln(\lambda_i) = \beta_0 + \sum k \beta_k x_{ik} \quad (29.4)$$

El modelo de la ecuación 3 es estimado con el método de máxima verosimilitud. La distribución de Poisson ha mostrado ser una respuesta favorable para los modelos de accidentes de tránsito, pero su limitación consiste en la restricción donde la varianza de los datos de accidentes de tránsito debe ser igual a la media. Para manejar este problema se sugiere un modelo binomial negativo, aunque se ha comprobado que ambos modelos producen resultados similares en sus coeficientes. (Lord y otros, 2003; Wang y otros, 2003).

b) Modelos de regresión geográficamente ponderados tipo Poisson (RGPP)

En la ecuación 5 los coeficientes se asumen constantes (estacionarios) a través de la zona de estudio, de ahí que se conozca como global (o espacialmente estacionario). Cuando prevalecen las relaciones espaciales no-estacionarias la estimación de los coeficientes será una función de (u_i, v_i) las coordenadas geográficas de los centroides de cada una de las ageb en estudio. Por lo tanto la ecuación 5 puede ser reformulada como:

$$Ln(\lambda_i) = \beta_0(u_i, v_i) + \sum k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} \quad (29.5)$$

Un modelo lineal generalizado no captura las variaciones espaciales, lo anterior es precisamente el argumento central de las regresiones geográficas, éstas presentan dos ventajas, por un parte toman en cuenta la incorporación de las coordenadas geográficas del centroide de cada unidad espacial de análisis; en segundo lugar, el modelo estima que los puntos más cercanos tienen mayor influencia en el cálculo de los coeficientes. (Fotheringham y otros, 1998; Mennis, 2006) Para calcular la influencia de los puntos vecinos se utiliza una función de pesos, en consecuencia, la estimación de los coeficientes depende de las observaciones de la función de densidad (ponderación) y del ancho de banda (bandwidth).

Es decir, se generan estimaciones para cada punto utilizando las observaciones vecinas (Mennis, 2006) y los dos tipos de funciones de densidad más utilizados son los siguientes:

Gaussiana

$$w_{ij} = \exp\left(-\frac{1}{2} \times \left(\frac{d_{ij}}{b_j}\right)^2\right) \quad (29.6)$$

Bi-cuadrada

$$w_{ij} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{d_{ij}}{b_i}\right)^2\right]^2 & \text{si } d_{ij} < b_i \\ 0 & \text{si } d_{ij} \geq b_i \end{cases} \quad (29.7)$$

Donde:

W_{ij} : los pesos espaciales de los valores j y los valores i en las ageb

d_{ij} : la distancia euclidiana entre los valores j y los i de cada ageb

b_i : el ancho de banda tipo kernel

El ancho de banda controla la distancia en función de las ponderaciones, en consecuencia, tiene influencia en el cálculo de la regresión local. A medida que el ancho de banda aumenta las variaciones locales se pierden y los valores estimados se acercan más a las estimaciones globales. Otra de las opciones implica considerar un ancho de banda fijo, donde se asume que la distancia entre los puntos (coordenadas geográficas de cada ageb) es constante a lo largo del área de estudio (función de densidad Gaussiana). En contraste, utilizar un ancho de banda adaptativo o variable facilita el cálculo y la búsqueda de un número específico de zonas cercanas para garantizar un valor de muestras locales. Los pesos se calculan mediante la fórmula de la ecuación 8.

29.2 Resultados y discusión

Caso de estudio

Los datos de accidentes de tránsito y las variables independientes corresponden a la zona urbana de ciudad Juárez conformada por 615 áreas geoestadísticas básicas (ver Figura 1). En total durante el periodo de estudio (enero de 2008 a agosto de 2009) se contabilizaron un total de 12, 218 accidentes con una media de 19 y desviación estándar de 30 accidentes. Se observa en la gráfica 1 que la distribución de frecuencias de los accidentes de tránsito se ajusta a la distribución tipo Poisson donde la mayor cantidad de incidentes se registra en pocas ageb.

Gráfica 29 Distribución de frecuencias de accidentes de tránsito en ciudad Juárez, 2008-2009

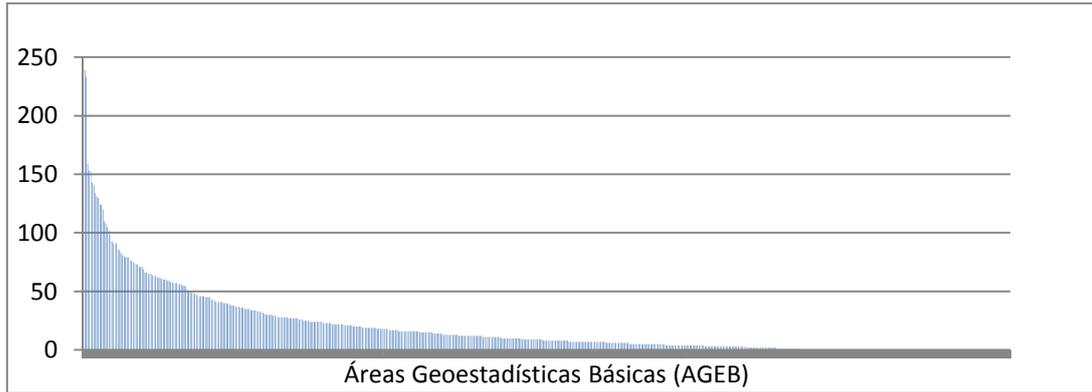
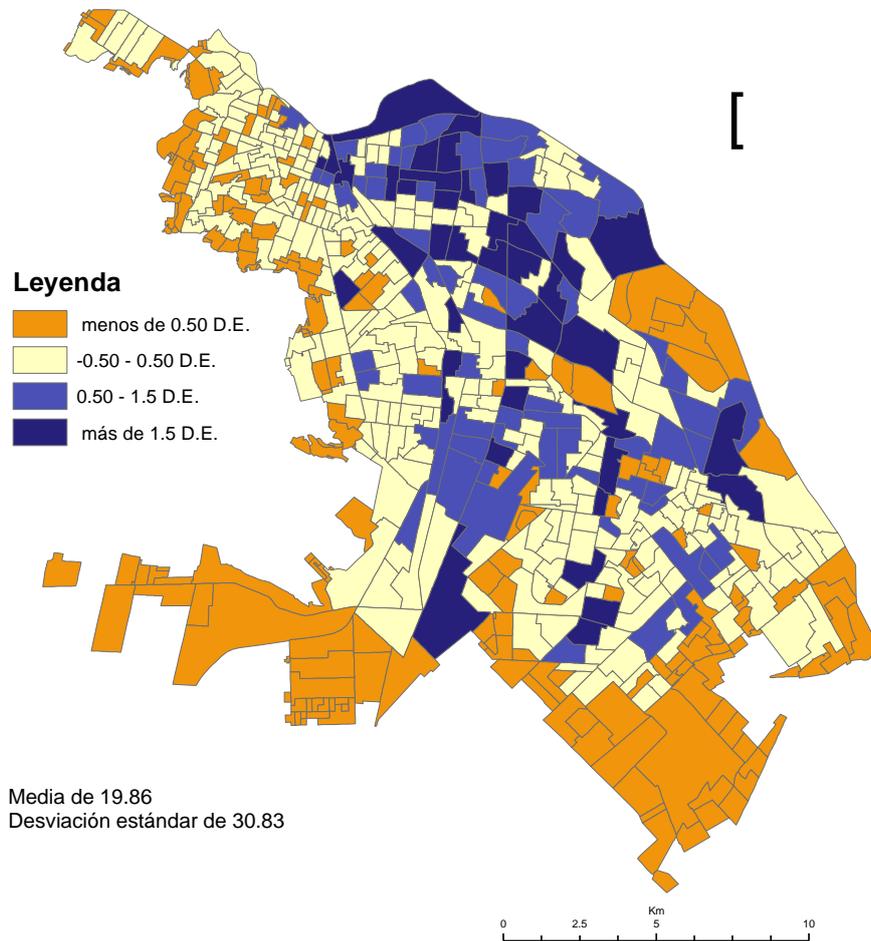


Figura 29 Total de accidentes de tránsito en ciudad Juárez, 2008-2009

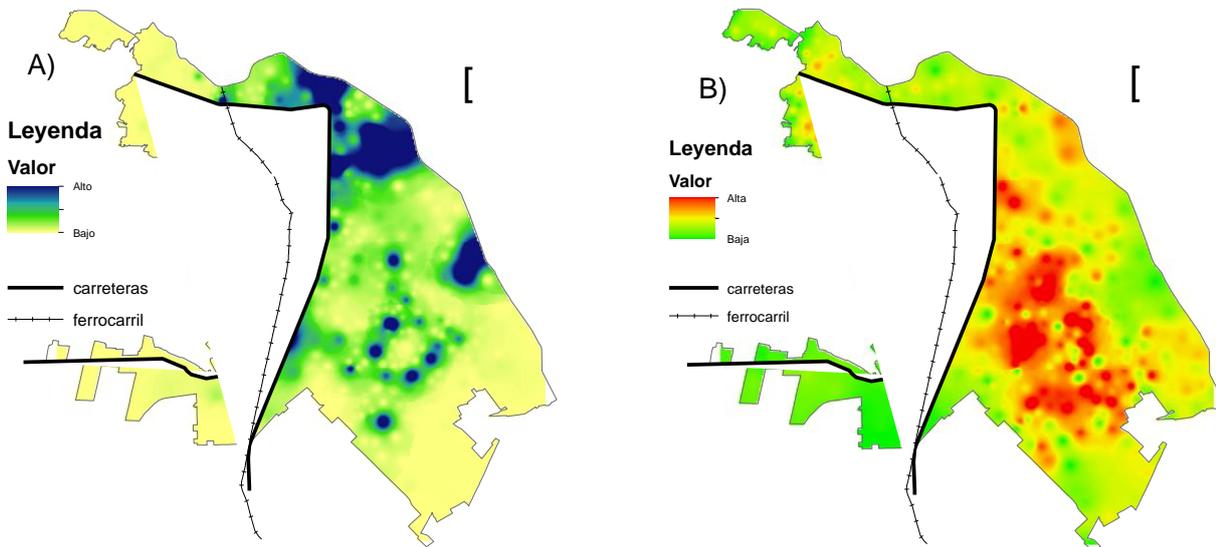


Por lo que respecta a la distribución espacial de las zonas con mayor cantidad de accidentes de tránsito, éstas se distribuyen principalmente en el centro y el norte de la ciudad. Y a través de un corredor norte-sur que coincide con el trazo de la sección urbana de la carretera federal 45 (Panamericana). En menor medida se puede mencionar a la zona suroriente de la ciudad, ésta se caracteriza por ser una de las áreas de reciente consolidación con altas tasa de densidad de población.

En la figura 2A las áreas de color azul son aquellas que obtuvieron un alto valor en el rubro de zonas atractoras de viajes; en contraste las zonas claras las de menor valor. La zona centro-norte de ciudad Juárez figura en el rango de alto, es decir, desde el centro tradicional y la zona conocida como el Pronaf, así como el oriente de la ciudad en nodos muy identificados por la concentración de la industria maquiladora y zonas con altos valores de empleo terciario (comercio y servicios). Los valores disminuyen hacia el sur de la ciudad, pero al sureste alcanzan nuevamente altos valores, esto se explica por la localización principalmente de la industria maquiladora y centros comerciales.

En la figura 2B se muestran los resultados de las zonas generadoras de viajes, el color rojo indica aquellas con altos valores y las verdes lo contrario. Se observa que las secciones poniente y sureste de la ciudad son aquellas que generan mayor cantidad de viajes, tomando como base la cantidad de población en cada agcb de ciudad Juárez. Al comparar ambas figuras (A y B) se aprecia que solamente en la zona sureste de la ciudad se generan y atraen viaje; mientras que en el resto de la ciudad se excluyen geográficamente.

Figura 29.1 Distribución espacial de la densidad de atracción de viajes, B) distribución espacial de la densidad de generación de viajes, ciudad Juárez, 2009-2010



Análisis de los modelos Poisson global y Poisson ponderado (local)

El resumen del modelo global y la estimación de cinco coeficientes valorados localmente se presentan en las tablas 1 y 2 respectivamente. Como se puede observar a diferencia de los coeficientes fijos obtenidos en el modelo global, los coeficientes estimados en el modelo local muestran un estado espacial no estacionario. El grado de estado no estacionario en una relación espacial y se detecta mediante la comparación entre las estimaciones de los rangos locales y el intervalo de confianza alrededor de la estimación global del parámetro equivalente.

Tabla 29 Síntesis del modelo Poisson global

Variable	Coefficiente	Error estándar
Intercepto	2.691179	0.022961
EP09	0.001936	0.000043
PP10	0.002011	0.000061
PECYS09	-0.691630	0.042412
PEMAN09	-0.289762	0.043872

Tabla 29.1 Síntesis del resultado de coeficientes del modelo RGPP

Variable	Coefficientes mínimos	Cuartil más bajo	Rango	Cuartil más alto	Coefficientes máximos
EP09	-0.004362	0.001756	0.013975	0.015731	0.201545
PP10	-0.006587	0.000800	0.00305	0.003850	0.013764
PECYS09	-2.234225	-0.715970	1.72049	1.004520	6.307944
PEMAN09	-9.266885	-1.030871	2.018388	0.987517	3.839837

Cuando el rango estimado entre el más alto y más bajo cuartil del modelo local es mayor a \pm una desviación estándar del parámetro estimado global sugiere que la relación espacial es no-estacionaria (Fotheringham y otros, 2002) En la tabla 1 el rango para la variable aproximada a la atracción de viajes (EP09) fue de 0.013975, éste es más grande que el valor entre \pm una desviación estándar del parámetro estimado global de 0.000043 (tabla 2). El mismo análisis se efectúa para cada uno de los rangos de los parámetros locales estimados y lo globales, en todos los casos la relación es mayor a \pm una desviación estándar; por lo tanto, refleja que el proceso es espacialmente no-estacionario.

La tabla 3 presenta dos medidas de bondad de ajuste para ambos modelos. El valor del coeficiente de correlación obtenido en la RGPP comparada con el correspondiente valor obtenido con la regresión global muestra que el modelo local mejora en 53 por ciento las estimaciones. La otra medida que da información relevante es el criterio de información Akaike (AICc) se considera que el modelo que presente el menor valor es el más exitoso en capturar la variación de los accidentes de tránsito. El modelo local registró un valor de 5565.378 menor que el valor del modelo global de 15824.782, por lo tanto, el modelo local captura de manera más exitosa la variación de los accidentes.

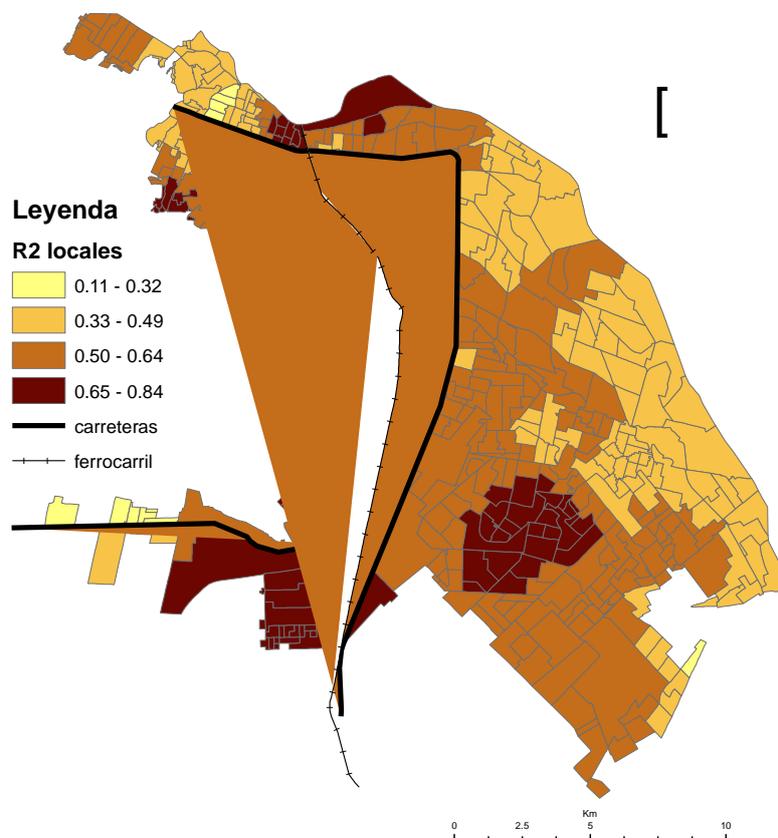
Tabla 29.2 Medidas de bondad de ajuste, comparación de los modelos global y local

Modelo	Coefficiente de correlación	AICc
Global	0.21	15824.782
Local	0.74	5565.378

Análisis de los valores locales de determinación (r^2) y estadísticos-t

La figura 3 muestra que si bien los coeficientes de determinación son altos, estos no se distribuyen de forma constante a lo largo y ancho de la ciudad. Es evidente que los valores más altos de determinación (0.50 a 0.84) se localizan en el norte, centro y sur de la ciudad. Si se observa la distribución espacial de la variable empleo próximo (atracción de viajes, figura 2A) y población próxima (generación de viajes 2B) se puede encontrar la explicación de los coeficientes; por un lado, los valores elevados de la zona norte se explican por la concentración de empleo en los sectores de comercios y servicios que se extienden desde un corredor desde el centro tradicional hasta la zona del Pronaf. Mientras que los coeficientes del sur tiene su explicación en la variable población próxima con los valores más altos en dicha zona. Por lo tanto, el modelo capta el efecto de las variables de generación y atracción de viajes. Una breve revisión de estudios previos ayudan a validar los resultados obtenidos, por ejemplo, la identificación de la mezcla de usos de suelo, y los flujos de tránsito que explican los atropellamientos entre el 2005 y 2006 en ciudad Juárez (Fuentes, 2012). En otro contexto fronterizo, Tijuana, se encontró que los usos de suelo de comercio y servicios, y los usos de suelo mixto son estadísticamente significativos y explican los accidentes de tránsito (Fuentes y Hernández, 2009). Mientras que en el contexto internacional los trabajos de Pulugurtha y otros (2013) y Hadayeghi y otros (2010) apuntan a la misma tendencia: explicación de los accidentes a través de la generación y atracción de flujos y el carácter no-estacionario de los modelos espaciales de accidentes de tránsito.

Figura 29.2 Coeficientes de determinación locales estimación de regresión geográfica ponderada Poisson, accidentes de tránsito, ciudad Juárez, 2008-2009

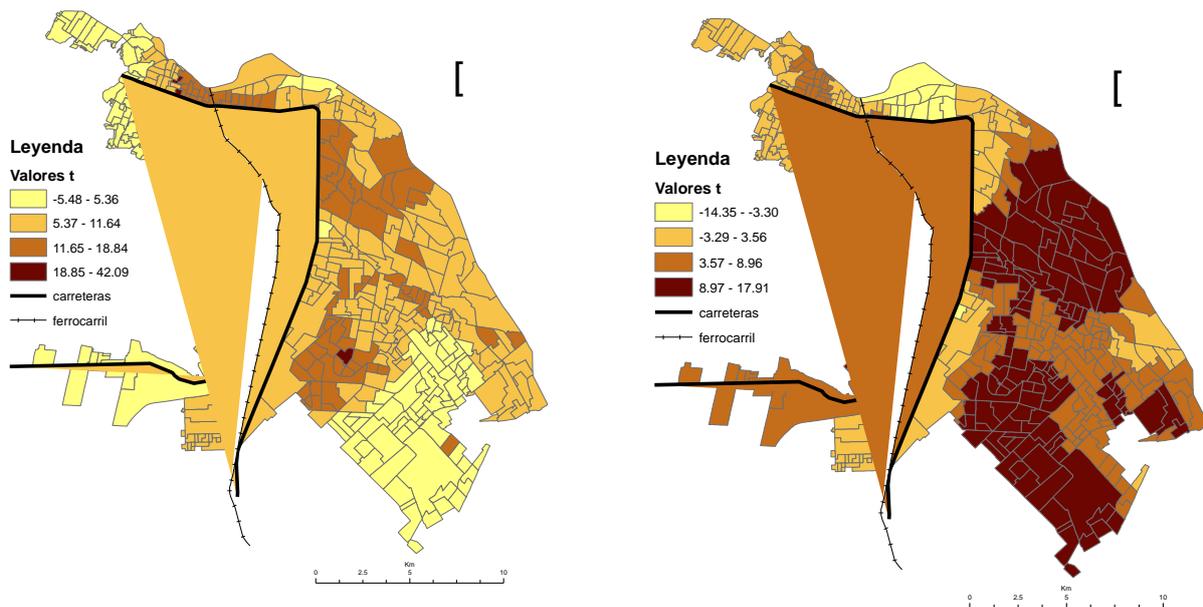


Como es evidente los signos de los coeficientes locales no son necesariamente los mismos (véase tabla 2) para todas las ageb. Una de las explicaciones para esta manifestación al parecer contradictoria se debe a la multicolinealidad entre las variables o a la colinealidad en la estimación de los coeficientes a nivel local, de las ageb. Lo cual es normal por tratarse de medidas locales.

Si bien, el programa utilizado para las estimaciones GWR4 (Nayaka y otros, 2009) no cuentan con herramientas para examinar la multicolinealidad y colinealidad local se puede emplear los valores del estadístico t para determinar la significación local de las estimaciones. La figura 4 presenta los resultados del estadístico t para las variables explicatorias se observa que para las variables de generación y atracción de viajes las zonas centro, Pronaf y suroriente son significativas a un nivel de 95 por ciento de confianza.

En la figura 4 izquierda, atracción de viajes, los valores más altos del estadístico-t se distribuyen desde el centro tradicional y se extiende hacia el oriente es coincidente con los principales corredores comerciales. Mientras que el segundo grupo de valores altos se localizan en la zona suroriente, como se ha mencionado ésta se caracteriza por la mezcla de usos de suelo (altas y medias densidades de población, y altas densidades de empleo secundario y terciario). En cuanto a los valores t de la generación de viajes los más altos se ubican en las zonas oriente, suroriente y en menor medida poniente de la ciudad.

Figura 29.3 Estadístico t para generación (izquierda) y atracción (derecha) de viajes



29.3 Conclusiones

Los modelos lineales generalizados se reconocen como las principales técnicas para calibrar modelos de seguridad vial tipo Poisson o binomiales negativos donde se asumen la distribución fija de los errores en toda la zona de estudio. Sin embargo, la frecuencia de accidentes de tránsito está influenciada por muchos factores que varían en el espacio urbano y muestran diferentes patrones espaciales.

En este trabajo se pone de manifiesto el carácter espacial no-estacionario de los accidentes de tránsito en ciudad Juárez, la explicación de los accidentes a través de las variables que expresan generación y atracción de viajes compuestas mediante un modelo de regresión geográficamente ponderado tipo Poisson. Lo anterior representa un avance en la forma de analizar el tema y complementa a los modelos globales, porque los resultados revelan ciertas interrelaciones que solo son percibidas en un modelo local.

Los coeficientes estimados muestran diferencias significativas en el modelo de RGPP y mayor poder explicativo que el modelo global. Las variables seleccionadas aportan en el modelo local un mejor ajuste, y una mejora significativa en el rendimiento indicado por el menor valor del criterio de información Akaike (AICc).

La selección de las variables evitó el probable sobreajuste del modelo, hecho que se presenta cuando se incluyen más variables explicativas.

Se esperaba que las variables explicativas tuvieran diversos efectos espaciales en la incidencia de los accidentes de tránsito en ciudad Juárez. En otras palabras, que las relaciones fueran más fuertes en algunas zonas de la ciudad que en otras. Los resultados indican que lo anterior se alcanzó en este trabajo. Cabe mencionar que la predicción de los accidentes de tránsito a nivel de las ageb se ven afectados por más de un factor y ello implica más investigaciones.

Vale la pena señalar que, además, de alcanzar el objetivo del este trabajo: valorar la relación entre la generación y atracción de viajes y su influencia en los accidentes de tránsito, el modelo también puede ser utilizado y calibrarse por separado para otras categorías de la planificación urbana tales como los usos de suelo o variables sociodemográficas.

Que contribuyan para tener una visión y conocimiento integral y sistémico del problema que representan los accidentes de tránsito en las zonas urbanas de México y en especial de las zonas urbanas de la frontera norte de México.

Este tipo de trabajos son útiles para los planificadores urbanos y otros tipos de especialistas que se ocupan de cuestiones relacionadas con los usos de suelo: los nuevos desarrollo habitacionales, de servicios incluidos la industria. Incluye a especialistas que tienen su interés en la vía, por ejemplo ingenieros de tránsito que al incluir características de la red vial pueden identificar los efectos locales.

La ventaja de los modelos locales es la identificación de los sitios más conflictivos, las áreas que requieren de mayor atención y enfocar los recursos para la prevención de accidentes de tránsito.

Por otra parte, una limitación del modelo local (RGPP) podría ser el carácter contra intuitivo de los signos en los coeficientes estimados en algunas ageb, aun con esto, el modelo local mostró mayor ajuste y se puede concluir que la capacidad de estimación del modelo RGPP es un insumo valioso en los estudios de seguridad vial que pueden conducir a una mejora en la seguridad urbana.

29.4 Agradecimientos

El trabajo fue apoyado por el fondo de ciencia básica SEP-CONACyT a través del proyecto SEP-CB-2010-153018.

Se agradece la participación de la estudiante Leticia Abigail Pérez Pulido, becaria Conacyt No. 19834 por la recopilación de la información para el desarrollo de este trabajo.

29.5 Referencias

Dissanayake, D., Aryaija, J., Wedagama, D.M. (2009). Modelling the effect of land use and temporal factors on child pedestrian casualties, en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 1016-1024.

Fotheringham, A. S., Brunson, C., and Charlton, M. E. (2002). *Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships*, Wiley, Chichester.

Fotheringham, A.S., Charlton, M.E., Brundson, C. (1998). Geographically weighted regression: a natural evolution of the expansion method for spatial data analysis, en *Environment and Planning A.*, pp. 1905-1927.

Fuentes C. (2012). La forma urbana y la incidencia de atropellamientos en Ciudad Juárez, Chihuahua, (2005-2006) en *Geografía del riesgo vial. Siniestros de tránsito en ciudad Juárez*. México: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, pp. 73-96.

Fuentes, C., Hernández, V. (2009). La estructura especial urbana y la incidencia de accidentes de tránsito en Tijuana, Baja California (2003-2004), en *Frontera Norte*, pp. 109-138.

Fuentes, C., Hernández, V. (2013). Spatial environmental risk factors for pedestrian injury collision in Ciudad Juárez, Mexico (2008-2009): implications for urban planning, en *International Journal of Injury Control and Safety Promotion* (20), pp. 169-178.

Graham, D., Glaister, S. Anderson, R. (2005). The effect of area deprivation on the incidence of child and adult pedestrian casualties in England, en *Accident Analysis and Prevention*, (37) pp. 125-135.

Graham, D., Stephens, D. (2008). Decomposing the impact of deprivation on child pedestrian casualties in England en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 1351-1364.

Hadayeghi, A., Shalaby, A., Persaud, B. (2010). Development of planning level transportation safety tools using Geographically Weighted Poisson Regression, en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 676-688.

Hakkert, A.S., Brainmaister, L. (2002). The uses of exposure and risk road safety studies. Leideschendam: SWOV. febrero 15, 2014, from <http://www.swov.nl/rapport/R-2002-12.PDF>

Jiang, X., Lyles, R. W. (2010). A review of the validity of the underlying assumptions of quasi-induced exposure, en *Accident Analysis and Prevention*, 1352-1358.

Lord, D., Washington, S.P., Ivan, J.N. (2005). Poisson, Poisson-gamma and zero inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory, en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 35-46.

Lovegrove, G.R. (2012). *Road Safety Planning. New Tools for Sustainable Road Safety and Community Development*. Saarbrücken: Germany: Akademikerverlang GmbH & Co.

Mennis, J. (2006). Mapping the results of Geographically Weighted Regression, en *The Cartographic Journal*, pp. 171-179.

Nayaka, T., Charlton, M., Lewis, P., Fortheringham, S., Brundson, C. (2009). *GWR4. Windows Application for Geographically Weighted Regression Modelling*, University of St. Andrews.

Pulugurtha, S., Dubbu, V., Kotagiri, Y. (2013). Traffic analysis zone level crash estimation models based on land use characteristics, en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 678-687.

Qin, X., Ivan, J., Ravishanker, N. (2004). Selecting exposure measures in crash rate prediction for two-lane highway segments, en *Accident Analysis and Prevention*, 183-191.

Wang, K., Lee, A.H., Yau, K., Carrivick, P. (2003). A bivariate zero-inflated Poisson regression model to analyze occupational injuries, en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 625-629.

Wier, M., Weintraub, J., Humphreys, E., Seto, E., Bathia, R. (2009). An area-level modelo of vehicle-pedestrian injury collisions with implications for land use and transportation planning en *Accident Analysis and Prevention*, pp. 137-145.