

# **LA ACCESIBILIDAD VIAL DEL DEPARTAMENTO DEL VALLE DEL CAUCA. COLOMBIA**

**Maria Fernanda García Aladín\***

**Ciro Jaramillo Molina\*\***

**Jackeline Murillo Hoyos\*\***

\*Pontificia Universidad Javeriana, \*\*Universidad del Valle

## **RESUMEN**

El departamento del Valle del Cauca se localiza en el suroccidente de Colombia. Su población supera los cuatro millones de habitantes, con una densidad de 192 habitantes por km<sup>2</sup>. Su infraestructura de transporte esta constituida por un aeropuerto internacional, un puerto marítimo, una red vial que se extiende por todo el departamento y una red férrea. Con el propósito de efectuar un análisis de accesibilidad vial para el departamento del Valle del Cauca y verificar la sensibilidad de dicha accesibilidad en un escenario futuro, se plantean medidas topológicas, usando indicadores absolutos de tiempo y relativos de trazado, como el factor de ruta y el de trazado-velocidad. El análisis de los indicadores evaluados dio como resultado que el departamento del Valle del Cauca cuenta con niveles adecuados de accesibilidad vial. El modelo planteado permitió identificar pérdidas de aproximadamente el 50% de dichos niveles, con la definición de escenarios tendenciales y pesimistas.

## **ABSTRACT**

The department of the Valle del Cauca is located in the southwest of Colombia. Its population surpasses the four million inhabitants, with a density of 192 inhabitants by km<sup>2</sup>. Its infrastructure of transport this constituted by an international airport, a seaport, a road network that extends by the entire department and an iron network. In order to carry out an analysis of road accessibility for the department of the Valle del Cauca and to verify the sensitivity of this accessibility in a future scene, measures topological, using indicating absolute of time and relative of layout consider, like the factor of route and the one of draw up-speed. The analysis of the evaluated indicators gave like result that the department of the Valle del Cauca counts on suitable levels of road accessibility. The raised model allowed approximately identifying losses of 50% of these levels, with the definition of tendencies and pessimistic scenes.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El favorecer la competitividad de una región y la nación requiere el aprovechamiento eficiente de su situación geoestratégica, de su infraestructura física y de servicios, en este sentido, la infraestructura de transporte y su esquema de operación son determinantes del nivel de competitividad. El aumento del desarrollo de comercio puede beneficiar la economía, pero el transporte ha generado una gran complicación debido al tráfico generado por éste en todas las modalidades.

La accesibilidad es una medida de la facilidad o dificultad de comunicación de un punto con respecto a otros puntos de un territorio, utilizando uno o varios modos de transporte (Izquierdo et al., 1994). Por lo tanto la accesibilidad es una valiosa herramienta de planificación para las infraestructuras viales actuales y las propuestas por los programas de actuación.

Las actuaciones en infraestructura de transportes modifican el marco territorial, ya que producen una reducción de distancias y una concentración del espacio, de esta manera el espacio geográfico no se concibe como un todo absoluto, sino como un marco en el que las condiciones de accesibilidad se alteran constantemente. En este ámbito el análisis de los indicadores de accesibilidad resulta ser una herramienta útil en la planificación para medir el impacto de una o varias actuaciones en una red de transporte, este aspecto se ha convertido en un elemento importante para la planificación de infraestructuras de transporte, pero se tienen pocos antecedentes a nivel latinoamericano.

## 2. MARCO TEÓRICO

La accesibilidad se puede definir como una medida de la facilidad de comunicación entre actividades o asentamientos humanos, utilizando un determinado sistema de transporte (Izquierdo et al., 1994), también permite medir la facilidad o dificultad aportada por las infraestructuras y medios de transporte para la realización de un viaje considerando la potencialidad del origen para generar un viaje y la capacidad del destino para atraer un viaje. Las unidades usualmente empleadas son distancia, tiempo y costo de viaje.

Para efectuar los análisis de accesibilidad se emplea la teoría de grafos (Petrus y Seguí, 1991) que puede utilizarse en el estudio morfométrico de redes y constituye un tipo de análisis explicativo que permite conocer con base a datos parciales, que aspecto tiene la estructura completa de la red o su desarrollo. Permite además, identificar problemas geográficos a partir de las relaciones entre los asentamientos y las redes de transporte, en función de la propiedad topológica, su conectividad y no de sus dimensiones.

### 2.1 Niveles de accesibilidad

Se distinguen tres niveles de accesibilidad (Petrus y Seguí, 1991):

#### 2.1.1 Accesibilidad Relativa ( $a_{ij}$ )

Mide la calidad de conexión entre dos puntos situados en un mismo territorio.

#### 2.1.2 Accesibilidad Integral ( $A_i$ )

Mide el grado de interconexión de un nodo, con los demás de la misma zona.

#### 2.1.3 Accesibilidad Global ( $A$ )

Es la suma de las accesibilidades integrales de todos los nodos de la zona de estudio.

La accesibilidad relativa e integral permite establecer comparaciones entre puntos del área en estudio y sacar conclusiones en ese ámbito, y la accesibilidad global es representativa del grado de conexión de toda la red y refleja el efecto sobre ella de cualquier actuación.

### 2.2 Indicadores topológicos

Existe una variedad de indicadores de accesibilidad, con formulaciones muy diversas, sin embargo, todos ellos permiten evaluar la calidad de las comunicaciones entre diversos puntos situados en la misma zona de estudio. Los análisis de accesibilidad pueden aplicarse a estudios de planificación de infraestructuras de transporte, análisis de redes de transporte público, diseño de políticas de integración territoriales y cohesión social entre regiones, etc. El análisis de accesibilidad se enfoca sobre la funcionalidad de la actuación dentro del contexto geográfico el que se inserta, desde un punto de vista esencialmente descriptivo de los efectos del transporte en el territorio (Barea y Martínez, 2002). Las medidas Topológicas son las más antiguas y sólo consideran la red de transporte, entre los indicadores topológicos más comunes se tienen:

#### 2.2.1 Factor de Ruta, $r_{ij}$ – Factor de Ruta Integral, $R_i$

Es un indicador que trata de medir la calidad del trazado (Izquierdo et al., 1994), es decir, su grado de aproximación a la línea recta y si las condiciones de la ruta permiten realizar el viaje en tiempo y condiciones adecuadas. Se calcula con la construcción de dos matrices, una para las distancias sobre la red y otra para las distancias en línea recta desde y hacia cada uno de los nodos.

$$r_{ij} = \frac{d_{ij}}{d_{ij}^o} \quad (1)$$

Donde:  $r_{ij}$  : factor de ruta entre los nodos i y j  
 $d_{ij}$  : mínima distancia por la red de comunicaciones entre i y j  
 $d_{ij}^o$  : distancia geográfica o en línea recta de i a j

Para determinar el factor e ruta integral, se emplea la siguiente expresión:

$$R_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{j=n} \frac{d_{ij}}{d_{ij}^o} \quad (2)$$

Siendo:  $R_i$  : factor de ruta integral del nodo i  
n : número de nodos

### 2.2.2 Índice Trazado – Velocidad, $Itv_i$

Es una variedad del factor de ruta, sus resultados se representan gráficamente utilizando curvas isócronas (Izquierdo et al., 1994), las curvas de valores más altos corresponden a las zonas más inaccesibles. Se calcula con la construcción de dos matrices, una para los tiempos de recorrido sobre la red y otra para tiempos de recorrido en línea recta desde y hacia cada uno de los nodos.

$$Itv_{ij} = \frac{t_{ij}}{t_{ij}^o} \quad (3)$$

Donde:  $Itv_{ij}$  : indicador trazado velocidad entre los nodos i y j  
 $t_{ij}$  : tiempo mínimo de recorrido de i a j utilizando la red  
 $t_{ij}^o$  : tiempo ficticio que se tardaría en recorrer la distancia i-j en línea recta a la velocidad media de circulación

$$itv_i = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=n} t_{ij}^o} \quad (4)$$

Siendo:  $itv_i$  : indicador trazado velocidad del nodo i  
n : número de nodos

### 2.2.3 Indicador Absoluto de Tiempo Global, $T_i$

Es un indicador que mide la suma de tiempos desde un punto a todos los demás (Sarmiento et al., 2000) El punto de menor sumatoria de tiempo es el mejor comunicado. Este indicador tiende a favorecer los puntos ubicados hacia el centro de una red por su localización geográfica.

$$T_i = \sum_{j=1}^{j=n} t_{ij} \quad (4)$$

Donde:  $t_{ij}$  : tiempo mínimo de recorrido de i a j utilizando la red  
n : número de nodos

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Definición del escenario**

Se definió un escenario conformado por tramos de vía con un flujo vehicular de camiones semanal mayor a 5000 vehículos con el propósito de seleccionar tramos de vía que conecten núcleos con actividades económicas estratégicas. Bajo esta condición de frontera, la red vial quedó constituida esencialmente por dos corredores en sentido longitudinal y un corredor en sentido transversal.

#### **3.2 Recopilación y procesamiento de información**

De la red vial es necesario conocer detalladamente el tipo de vía, la longitud de cada uno de sus tramos, longitudes y tiempos de viaje entre nodos, velocidades de diseño, marcha, recorrido y operación. De los nodos es importante conocer el número de habitantes, e identificar dentro de la región de estudio, zonas que se destacan por alguna actividad económica (GobValle, 2006).

A continuación se describe la información recopilada para cada corredor: Tipo de vía, longitud, velocidad promedio de recorrido (De Angulo, 2006) y niveles de servicio, tránsito promedio diario semanal, TPDS, composición vehicular distribuida en autos, buses y tipo de camión (INVIAS, 2004). Esta información es consignada en el documento Volúmenes de Tránsito que son publicados anualmente, para el análisis efectuado se han tomado los volúmenes correspondientes al año 2004, para definir la carga transportada por cada uno de los corredores seleccionados se empleó el Espectro de Carga Colombiano (García, 2002) el cual es producto del procesamiento estadístico de los pesajes de camiones realizados en las carreteras nacionales y los pasajeros movilizados en cada corredor han sido calculados de acuerdo a los reportes suministrados por la Terminal de Transportes de Santiago de Cali. Se ha definido un índice de ocupación para autos de 1,5 correspondiente al 30% de su capacidad, y para vehículos de servicio público de 19 sillas un índice de ocupación de 9 sillas, que corresponden al 47% de su capacidad.

Esta información ha sido ordenada y depurada en hojas de cálculo en el programa Excel<sup>®</sup>, para su posterior cambio de formato como base de datos y permitir general las relaciones entre los atributos y las entidades en la plataforma ArcGIS<sup>®</sup>.

#### **3.3 Diagnóstico de las condiciones de operación**

Con la información recopilada y procesada se efectúa el diagnóstico de las condiciones de operación para cada uno de los tramos de la red vial seleccionada.

En la red vial seleccionada se encuentra una composición vehicular distribuida en autos, buses y camiones de tipo C2, C3, C3S2 y C3S3 y un promedio de Tránsito Promedio Diario Semanal de 8700 vehículos, con respecto a la participación por cada tipo de vehículo, los autos tienen una participación que oscila entre el 37% y el 83% con un promedio del 60%, los buses tienen una participación que oscila entre el 5% y el 21% con un promedio del 14% y los camiones tienen una participación que oscila entre el 9% y el 53% con un promedio del 26%, y de acuerdo al tipo de camión el mayor porcentaje de circulación es el tipo C2, la carga transportada se ha calculado anualmente para cada tramo de la red, encontrándose movimientos de carga que oscilan entre los 4 y los 42 millones de toneladas. Las mayores cantidades de carga movilizadas se presentan en los corredores Santiago de Cali – Yumbo y Buga – Tuluá – La Paila, y los pasajeros movilizados se han calculado anualmente para cada tramo de la red, encontrándose movimiento de pasajeros en autos en un rango que oscila entre

1 y 8 millones de pasajeros, con un promedio de 3 millones, y un movimiento de pasajeros en bus en un rango que oscila entre 1 y 12 millones de pasajeros, con un promedio de 4 millones. En promedio la red moviliza el 44% de los pasajeros en Autos, y el 56% en Buses.

### **3.4 Calculo de los niveles de accesibilidad**

Para determinar los niveles de accesibilidad se ha estudiado la red con la teoría de grafos y se procede con el cálculo de los indicadores identificados anteriormente.

#### *3.4.1 Factor de Ruta, $r_{ij}$ -Factor de Ruta Integral, $R_i$ .*

Para el cálculo de este indicador es necesario definir dos matrices de distancias, una sobre la red y otra en línea recta, con las que se define una longitud total sobre la red de 541,53 km y una longitud de 489,05 km medida sobre la cartografía digital. El factor de ruta define la calidad del trazado de los arcos, con el cálculo de este indicador se observa que los núcleos de Buenaventura y Loboguerrero obtienen los valores más alejados de la unidad, siendo estos los municipios con condiciones de accesibilidad menos favorables, esencialmente por sus características topográficas que generan condiciones geométricas y de operación menos eficientes, mientras que los municipios de Santander de Quilichao y Jamundí tienen los mejores niveles de accesibilidad debido al arco Santiago de Cali – Jamundí que presenta unas características geométricas como alineamiento en recta, pendientes longitudinales mínimas, favoreciendo de esta forma las condiciones de accesibilidad evaluadas con este indicador topológico. Existe una diferencia de niveles de accesibilidad de 0,147 entre el más bajo y el más alto, que corresponde a una diferencia de aproximadamente el 14%. Con los factores de ruta integrales calculados para cada nodo se calcula el factor de ruta global que corresponde a la suma de los factores integrales, para el cual se obtuvo un valor de  $Fr = 1,098$ , indicando unas condiciones de accesibilidad muy favorables para el departamento del Valle del Cauca, por estar tan próximo a la unidad, es decir que la red vial estudiada esta conformada por arcos con una buena calidad en su trazado.

#### *3.4.2 Índice de Trazado Velocidad, $Itv_i$ .*

Para el cálculo de este indicador se construyeron dos matrices de tiempos, una sobre la red y otra en línea recta, con las que se define un tiempo de viaje sobre la red de 507,04 min y en línea recta de 455,70 min. Se observa que los municipios de Buenaventura y Loboguerrero obtienen los menores niveles de accesibilidad, mientras que los municipios de Santander de Quilichao y Jamundí presentan los mejores. Existe una diferencia de niveles de accesibilidad de 0,148 entre el más bajo y el más alto, que corresponde aproximadamente a una diferencia del 15%. Con los índices de trazado -velocidad integrales calculados para cada nodo se calcula el índice de trazado velocidad global que corresponde a la suma de los índices de trazado velocidad integrales, para el cual se obtuvo un valor de  $Itv = 1,041$ , indicando unas condiciones de accesibilidad muy favorables para el departamento del Valle del Cauca, por estar tan próximo a la unidad. Con los valores obtenidos se efectúa una representación gráfica con curvas de isoaccesibilidad para visualizar con facilidad las zonas con menores posibilidades de accesibilidad cuyos valores se alejan de la unidad.

#### *3.4.3 Indicador Absoluto de Tiempo Global, $T_i$ .*

Este indicador se construye con la sumatoria de los tiempos de viaje entre cada núcleo y los demás núcleos. Se encontró que los municipios de Buga, Santiago de Cali, Palmira y Mediacanoa son los núcleos con menor tiempo de viaje por ser los núcleos centrales de la red vial definida, mientras que Cartago, la Tebaida, Cerritos y Buenaventura obtienen mayores tiempos de viaje debido a que son los núcleos más distantes de la red. Con este indicador se

observa que los municipios de Buga, Santiago de Cali, Palmira y Mediacanoa presentan los mejores niveles de accesibilidad, son los que requieren menos tiempo para conectarse con todos los nodos, dichos municipios se favorecen por estar ubicados en la zona central del departamento, siendo paso obligado para posibilitar las conexiones entre todos los municipios. Adicionalmente se observa que los municipios de Cartago, la Tebaida, Cerritos y Buenaventura invierten el doble del tiempo que los municipios con mejores condiciones de accesibilidad.

### **3.5 Evaluación de sensibilidad ante escenarios futuros**

Con el propósito de validar la importancia de los análisis de accesibilidad para la planificación de infraestructuras de transporte, se definen dos escenarios futuros, uno tendencial y otro optimista, con condiciones limitadas por el nivel de servicio.

El Nivel de Servicio-NS por su parte es una medida cualitativa en función de la comodidad que experimentan los usuarios al transitar por una vía, la facilidad de maniobra y su velocidad de operación. El NS A indica flujo libre, absoluta libertad para maniobrar y escoger la velocidad, por el contrario el NS F indica congestión, largas colas y pocas posibilidades de realizar maniobras. El NS puede cambiar en función del crecimiento normal del tránsito, del deterioro de la vía o de un accidente que genere represamiento vehicular por un cuello de botella, entre otros. Para la definición de los niveles de servicio planteados en cada escenario, no se acota una frontera temporal que justifique estos valores, dado que no se efectúa un crecimiento de los volúmenes vehiculares en el tiempo para definir el tiempo en el que estos niveles tomarían estos valores supuestos, este ejercicio se plantea con el propósito de medir la variación de los niveles de accesibilidad en escenarios futuros.

El primer escenario, es el tendencial, en este no se efectúa ninguna inversión en lo que corresponde a infraestructura vial, se evidencia un aumento en el tránsito promedio diario en cada uno de los arcos, generando como consecuencia una disminución de las velocidades de recorrido, y un NS D, con el que se aumentan los tiempos de viaje. El segundo escenario, el optimista, considerar una variación en la sección transversal de los arcos que llegan a Buenaventura, se define una sección en doble calzada en las rutas, Yumbo – Mediacanoa, Buga – Mediacanoa, Mediacanoa – Loboguerrero y Loboguerrero – Buenaventura. Para los escenarios futuros será calculado solamente el índice de Trazado -Velocidad que involucra directamente las variaciones en los tiempos de viaje, las cuales se relacionan con el NS y las respectivas velocidades asociadas a dicha calificación.

#### ***3.5.1 Índice de Trazado – Velocidad para Escenario 1.***

Para el cálculo de este indicador se construyó la matriz de tiempo sobre la red de acuerdo a la velocidad que corresponde a un NS D, con la que se define un tiempo de viaje de 762,82 min., el cual supera en un 50% los tiempos calculados en el año base.

En este escenario la disminución de la velocidad generada por el aumento del tráfico ocasiona aumento en los tiempos de viaje y reduce el nivel de accesibilidad en 0.529, que corresponde a una pérdida del 51% aproximadamente. Para este escenario planteado se identifica al municipio de Cartago con el menor índice de accesibilidad seguido por los municipios de Cerrito, La Paila, Tuluá y Buenaventura. Con los índices de trazado -velocidad integrales calculados para cada nodo se calcula el índice de trazado velocidad global que corresponde a la suma de los índices de trazado velocidad integrales, para el cual se obtuvo un valor de  $I_{tv} = 1,570$ , indicando que las condiciones de accesibilidad ya se encuentran en un rango

desfavorable, con una pérdida global del orden del 50%. Con los valores obtenidos se efectúa una representación gráfica con curvas de isoaccesibilidad para visualizar con facilidad las zonas con menores posibilidades de accesibilidad, cuyos valores se alejan de la unidad.

### *3.5.2 Índice de Trazado – Velocidad para Escenario 2.*

Para el cálculo de este indicador se construyó la matriz de tiempo sobre la red en la cual los arcos que se dirigen a Buenaventura tendrán un NS A con la posibilidad de una vía alterna, una doble calzada, mientras que los otros arcos tendrán NS D, esta condición de mejora define un tiempo de viaje de 713,17 min., el cual supera en un 41% los tiempos calculados para el año base.

Al determinar como doble calzada los tramos que se dirigen a Buenaventura, La disminución de la velocidad generada por el aumento del tráfico ocasiona aumento en los tiempos de viaje y reduce el nivel de accesibilidad en 0.447, que corresponde a una pérdida del 43% aproximadamente. Para este escenario planteado se identifica al municipio de Cartago con el menor índice de accesibilidad seguido por los municipios de Cerritos, Palmira y Puerto Tejada. Con los índices de trazado -velocidad integrales calculados para cada nodo se calcula el índice de trazado velocidad global que corresponde a la suma de los índices de trazado velocidad integrales, para el cual se obtuvo un valor de  $I_{tv} = 1,488$ , indicando que las condiciones de accesibilidad ya se encuentran en un rango desfavorable, con una pérdida global del orden del 40%. Con los valores obtenidos se efectúa una representación gráfica con curvas de isoaccesibilidad para visualizar con facilidad las zonas con menores posibilidades de accesibilidad, cuyos valores se alejan de la unidad, ver en la Figura 1 el contraste de los dos escenarios estudiados.

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

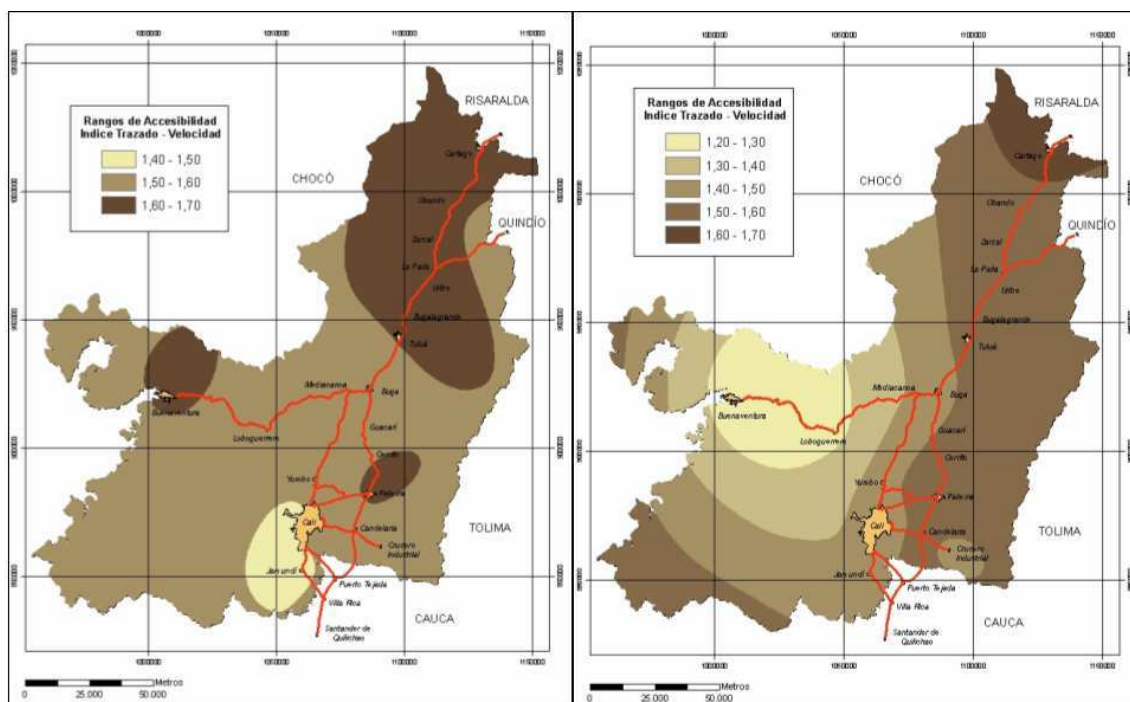
La movilización urbana e interurbana de pasajeros es factor clave de calidad y competitividad de ciudades y regiones. En el Valle del Cauca este factor tiene especial importancia al considerar su distribución demográfica y la condición de ser el departamento más urbanizado del país.

El análisis de los indicadores de accesibilidad resulta ser una herramienta útil en la planificación para medir el impacto de una o varias actuaciones en una red de transporte, siendo un elemento importante de la planificación, priorización y gestión de proyectos de infraestructuras de transporte.

Mediante el cálculo de los niveles de accesibilidad, el planificador dispondrá de una herramienta que le permitirá identificar las regiones con menores posibilidades de movilidad, comparar planes alternativos de transporte, valorar si sirven al objetivo de equilibrio territorial homogenizando sus niveles de accesibilidad, evaluar el impacto y consecuencias de cada actuación prevista y contará con una presentación gráfica de resultados fácilmente asequible para todos.

Se recomienda avanzar en la revisión de la accesibilidad incluyendo distintos modos de transporte, aprovechando la red vial que se ha implementado en la plataforma informática lo que permitiría hacer un análisis conjunto de las redes de infraestructura implementando el concepto intermodal en el transporte.





## Agradecimientos

## REFERENCIAS

Barea, P. y Martínez, O. (2002). Metodologías de Evaluación de la Accesibilidad y nuevos enfoques. V Congreso de Ingeniería de Transporte. Ibeas, A., Díaz, J. y De la Lastra, P., Editores. Universidad de Cantabria. España.

De Angulo, A. (2007). Estudio de Velocidades y su Georreferenciación en la malla vial del Valle del Cauca, Colombia. Tesis de Pregrado Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana Cali. Colombia.

García, M. (2002). Variable Tránsito Colombiana para el Diseño de Pavimentos según ASSHTO. Epiciclos. Pontificia Universidad Javeriana Cali, Colombia.

GobValle -Gobernación Valle del Cauca. (2006). Dirección electrónica:

<http://www.valledelcauca.gov.co/publicaciones.php?id=279>.

INVIAS – Instituto Nacional de Vías. (2004). Anuario estadístico Volúmenes de Tránsito. Colombia.

Petrus, J. y Seguí, J. (1991). Geografía de Redes y Sistemas de Transporte. Editorial Síntesis. España.

Sarmiento, I., Muñoz, J. y Ángel, C. (2000). Análisis de la Accesibilidad en la Región del Occidente Colombiano. IV Congreso de Ingeniería de Transporte. Colomer, J y García, A. Editores. Universidad Politécnica de Valencia. España.

---

Maria Fernanda García Aladín. ([mfgarcia@upj.edu.co](mailto:mfgarcia@upj.edu.co))

Departamento de Ciencias de la Ingeniería y la Producción, Facultad de Ingeniería,  
Pontificia Universidad Javeriana, Calle 18 No. 118 – 250, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia

Ciro Jaramillo Molina ([cjarami@univalle.edu.co](mailto:cjarami@univalle.edu.co))

Jackeline Murillo hoyos ([jackmuri@univalle.edu.co](mailto:jackmuri@univalle.edu.co))

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle  
Calle 13 N0. 100 – 00. Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia