



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Flujos peatonales en infraestructuras continuas: marco conceptual y modelos representativos

Pedestrian Flows in Continuous Infrastructures: Conceptual Framework and Representative Models

Fluxes Piétonniers dans infrastructures continus: cadre conceptuel et modèles représentatifs

Fredy Alberto Guío Burgos

Ingeniero en Transporte y Vías

Especialista en Infraestructura Vial

Candidato a Magíster en Ingeniería con énfasis en Tránsito

Docente de la Facultad de Ingeniería

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – Tunja Colombia

Correo electrónico: fredy.guio@uptc.edu.co – ingefreg@gmail.com

Tipo de artículo: Revisión de tema

Recepción: 2009-07-22

Revisión: 2009-11-18

Aprobación: 2009-11-25

Contenido

1. Introducción
2. Planificación de sistemas peatonales urbanos
3. Caracterización de flujos peatonales
4. Variables de flujo peatonal
5. Modelos representativos de flujo peatonal
6. Conclusiones
7. Lista de referencias



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Resumen. Este artículo de investigación presenta una revisión de las técnicas para caracterización de flujos peatonales en infraestructuras de flujo continuo. También se muestran los principales modelos de flujo utilizados en ingeniería de tránsito para determinar la capacidad y nivel de servicio de las facilidades peatonales. Se encuentra que los modelos más utilizados se basan en las relaciones entre variables macroscópicas de flujo (volumen, velocidad de caminata y densidad o espacio peatonal). Se hace énfasis en la necesidad de encontrar modelos de flujo peatonal que se adapten a las condiciones particulares de las ciudades colombianas, sin tener que recurrir al uso de tablas y valores por defecto, calibrados para entornos con otras características de movilidad peatonal.

Palabras clave: Modelos de flujo continuo, Movilidad peatonal, Variables de flujo peatonal

Abstract. This article presents a revision of the techniques for the characterization of pedestrian flows in infrastructures of continuous flow. The main models of flow used in traffic engineering to determine the capacity and level of service of the pedestrian facilities are shown. It is found that the most used models are based on the relationships among macroscopic variables of flow (flow rate, walk speed and density or pedestrian space). The need for finding pedestrian flow models adapted to the conditions of the Colombian cities is emphasized, without having to appeal to the use of charts and default values, gauged for environments with different characteristics of pedestrian mobility.

Keywords: Continuous flow models, pedestrian mobility, pedestrian flow variables

Résumé. Cet article, résultat d'activités de recherche, présente une révision des techniques pour la caractérisation des flux piétonniers dans infrastructures de flux continu. Ce sont aussi présentés les principaux modèles de flux utilisées dans ingénierie de circulation pour déterminer la capacité et le niveau du service des installations piétonniers. Il est trouvé que les modèles les plus utilisés sont basés dans les rapports entre variables macroscopiques de flux (volume, vitesse de trotte et densité ou espace piétonnier). L'émphase est placée sur la nécessité de trouver modèles de flux piétonnier qui s'adaptent aux conditions particuliers des villes colombiennes, sans recourir à l'usage des tables et valeurs par défaut, qui sont calibrés pour environnements avec des autres caractéristiques de mobilité piétonnier.

Mots-clés. Modèles de flux continu, mobilité piétonnier, variables de flux piétonnier



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publiindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

1. Introducción

Caminar es la más antigua y básica forma de transportarse, todas las personas lo hacen a diario durante sus viajes, bien sea para acceder a los sistemas de transporte público, o desde el estacionamiento del vehículo hasta su sitio de trabajo o compras. Es acertado afirmar que todos somos peatones.

Caminar, además de ser placentero y necesario, genera beneficios para la salud de las personas, permite la interacción social y la asimilación del entorno, además determina una de las formas más eficientes de desplazarse.

Dentro del sistema de transporte urbano, el subsistema peatonal reviste gran importancia puesto que un gran porcentaje de los viajes urbanos se realiza a pie, de hecho, Dueñas (2000) plantea que en las ciudades colombianas que tienen transporte público colectivo urbano (TPCU), cerca del 70% de los viajes motorizados se realizan mediante dicho sistema, esto ha podido constatarse en diversos estudios de movilidad, lo cual implica que, para acceder a estos sistemas, se realizan etapas del viaje a pie.

No obstante, desde la llegada de la "era de la motorización" a comienzos del siglo XX, se dio prioridad a la planeación, diseño y construcción de infraestructura para vehículos, dejando al peatón un papel secundario e inseguro dentro de la red vial urbana, por lo que resulta ser el principal afectado por las externalidades generadas por los sistemas de transporte motorizados, especialmente accidentalidad y contaminación (sonora, del aire y del agua).

Según el Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá (IDU) (2005), la accesibilidad peatonal dentro de un sistema de transporte es "la facilidad en el desplazamiento de los peatones para acceder o interactuar en un espacio público. En términos prácticos implica que los peatones logren: llegar, ingresar, usar, salir, de los espacios de origen o destino referidos a intereses particulares". Dentro del entorno urbano hay una categoría de peatones especialmente vulnerable, los peatones que tienen restricciones en su movilidad, estos peatones tienen el derecho constitucional a la movilidad (niños, adultos mayores, personas con limitaciones sensoriales, personas con limitaciones motrices, entre otros).



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Debido a la insostenibilidad de un sistema de transporte urbano basado solamente en automóviles, se han realizado esfuerzos tendientes al desarrollo de sistemas de transporte masivo y no motorizado, que permitan optimizar el uso del espacio urbano. Según Aly (2008), el uso intensivo del automóvil particular no solo supera la sostenibilidad de la infraestructura vial, sino que causa desbalances sociales, económicos y ambientales.

La creciente preocupación por el cambio climático debido al uso de combustibles fósiles, el alto costo operativo de los sistemas de transporte y la pandemia de obesidad de las personas, cada vez más sedentarias y dependientes del automóvil, han sido otros detonantes para el desarrollo de sistemas integrales de transporte que vuelven su interés hacia los modos no motorizados.

Las ciudades pequeñas e intermedias son particularmente propicias para el tránsito de peatones, caminar es una alternativa posible e imprescindible dentro de las opciones de viaje para las personas, especialmente en las zonas centrales, donde se concentra una amplia variedad de actividades atractoras de viajes (comercio, gobierno, entidades financieras, sitios de recreación, compras, entre otros), sin embargo, estas zonas céntricas no siempre son aptas para soportar este alto flujo peatonal, no es raro encontrar aceras angostas o en mal estado, con una variedad de obstáculos interpuestos, que ofrecen un deficiente nivel de servicio al peatón.

En la actualidad, el ingeniero de tránsito posee una metodología para análisis de flujo peatonal que se pueda aplicar en las condiciones de las zonas céntricas de las ciudades pequeñas e intermedias de Colombia (zona comercial, aceras angostas y en regular estado, presencia de obstáculos, bajas velocidades de caminata y alta fricción con otros peatones); por el momento, se cuenta con el método del Highway Capacity Manual (HCM 2000 Capítulos 11 y 18) de la Transportation Research Board (TRB), sin embargo, este manual se basa en modelos de flujo peatonal encontrados por autores como Pushkarev (1975), Fruin (1990), Navin y Wheeler (1969) que fueron obtenidos considerando peatones en otro tipo de infraestructuras como pasillos del subterráneo o colegios, y en otros entornos como Inglaterra o Estados Unidos.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

2. Planificación de sistemas peatonales urbanos

La movilidad de peatones y ciclistas tradicionalmente se ha subestimado o considerando apenas desde la óptica recreativa, olvidando que es un legítimo e imprescindible sistema de transporte Wigan (1994). Una de las posibles causas de esta situación es la escasa disponibilidad de información respecto a los viajes en los modos no motorizados, lo que contrasta con la información disponible respecto a movilidad en sistemas motorizados.

La planificación de sistemas de transporte peatonal debe buscar los siguientes objetivos:

2.1 Aumentar la seguridad

El peatón es el usuario más vulnerable dentro del sistema de transporte urbano, pues está desprovisto de defensa física contra el tránsito. La tendencia actual es la utilización de técnicas como la pacificación del tránsito o tránsito calmado, que busca concientizar al conductor sobre la importancia del peatón y su prelación en el uso de la infraestructura.

Según estadísticas del Fondo de Prevención Vial (2008), en Colombia durante el año 2007 murieron 1.670 peatones, que equivalen al 30.9% de los muertos totales en accidentes de tránsito, y resultaron heridos 9.696 peatones, que corresponden al 25% de los heridos totales. Afortunadamente, a pesar de estas cifras, la tendencia histórica de peatones muertos en accidentes ha sido decreciente al 5.79% anual durante los últimos diez años.

2.2 Mantener la continuidad de la red peatonal

Handy (1996) resalta el efecto que tiene el urbanismo en el comportamiento de las personas, pues menciona que debido a que los peatones ven, oyen, sienten, temen y piensan, el entorno urbano circundante juega un gran papel en la decisión de caminar como modo de transporte, el hecho de contar con una red peatonal continua fomenta la caminata como modo de transporte urbano.

Según Aly (2008), la coordinación entre uso del suelo, transporte y desarrollo urbano es un elemento clave para abordar el problema de la planificación urbana, y gestionar la demanda de transporte.



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Una de las características principales del peatón en cuanto a su movilidad, es la gran versatilidad en los movimientos que puede realizar, lo que se traduce en la capacidad para sortear obstáculos diversos. Esta condición ha propiciado la falta de planificación de sistemas de transporte peatonales, pues, al contrario, el espacio destinado para el peatón se "aprovecha" para colocar una gran variedad de elementos tales como: postes para iluminación y redes de servicios públicos, señales de tránsito, mobiliario urbano, zonas verdes, ventas en la calle y rampas para vehículos, entre muchos otros.

Por otra parte, la infraestructura peatonal suele tener costos significativamente bajos, respecto a otros sistemas, requiere poco mantenimiento y tecnología. Las inversiones en espacios peatonales son consideradas marginales respecto a la infraestructura para vehículos, incluso en aspectos de diseño suele obviarse o subestimarse al peatón, por ejemplo, al permitir que se altere la sección de la acera para el acceso de un vehículo a un garaje privado, maniobra que se realiza un par de veces al día, pero la alteración geométrica afecta a todos los peatones, que pueden ser miles en una zona céntrica.

2.3 Permitir la conectividad de la red vial peatonal

La integración modal es necesaria en un sistema de transporte urbano, la infraestructura peatonal proporciona accesibilidad a los demás sistemas de transporte. Una inadecuada red peatonal puede generar pérdidas de tiempo considerables, o inducir riesgo de accidentes por invasión de calzada o cruces a mitad de cuadra.

En muchos casos, el éxito o fracaso de un sistema de transporte urbano depende del grado de conectividad y accesibilidad del mismo, y su capacidad para integrarse con otros modos de transporte, especialmente los no motorizados.

2.4 Mejorar la calidad del servicio peatonal

Hay muchas formas de mejorar la calidad del servicio peatonal, por ejemplo, en vías con alta demanda, al aumentar la capacidad de la red vial, se induce una mejora en la calidad del servicio percibida por los peatones. Mediante el diseño urbanístico, el paisajismo, la disposición adecuada del uso del suelo, señalización, demarcación, protección contra el clima, disposición de plazas, paseos peatonales, entre otros, se logra este objetivo.



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

La importancia de la planificación del sistema de transporte urbano radica en que la interacción social de las personas se da principalmente en las zonas peatonales, pues la caminata permite la condición de ciudadanía a las personas. Southworth (2005) concluye que el transporte peatonal no solamente reduce la congestión y la contaminación, sino que además tiene un valor social y recreacional. En otras palabras, cuando se propicia el desarrollo de zonas peatonales, se está pensando en calidad de vida para los habitantes de la ciudad. Desafortunadamente esta visión de la movilidad no ha prosperado en todas las urbes del medio colombiano, y se piensa más en vehículos que en personas. Para ilustrar esta situación, me permito citar un ejemplo en la ciudad de Tunja, en la carrera 11 entre calles 18 y 19.

Esta es una típica vía de centro histórico, con una sección transversal de 9.6 metros, con dos aceras de 1.8 y 2.3 m respectivamente y una calzada vehicular de 5.3 metros. En un estudio realizado por Vargas (2008) se encontró que en un día típico, durante 14 horas hay un volumen de 42.340 peatones y 5.061 automóviles, de los cuales el 60% son taxis.

Es claro ver la gran diferencia en la destinación del espacio urbano, pues la ocupación media entre autos y taxis es de 1.2 según Guío y Dueñas (2009), estamos hablando de una gran desproporción, pues el 87% de los usuarios, que son los más vulnerables, tienen destinado apenas el 44% de la sección transversal de la vía. Pero la situación para el peatón es más crítica, pues en esta zona se encuentran obstáculos, especialmente gran actividad de ventas en las aceras, lo que reduce el ancho efectivo de caminata aún más. La figura 1 muestra una fotografía del sector.

Antes de la era del automóvil, como afirma Southworth (2005), la "*caminabilidad*"¹ en las ciudades era esencial, prácticamente toda la red vial urbana era peatonal, la infraestructura se compartía con vehículos de movimiento lento como vagones, carruajes y vehículos de carga mediante tracción animal. Los patrones de actividades estaban muy concentrados, se apreciaba una alta densidad residencial, y todo debía conectarse mediante redes peatonales continuas. Esta condición definía el tamaño de las urbes en función de la distancia para caminar (típicamente menos de media hora, lo que equivale a un radio máximo de unos 2 Km).

¹ Término traducido de la palabra "Walkability" que, según Southworth (2005), "es la capacidad del entorno urbano de facilitar y fomentar la caminata, brindando a los peatones comodidad y seguridad, conectando a las personas con variedad de destinos dentro de un tiempo y esfuerzo razonable, y ofreciendo condiciones de interés visual a través de la red".



Figura 1. Tunja, carrera 11 entre calles 18 y 19.
Fuente: Guío y dueñas (2009).

La búsqueda de movilidad, accesibilidad y eficiencia en los sistemas de transporte urbano ha menguado mucho la *caminabilidad*, pues cada avance tecnológico, en la perspectiva histórica, ha tenido impactos negativos en el ambiente peatonal. En las ciudades de hoy es imposible para peatones o ciclistas desplazarse con libertad, la prelación a los modos motorizados generó una gran cantidad de condiciones adversas a su movilidad, tales como obstáculos, discontinuidades, barreras físicas, distanciamiento de actividades, inseguridad y contaminación.

Cuando consideramos los aspectos relativos a la provisión de infraestructura nueva, no podemos hablar de un "peatón de diseño", pues los peatones corresponden a un amplio rango de condiciones, por ejemplo motivo del viaje, edad, peso, condición física, capacidad visual, responsabilidad y tiempo de percepción-reacción.

3. Caracterización de flujos peatonales

El ingeniero de tránsito suele determinar las variables de flujo peatonal mediante la realización de toma de información primaria o estudios de campo, la metodología para estos estudios suele variar dependiendo del objetivo que se pretenda lograr, así, por ejemplo, un estudio de volumen peatonal que pretenda determinar el grado de utilización de una acera, puede no requerir la distinción del tipo de peatón; mientras que un estudio de volúmenes para diseñar un cruce en una zona de alto flujo peatonal requiere necesariamente conocer la participación y características de cada categoría considerada dentro de la corriente peatonal.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Existen básicamente dos técnicas para recolección de datos respecto a movilidad peatonal: manualmente y mediante sensores. La técnica manual se ha utilizado tradicionalmente en los estudios peatonales, y es indispensable, por ejemplo, para los estudios de inventario vial, auscultación del estado de la red o inventario de señalización; la principal restricción que presenta esta técnica es que la presencia de personal en campo puede interferir con el comportamiento usual de los peatones, induciendo errores.

El uso de sensores para realizar estudios de tránsito es muy común, especialmente en países con economías desarrolladas, donde la mano de obra es costosa. Dentro del amplio espectro de sensores de todo tipo, el más utilizado es la cámara de video por su versatilidad, ya que permite realizar una gran variedad de estudios posteriores sobre el video con un mínimo de error, sin embargo presenta algunos inconvenientes como el requerimiento de un punto de observación adecuado, generalmente a una cota superior respecto a la red, adicionalmente, esta técnica requiere mayor tiempo para análisis de la información, lo que puede resultar más costoso.

Actualmente existe software especializado que permite la captura de información en tiempo real con base en cámaras de video, sin embargo su aplicación resulta costosa y requiere el ajuste minucioso del ángulo, distancia y dimensiones de la infraestructura por considerar, además, debido al comportamiento impredecible de los peatones, puede presentar errores significativos. Se recomienda su utilización en infraestructuras con gran demanda y un entorno sin elementos distractores, por ejemplo pasillos en sistemas de transporte masivo.

Los principales estudios para caracterizar flujos peatonales son:

3.1 Estudios de inventario

Su objetivo es determinar las características geométricas de la infraestructura peatonal y otras condiciones físicas como su estado, la localización de obstáculos, riesgos y condiciones que puedan afectar el movimiento de las personas. Los estudios de inventario también consideran la señalización vial para peatones, esto involucra: señales verticales, demarcación horizontal, dispositivos de control del tránsito, elementos de apoyo como barandas, rampas, zonas sensoriales, entre otras.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Como resultado de estos estudios, el ingeniero de tránsito determina las características de la oferta y puede detectar falencias de la misma.

El nivel de detalle del estudio de inventarios es relativo al nivel del proyecto que se esté desarrollando, de esta forma, un proyecto con fines de planificación de transporte requerirá un nivel de detalle bajo, mientras que un estudio de nivel operativo necesitará mayor precisión, especialmente si se van a calibrar modelos de flujo o modelos de simulación microscópica.

Debe tenerse especial cuidado al referenciar aquellos elementos que brindan accesibilidad a los peatones con movilidad restringida, como escalones, rampas, sensores, delimitadores, canalizadores, etc. así como los elementos propios del mobiliario urbano, como sillas, postes de servicios, iluminación, zonas verdes, entre otras.

3.2 Volumen de tránsito peatonal

También denominado aforo o conteo, es un estudio realizado comúnmente en ingeniería de tránsito, su objetivo es cuantificar la demanda de infraestructura peatonal, especialmente su variación (espacial y temporal), distribución (por sentidos o cruces en accesos de intersecciones) y composición (de acuerdo con los atributos de los peatones, como género, edad y ocupación).

Con las condiciones tecnológicas actuales, los aforos peatonales son realizados mediante sensores que el peatón generalmente no detecta como lo son las cámaras de video, sin embargo, su utilización en los aforos implica contar con software especializado para conteo. Sin embargo, en muchos sistemas con altos flujos peatonales, los conteos son realizados en forma mecánica o mediante sensores electromagnéticos u ópticos.

En los estudios de ingeniería de tránsito aún se utiliza mucho el conteo manual, puesto que en ocasiones se requiere identificar algunas características del peatón, por ejemplo su edad; realizar esta identificación mediante el uso de sensores puede resultar muy costoso e involucrar grandes errores de medición. Otro aspecto que ha inducido la continuidad en el uso de conteos manuales es el costo de la mano de obra dado que no se requiere preparación especial para realizar este tipo de estudio.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

3.3 Velocidad de caminata

Los estudios de velocidad peatonal tienen muchas aplicaciones en ingeniería de tránsito, pues esta es la variable de flujo más importante.

El objetivo de realizar un estudio de velocidades de caminata es llegar a determinar los parámetros adecuados para realizar diseño de infraestructura peatonal. Cada diseño está asociado a parámetros distintos, por ejemplo en un cruce peatonal podría ser necesario utilizar el percentil 15 de las velocidades de caminata, mientras que para calcular el tiempo de viaje se utilizaría la velocidad media de caminata.

La velocidad de caminata se mide principalmente utilizando técnicas de observación directa en campo, esta observación suele realizarse en una base con longitud predeterminada, y la medición del tiempo de caminata en la misma. La longitud de la base debe conservar dos criterios fundamentales, primero, si la medición es manual, el observador debe tener tiempo suficiente para realizar las operaciones respectivas en el cronómetro, de manera que los posibles errores en el registro de los datos sean bajos respecto a la observación, así, si se tiene una velocidad media de caminata de 1.2 m/s, se requerirá una base de al menos 3 m para que el observador tenga al menos un par de segundos para realizar la medición del tiempo. En segundo lugar, debe tenerse en cuenta que, si se trata de observar una velocidad puntual, debe procurarse utilizar la menor longitud de base posible. De esta forma, en el estudio de velocidades la longitud de la base estará en función del objetivo del estudio y de la tecnología disponible para la medición del tiempo.

Cuando se utilizan sensores es común trabajar con longitudes de base menores, dependiendo de las condiciones presentes en campo. Dentro de los sensores más utilizados se encuentran los de tipo óptico (fotoceldas), los electromagnéticos y las cámaras de video. En todos los casos debe definirse previamente la longitud de la base, y ubicar el sensor o los observadores de manera que no alteren las condiciones normales de operación en la infraestructura.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

3.4 Densidad peatonal

La medición de densidad peatonal se realiza con el fin de encontrar condiciones operativas, especialmente cuando se trata de evaluar atributos como la comodidad. Existen dos condiciones que deben considerarse en los estudios de densidad: peatones en movimiento y peatones en áreas de espera.

Los estudios para determinar densidad peatonal también se basan en observación directa en campo. Debe tenerse en cuenta que la densidad es una variable estática, por esta razón, su observación manual suele ser dispendiosa.

El método de medición manual de la densidad se basa en definir previamente un área o áreas de observación, estas áreas deben tener un tamaño lo suficientemente grande como para tener buena probabilidad de que en un instante dado se observe un número significativo de peatones. Pero el tamaño debe ser lo suficientemente pequeño para que la observación sea instantánea, de manera que no entren ni salgan peatones al área considerada durante la observación.

El método más utilizado para determinar densidad es la utilización de cámara de video o cámara fotográfica, puesto que sobre una imagen puede contarse el número de peatones por unidad de área con precisión.

Usualmente suele determinarse indirectamente la densidad, sin recurrir a su medición, a partir de la ecuación fundamental del flujo vehicular, con base en conteos de flujo y determinación de velocidad media espacial.

3.5 Estudios de observación

Los estudios de observación son muy importantes dentro del proceso de investigación de campo, pues permiten detectar posibles falencias del sistema peatonal, ya sean debidas al peatón, a la infraestructura, a la interacción con otros sistemas o al entorno.

Los principales estudios de observación peatonal se enfocan hacia identificar características del comportamiento de los peatones, especialmente los conflictos con los vehículos, el acatamiento de las normas de tránsito y el llamado “comportamiento exhibido”, principalmente en los cruces.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

4. Variables de flujo peatonal

Existen dos tipos de infraestructuras de tráfico peatonal: infraestructuras de flujo continuo o ininterrumpido (aceras, senderos peatonales, escaleras, vías exclusivas) e infraestructuras de flujo discontinuo o interrumpido (pasos de cebra en intersecciones semaforizadas, y cruces peatonales en intersecciones no semaforizadas); este artículo se encamina hacia el estudio del flujo continuo de peatones.

Se distinguen dos clases de parámetros en el análisis de corrientes de tráfico peatonal: *parámetros macroscópicos*, que describen la corriente de tráfico como un todo, y los *parámetros microscópicos*, que describen el comportamiento de peatones individuales o interacciones entre ellos.

4.1 Variables macroscópicas

Los tres parámetros macroscópicos principales son: volumen o tasa de flujo, velocidad y densidad.

Volumen peatonal

Es el número de peatones que pasan por un punto o sección transversal de una infraestructura durante un periodo de tiempo determinado. El volumen peatonal debe considerar el ancho de la sección transversal, generalmente se expresa en términos de ancho unitario de un metro. Comúnmente se realizan aforos durante periodos de tiempo menores que una hora, en este caso el volumen se denomina flujo, o tasa de flujo peatonal, que suele expresarse en pe/h/m.

No debe confundirse el volumen peatonal con la demanda peatonal, pues aunque en condiciones de flujo estable el volumen equivale a la demanda de infraestructura, una vez que se ha alcanzado la capacidad (máximo volumen), de allí en adelante, la demanda será mayor al volumen de tránsito, pues el número de personas que desean utilizar la infraestructura es mayor del número de personas que pueden pasar por un punto o sección transversal por unidad de tiempo.

Velocidad de caminata

Se define como la relación entre la distancia caminada por un peatón y el tiempo empleado en hacerlo. Generalmente la velocidad de caminata se expresa en m/s, depende grandemente de la proporción de adultos mayores



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

en la población caminante, así como de la pendiente, según TRB (2000) proporciones de adultos mayores superiores al 20% pueden reducir la velocidad media de 1.2 m/s a 1.0 m/s, así como las pendientes superiores al 10% reducen la velocidad en 0.1 m/s. Adicionalmente, existen otros factores que afectan la velocidad de caminata como son: las condiciones climáticas, el estado de la infraestructura, las condiciones físicas de los usuarios, el tipo de zona, entre otros.

La velocidad de caminata es la variable de flujo más importante, puesto que su medición en campo es sencilla y permite determinar condiciones operativas de la infraestructura.

Densidad y espacio peatonal

La densidad es una medida de ocupación del espacio, se expresa como una relación entre el número de peatones que ocupan una determinada área en un instante determinado y el área ocupada. Se expresa en pe/m². Muchos autores prefieren expresar la densidad como espacio peatonal, que es su inverso. El espacio peatonal representa el área promedio disponible para cada peatón en un instante determinado.

4.2 Variables microscópicas

Las variables microscópicas determinan el comportamiento de un peatón individual o su relación directa con peatones adyacentes dentro de la corriente del tránsito. Las condiciones de movilidad, el grado de fricción y las interacciones entre peatones están asociadas a las variables microscópicas de flujo. Los parámetros microscópicos peatonales más importantes son el espaciamiento, brechas, intervalo, velocidad individual de caminata, dimensiones de la elipse corporal, condiciones antropométricas, formación de pelotones, desplazamiento en grupos.

Elipse corporal

El espacio ocupado por un peatón en una zona de espera, se representa mediante una elipse como la que se muestra en la figura 2, que tiene un área de 0.3 m². Para peatones en movimiento, la elipse debe considerar una zona adicional debida al paso del peatón y al movimiento de los brazos, definiendo un área peatonal de 0.75 m². TRB (2000).

Requerimiento de espacio adicional

Un peatón en movimiento requiere una zona de percepción, esta zona se encuentra dentro del campo de visión del peatón, principalmente considera dos componentes según el HCM TRB (2000) que son: la zona del paso y la zona sensorial o zona de percepción frontal. Ambas zonas definen lo que se denomina espaciamento peatonal, es decir la distancia entre puntos homólogos de dos peatones consecutivos. La figura 2 ilustra este concepto.



Figura 2. Zona de percepción peatonal.
Fuente: propia.

Ancho efectivo de caminata

Diversos estudios han demostrado que los peatones no caminan siguiendo patrones que se ajusten a carriles de flujo, sino que se debe considerar el ancho de la sección transversal efectiva disponible para la caminata. Para efectos del diseño de infraestructura peatonal, se considera un concepto similar al de carril, para definir anchos mínimos, sin embargo, en la práctica las trayectorias que siguen los peatones difieren de la línea recta. En condiciones prácticas, según TRB (2000), debe considerarse un ancho de 0.8 m para un peatón, dimensiones menores pueden causar fricción entre los peatones y dificultad de maniobras como adelantamiento.

El ancho de acera libre se refiere a la porción de la vía que puede usarse eficazmente para los movimientos peatonales. Según TRB (2000), en su caminata, los peatones se alejan de los obstáculos y no suelen acercarse estrechamente a las paredes. Por consiguiente, este espacio no utilizado debe descontarse al analizar una infraestructura peatonal. Lo mismo ocurre con los edificios residenciales y zonas comerciales con vitrinas, así como los elementos del mobiliario urbano, como postes de luz, buzones, señales de

tránsito, paraderos de buses, ventas ambulantes, entre otros, que por supuesto, deben ser descontados del área efectiva de caminata.

El efecto específico de los obstáculos no ha sido estudiado completamente, por ejemplo, la presencia de un solo obstáculo puede no afectar a todo un tramo de infraestructura, sino que su efecto puede limitarse a su zona cercana TRB (2000). La figura 3 muestra un ejemplo del efecto de vitrinas y ventas en una acera angosta.



Figura 3. Incidencia de vitrinas y ventas en el ancho efectivo.
Fuente: Guío y Dueñas (2009).

Formación de pelotones y grupos de peatones

Debe tenerse en cuenta que hay una gran diferencia entre pelotón y grupo de peatones, el grupo de peatones es un conjunto de personas que comparten un viaje o parte del mismo, caminando en conjunto e interactuando voluntariamente entre ellos, de manera que su velocidad de caminata es similar.

Un pelotón, según TRB (2000), se refiere al número de peatones caminando juntos en un grupo involuntariamente, como resultado de un semáforo u otros factores.

4.3 Otras variables

Existen elementos del entorno, o propios del usuario, que afectan el flujo peatonal en infraestructuras continuas, entre estos se pueden mencionar: el tipo de peatón, la edad, el motivo de viaje, el tipo de zona.



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Tipo de peatón y motivo de viaje

Existen características de flujo que son representativas de ciertas categorías de peatón, por ejemplo, los peatones que se dirigen al trabajo o estudio, generalmente se desplazan en los mismos periodos del día y utilizan rutas similares en su desplazamiento, y lo hacen a una velocidad mayor que las personas que, por ejemplo van de compras o de turismo.

Así mismo, la edad define el comportamiento del flujo peatonal en una infraestructura puesto que si la proporción de adultos mayores o niños es significativa, mayor que el 20% según TRB (2000), se presentarán reducciones significativas de la velocidad.

Tipo de zona

La distribución de actividades determina en muchos casos diferencias en las velocidades de caminata, por ejemplo, en las zonas comerciales la velocidad de caminata suele ser inferior a la que se presenta en las estaciones de metro. Lo mismo ocurre en los colegios o universidades, donde la velocidad de caminata suele ser superior debido a la uniformidad de peatones y a la restricción de horas de entrada y salida.

5. Modelos representativos de flujo peatonal

Existen modelos que relacionan las tres variables macroscópicas, lo que permite determinar la capacidad teórica de la infraestructura (máxima tasa de flujo peatonal), las características operativas del flujo, y cuantificar el nivel de servicio percibido por los usuarios.

El volumen, velocidad y densidad se relacionan mediante la expresión mostrada en la ecuación (1), que también se conoce como la ecuación fundamental del flujo continuo.

$$q = \bar{v}_e \cdot K \quad (1)$$

Donde: q = tasa de flujo peatonal, pe/min o pe/h
 \bar{v}_e = Velocidad media espacial de caminata, m/s
 K = Densidad peatonal, pe/m²

La velocidad de caminata disminuye a medida que se incrementa la tasa de flujo y la densidad, así mismo, al incrementarse la densidad, disminuye el



“Revista Virtual Universidad Católica del Norte”. No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

espacio peatonal y se reduce la movilidad, aumentando la fricción con otros peatones.

La determinación de las condiciones de operación del tránsito en infraestructuras peatonales es un tema que en Colombia se ha trabajado poco, dentro de los trabajos más conocidos se encuentra el de Bogotá (2006), en el cual se establecen algunas relaciones entre variables incidentes en el flujo de peatones en esta ciudad capital.

El modelo de flujo lineal fue propuesto por Greenshields (1934), y en el caso de flujo peatonal es el más utilizado en el mundo, esto se debe a la simplicidad de uso y la facilidad para calibrar los parámetros del modelo. La forma del modelo se muestra en la siguiente expresión

$$\bar{v}_e = v_l - \frac{v_l}{k_c} K \quad (2)$$

Donde: \bar{v}_e = Velocidad media espacial de caminata [m/s]

v_l = Velocidad de caminata a flujo libre [m/s]

k_c = Densidad de congestionamiento [pe/m²]

K = Densidad peatonal [pe/m²]

El HCM 2000 TRB (2000), para el análisis de flujo peatonal en aceras y senderos peatonales, utiliza el modelo encontrado por Fruin (1971), que se muestra en la ecuación 3, se trabaja con una velocidad de caminata a flujo libre de 1.43 m/s (5.15 Km/h) en el caso de flujo unidireccional y 1.36 m/s (4.9 Km/h) para flujo bidireccional

$$\bar{v}_e = 1.43 - 0.35K \quad (\text{para flujo unidireccional}) \quad (3)$$

$$\bar{v}_e = 1.36 - 0.34K \quad (\text{para flujo bidireccional})$$

Estos modelos representan muy bien las condiciones de flujo en zonas donde los peatones circulan con fluidez, sin embargo, no se ha encontrado un modelo para el flujo en aceras de zonas tipo centros históricos.

Relaciones entre variables

Relaciones velocidad – densidad

A medida que aumenta la densidad peatonal, la velocidad va disminuyendo debido a la limitación de espacio y capacidad de movimiento, de esta forma, cuando se tienen densidades muy bajas, se presentan velocidades de caminata a flujo libre, y cuando la densidad alcanza valores muy altos (apretujamiento), puede llegarse a un estado con velocidad cero.

Esta relación varía en función de las características predominantes de los peatones, la figura 4 muestra las relaciones calibradas para aceras con diferente ancho efectivo, comparadas con el modelo teórico de Fruin (1971) para flujo bidireccional.

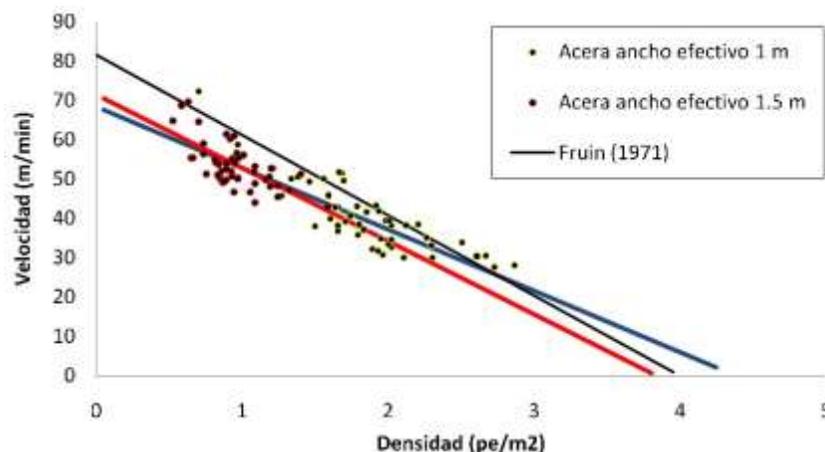


Figura 4. Relaciones entre velocidad y densidad peatonal.
Fuente: Guío y Dueñas (2009).

Relaciones flujo – densidad

La capacidad teórica de una infraestructura peatonal de flujo continuo está determinada por el máximo flujo. En la mayoría de las investigaciones al respecto, se ha encontrado que el máximo flujo ocurre para valores de densidad desde 1.1 pe/m² hasta 2.5 pe/m². Se cree que si la densidad sobrepasa los 2.5 pe/m², el flujo decrece rápidamente y se entra a una región de flujo forzado TRB (2000).

Se acostumbra expresar el nivel de ocupación de área, no como densidad, sino como espacio peatonal, que es su inverso, por lo que se expresa en m^2/pe , y representa la cantidad de espacio promedio disponible en la infraestructura para cada peatón. La figura 5 muestra la relación entre densidad y flujo encontrada para dos anchos de acera por Guío (2009).

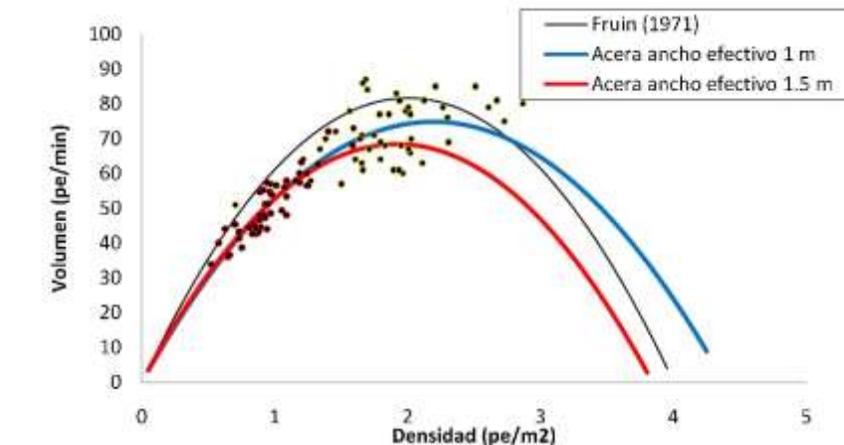


Figura 5. Relaciones entre flujo y densidad peatonal.
Fuente: Guío y Dueñas (2009).

Relaciones velocidad – flujo

Cuando se presenta un volumen peatonal muy bajo, el espacio disponible para cada peatón permite que se desarrollen altas velocidades (flujo libre), pero a medida que va aumentando el volumen de peatones, la reducción de espacio aumenta la fricción entre peatones, causando la disminución de la velocidad de caminata.

Cuando se ha alcanzado el máximo volumen, si la demanda sigue aumentando, las condiciones de flujo tienden a empeorar debido a la gran restricción de espacio, reduciendo tanto la velocidad de caminata como el volumen peatonal, hasta llegar a la condición crítica de detención total cuando ambas variables alcanzan un valor de cero. La figura 6 muestra las relaciones entre velocidad y flujo en comparación con el modelo de flujo bidireccional de Fruin (1973).

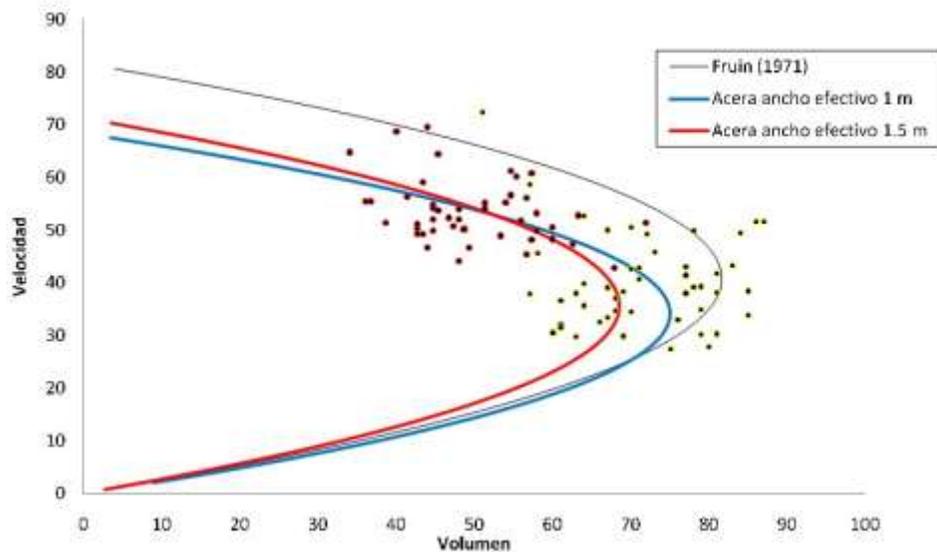


Figura 6. Relaciones entre velocidad y flujo peatonal.
Fuente: Guío y Dueñas (2009).

Relaciones velocidad – espacio peatonal

La figura 7 muestra los resultados obtenidos por diversos autores para diferentes tipos de peatón, considerando también los muy rápidos y los muy lentos. Se observa una zona de interés hacia los 1.5 m²/pe, por debajo de este valor, la velocidad de caminata puede sufrir grandes variaciones, este comportamiento es debido a que la limitación de espacio genera fricción y conflictos entre los peatones, afectando la velocidad de caminata. Este comportamiento se observa para todas las categorías de usuarios, desde peatones rápidos hasta los más lentos.

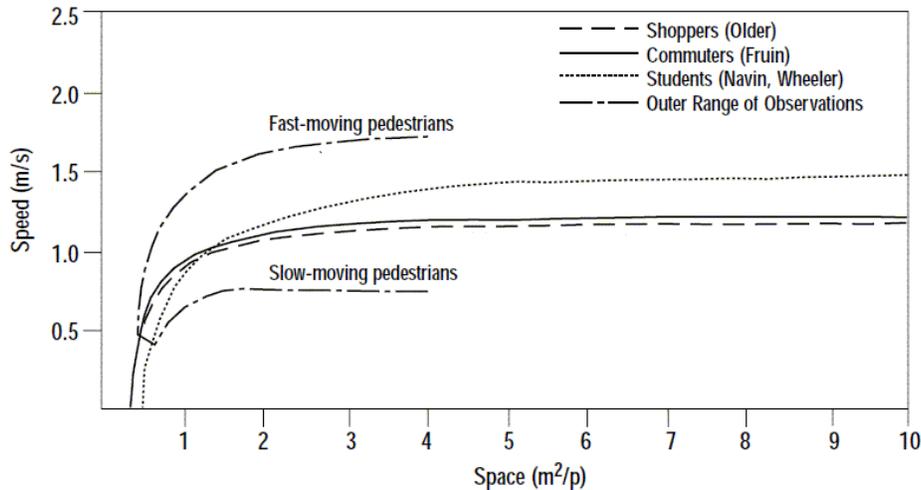


Figura 7. Relaciones entre velocidad y espacio peatonal.

Fuente: TRB (2000). Pedestrian and Bicycle Concepts, in Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, Washington, DC. Chapter 11.

6. Conclusiones

La modelación de flujos peatonales en infraestructuras continuas se fundamenta en modelos bastante sencillos, que, basándose en la analogía con la física de fluidos, relacionan las tres variables macroscópicas de flujo. El modelo utilizado en la actualidad es el lineal Greenshields (1934), que parte de la suposición de una relación lineal inversamente proporcional entre la velocidad de caminata y la densidad peatonal.

El entorno colombiano tiene características muy particulares en cuanto a la movilidad peatonal, por ejemplo, las ciudades pequeñas e intermedias, que en sus cascos históricos han priorizado el espacio para uso del automóvil, cuentan con aceras muy angostas que dificultan la aplicación de metodologías para cálculo de capacidad y nivel de servicio como HCM 2000 TRB (2000). Al aplicar estas metodologías, se encuentra que se está fuera de rango en aspectos como el ancho efectivo de caminata, lo que genera niveles de servicio muy bajos.



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

La movilidad peatonal es difícil de modelar, pues las características tan variables de este tipo de usuario hacen que se recurra a simplificaciones que en ocasiones resultan en generalizaciones que no permiten determinar las verdaderas condiciones imperantes en la infraestructura.

Los modelos utilizados no consideran el efecto de variables que podrían incidir bastante en la capacidad y nivel de servicio peatonal, tales como el tipo de zona, o la presencia de ventas "ambulantes" en la infraestructura peatonal; de la misma manera, los obstáculos son incorporados de forma muy general mediante afectaciones al ancho efectivo, cuando en realidad su efecto puede ser mayor.

En Colombia, las políticas de planificación urbana deben prever las condiciones de servicio de la infraestructura peatonal, esto hace necesario el desarrollo de metodologías que incorporen características propias del entorno, por ejemplo, la velocidad de caminata, que seguramente varía respecto a las condiciones de entornos donde se han calibrado los modelos que utilizamos en la actualidad en ingeniería de tránsito.



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

7. Lista de referencias

Alcaldía Mayor de Bogotá (2006). Manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte. Consultoría de Cal y Mayor y asociados. Tomo III Tránsito. Capítulo 1 Capacidad y niveles de servicio. Tránsito no motorizado.

Aly Abdel-Monem Hassan (2008). Sustainable Development of Mobility in Alexandria Metropolitan Area. Traffic and Transportation Studies Congress 2008. Copyright ASCE 2008.

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2001). Guide for the Planning, Design and Operation of Pedestrian Facilities. Washington, D.C.

Dueñas, Domingo (2005). Manual para la caracterización de movimientos peatonales (en base al manual de planeación y diseño para la administración del tránsito y el transporte, STT de Bogotá). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería.

Fondo de Prevención Vial (2008). Accidental vial en Colombia – 2007. Disponible en línea: www.fonprevial.org.co Consultado el 04/03/2009. 83-86.

Fruin, J. J. (1971), Designing for pedestrians: a level of service concept', *Highway Research Record*, 355, 1-15.

Greenshields, B. (1934). *A study of Highway capacity. Proceedings of the Highway Research Board*, Vol. 14. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.

Guío, Fredy (2009). Análisis de ocupación vehicular en la ciudad de Tunja. Estudios de campo de la asignatura Demanda del Transporte. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ingeniería.

Guío, Fredy y Dueñas, Domingo (2009). Calibración de un modelo descriptivo de flujos peatonales en infraestructuras continuas en Tunja – Colombia. I congreso internacional en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Santo Tomás Tunja.



"Revista Virtual Universidad Católica del Norte". No. 29, (febrero – mayo de 2010, Colombia), acceso: [<http://revistavirtual.ucn.edu.co/>], ISSN 0124-5821 - Indexada Publindex-Colciencias, Latindex, EBSCO Information Services y Actualidad Iberoamericana. [pp. 179-203]

Handy, S. (1996). Urban form and pedestrian choices: Study of Austin neighborhoods. *Transportation Research Record*, 1552, Transportation Research Board, Washington, D.C., 135-144.

Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) Bogotá (2005). Guía práctica de la movilidad peatonal urbana. Disponible en línea en www.idu.gov.co

Navin F. P. D. and R. J. Wheeler (1969). Pedestrian flow characteristics. *Traffic Engineering*, Vol. 39(4), pp.30-36.

Roess, R., Prassas, E. y McShane, W. (2004). *Traffic engineering*. Third edition. Ed. Pearson Prentice Hall.

Southworth, Michael (2005). Designing the Walkable City. 246 / *Journal Of Urban Planning And Development* © ASCE / december 2005.

TRB (2000). Pedestrian and Bicycle Concepts, in *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, DC. Chapter 11.

TRB (2000). Pedestrians, in *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board, Washington, D.C. Chapter 18.

Vargas, Ariel (2008). Capacidad y nivel de servicio peatonal en la carrera 11 en la ciudad de Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero en Transporte y Vías. 28-30.

Wen Ya, Yan Kefei and Yu Chaowei (2007). Level of service standards for pedestrian facilities in shanghai metro stations. *International Conference on Transportation Engineering 2007 (ICTE 2007)*. Copyright ASCE 2007.

Wigan, M. (1994). Treatment of walking as a mode of transportation. *Transport Research Record*. 1487, Transportation Research Board. Washington, D.C.