

PLANIFICACIÓN DE LA ACCESIBILIDAD URBANA BASADA EN ÍNDICES JERÁRQUICOS ANALÍTICOS

J. Alonso Trigueros y M. J. Vázquez Gallo

Profesores Titulares de la Universidad Politécnica de Madrid
Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas
C/ Alfonso XII, 3 y 5
28014 Madrid

Tel: +34913367737, Fax: +34913367961, E-mail: chus.alonso@upm.es ; mariajesus.vazquez@upm.es

RESUMEN

La accesibilidad urbana está relacionada con la posibilidad de conseguir bienes y servicios, realizar actividades y alcanzar destinos. El fin último de la gran parte de los desplazamientos en las ciudades es el acceso. La medida de la accesibilidad suele basarse en cuestiones de tiempo, coste, comodidad y riesgo necesarios para llegar a las oportunidades que ofrece la ciudad. Medir la accesibilidad globalmente es una tarea compleja puesto que en ella influye una gran cantidad de factores, pero imprescindible en cualquier proceso de planificación orientado a la mejora de la movilidad.

En los últimos años se vienen utilizando algunos indicadores relacionados con la movilidad. En muchos casos estos índices sólo reflejan una perspectiva parcial en la planificación. Una alternativa es definir índices globales que ponderen los factores relevantes de acuerdo con los objetivos perseguidos. En este contexto, el análisis multicriterio basado en procesos jerárquicos analíticos es una herramienta muy útil para eliminar en lo posible la subjetividad inherente a la asignación de prioridades en la ponderación. Además, la utilización de los Sistemas de Información Geográfica puede ayudar en la representación espacial de este análisis, aportando información alfanumérica a los elementos gráficos que definen el modelo.

Se propone un “índice de accesibilidad sostenible” que permitirá cuantificar la accesibilidad urbana. Esto hará posible diagnosticar los problemas esenciales de movilidad, proponer soluciones adecuadas y evaluar la eficacia de las medidas adoptadas. Todo ello constituirá un proceso dinámico encaminado a la mejora sostenible de la calidad de vida en las ciudades.

Palabras clave: Accesibilidad, sostenibilidad, movilidad, índices, planificación.

1. INTRODUCCION

En la Carta de Atenas¹, caracterizada como icono del urbanismo moderno, se contemplan cuatro funciones urbanas: habitar (la función residencial); trabajar (la función productiva); la función recreativa y de esparcimiento; y, por último la función de circular.

La palabra ciudad evoca en nuestras mentes ideas muy concretas y visuales. Sin embargo, habría que partir del concepto de ciudad, desde su evolución histórica y desde su realidad presente. Decía Ortega y Gasset: “Ciudad es ante todo plaza, ágora, discusión, elocuencia. De hecho, la ciudad no necesita tener casas; las fachadas bastan. Las ciudades clásicas estaban basadas en un instinto opuesto al doméstico. La gente construye la casa para vivir en ella y la gente funda la ciudad para salir de la casa y encontrarse con otros que también han salido de la suya”.

Para llegar a ser una ciudad, ésta tendría que desarrollar los rudimentos, al menos, de un alma que comparte experiencias entre sus ciudadanos. Esta es la esencia de la ciudad. Muchas de las ciudades históricas españolas, acaso la mayoría, han practicado una división del trabajo, y, en la diversificación de las vocaciones de sus ciudadanos, han producido una pequeña clase con tiempo para pensar, planear, inventar y crear, o para perder en lujos y frivolidades su precioso tiempo libre. La presencia de una clase ociosa es, sin duda, la prueba de que una sociedad ha alcanzado el estadio de cultura que designamos con el nombre de “civilización”. En este espacio para todos los ciudadanos de hoy y del mañana se basa la filosofía de la accesibilidad y de la movilidad sostenible.

Aristóteles sostiene que las ciudades se crearon originariamente para hacer la vida posible, pero el propósito último de ellas es hacer que la vida merezca la pena vivirla. La mera existencia a la defensiva no puede satisfacer a los seres humanos; así pues, hay que contribuir a que la vida tenga un sentido, lo que implica que hay que fomentar la vida íntima, las ideas, los ideales y los propósitos. Los responsables políticos, si tienen imaginación y habilidad, pueden ayudar a los ciudadanos a ganar la batalla, dotándoles mediante inspiradas formas visibles, de suficientes espacios peatonales accesibles, zonas de recreo, áreas comerciales y servicios útiles para la mayoría. Pero todo ello con una serie de medidas encaminadas a la mejora de la movilidad, de tal forma que el atractivo inherente a las relaciones humanas y a la utilización de los servicios que ofrece la ciudad no se vea perjudicado por tiempos excesivos y recorridos innecesarios.

El desarrollo sostenible, según el informe Brundtland², se define como “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”.

¹ La Carta de Atenas fue publicada por Le Corbusier en 1947, después de su intervención en el IV Congreso Internacional de Arquitectura Moderna. En ella se estableció definitivamente el concepto de zonificación, basado en la especialización de los sectores urbanos respecto a las funciones básicas del hombre.

² Comisión Mundial del Medio Ambiente y Desarrollo. *Nuestro Futuro Común. Informe Brundtland*. Nueva York: Naciones Unidas, 1987.

El desarrollo sostenible consiste en hacer compatibles el crecimiento económico, la cohesión social y la defensa del medio ambiente; de esta forma, se garantiza una mejor calidad de vida para la población actual y futura, sin aumentar el uso de recursos naturales más allá de la capacidad de la naturaleza para proporcionarlos indefinidamente.

El transporte urbano produce impactos adversos sobre este equilibrio, afectando al medio ambiente, a la salud y a la seguridad de los ciudadanos, a la economía, a la sociedad y, en general, a la calidad de vida de la población que vive y trabaja en las ciudades.

Las dimensiones físicas de las ciudades del pasado eran tales que los hombres podían ir a pie desde un extremo al centro en menos de quince minutos. Las ciudades eran también pequeñas. Su población oscilaba entre unos millares y varias decenas de miles de habitantes. Las hubo más populosas como Alejandría o Roma, Constantinopla y Pekín, que contaron con cientos de miles de habitantes, pero fueron casos muy excepcionales y no mantuvieron esas cifras de población durante mucho tiempo. Hasta el siglo XVIII, la mayor parte de las ciudades de las antiguas civilizaciones, fueron pequeñas, con menos de cien mil habitantes.

Todos los elementos que formaban estas ciudades –el escenario natural en el que estaban situadas, sus funciones y, por último, su estructura física o casco urbano- se hallaban en equilibrio. Los habitantes de estas ciudades debieron de sentirse felices en ellas, pues durante milenios no pretendieron cambiar sus características básicas.

La ciudad del pasado, aparte de ser estática y pequeña, tenía una estructura simple y definida que permitía al hombre, como habitante, abarcarla fácilmente y desplazarse por ella sin dificultad, de modo que podía satisfacer en ella todas sus necesidades y era capaz de administrarla adecuadamente.

En la actualidad, el gran crecimiento de la población en relación a la ciudad antigua, ha ocasionado un profundo cambio en las dimensiones físicas de las ciudades. Las murallas saltaron y la ciudad se desparramó en todas direcciones. Las pequeñas ciudades del pasado se han convertido en enormes ciudades de hoy.

La característica más importante de la ciudad futura se relaciona con el aumento demográfico. La población actual de la Tierra está en continuo ascenso. Previsiblemente a finales del siglo XXI la población mundial sea superior a quince mil millones de almas. Si el crecimiento demográfico se reparte uniformemente por todo el orbe terráqueo, la ciudad media del futuro, hacia finales del presente siglo, tendrá tres veces más habitantes de los que tiene hoy. Sólo con pensar en el tránsito de superficie de esta ciudad se deduce cuán irracional puede ser tal crecimiento si no se estudia con cuidado toda la situación que ello implica.

Sin embargo, el crecimiento de población no es el único aumento dinámico que se verá en la ciudad futura. Pues como condición necesaria de tal crecimiento, se producirá un aumento continuo de la renta per cápita, así como un aumento en el número de automóviles.

El planeamiento y la ordenación urbanística son los instrumentos principales a través de los cuales se define un modelo de ciudad. Determinan la estructura y la configuración del espacio, y tienen efectos directos sobre la clasificación y usos de suelo. Al incluir distintos descriptores para la mejora de la movilidad, se contribuye a generar un modelo de ciudad más justo y equilibrado desde el origen, ya que se promueve un diseño, estructura y configuración del espacio, que permite su utilización de forma independiente y en condiciones de confort y seguridad para todos los ciudadanos.

En la actualidad nos encontramos con un modelo de ciudad disperso, desestructurado y con separación de usos, y por ello, generador de un aumento creciente de necesidades de movilidad, difíciles de satisfacer si no es con el automóvil privado.

Así, para entender el aumento dinámico de la ciudad futura hay que sumar todos esos factores. Cuando se haya hecho esa suma, es muy probable que la ciudad dinámica aumente a razón de más del 12 por 100 anual. Por ello, es necesario contar con elementos que nos permitan, de alguna manera, cuantificar la accesibilidad y ver en qué medida dicha accesibilidad es o no es sostenible.

El desarrollo en España de auditorías ambientales y de las Agendas 21 ha puesto de manifiesto que la movilidad es una de las principales causas de insostenibilidad, al provocar una serie de impactos negativos.

Esta situación se debe a políticas erróneas adoptadas en el pasado que propiciaban políticas territoriales y desarrollos urbanísticos sin considerar sus impactos en términos de movilidad, accesibilidad y medio ambiente.

2. ANÁLISIS MULTICRITERIO Y PROCESOS ANALÍTICOS JERÁRQUICOS

Para construir un índice global que tenga en cuenta una serie de criterios relevantes en la cuantificación de la accesibilidad sostenible, es necesario ponderar dichos criterios, asignándoles pesos que reflejen su importancia relativa. El *análisis multicriterio*, concebido en el ámbito de las ciencias económicas y la ingeniería industrial, y desarrollado ampliamente a partir de los años setenta, es un procedimiento habitual en la planificación de los transportes que permite estudiar de manera homogénea y simultánea un gran número de factores y que resulta útil para reducir la subjetividad humana en la asignación de pesos y orientar la toma de decisiones de los expertos.

Uno de los métodos de aplicación del análisis multicriterio es el llamado *proceso analítico jerárquico* (AHP: analytical hierarchy process) (Saaty, T. L., 1980) en el que la asignación de pesos se realiza a través de una *matriz de comparación por parejas*. Utilizando AHP, a partir de la opinión de los expertos, es posible determinar pesos que reflejen su experiencia y conocimiento de manera natural e intuitiva.

En este trabajo, los criterios a los que se aplicará el método AHP son los atributos y descriptores relacionados con la accesibilidad sostenible que se describen en la sección 3.1.

2.1 Especificación del modelo

Se consideran n criterios: I_1, I_2, \dots, I_n , a los que asignar pesos no nulos w_1, w_2, \dots, w_n , tales que su suma es 1. La matriz de comparación por parejas C , es una matriz cuadrada $n \times n$, en la que el elemento de la fila i , columna j , se define como $c_{ij} = w_i/w_j$, para que refleje la importancia relativa del criterio i respecto al criterio j . En particular, un elemento de la diagonal c_{ii} siempre es 1 (representa la importancia relativa de un criterio respecto a sí mismo) y, conocido un elemento c_{ij} , su simétrico respecto de la diagonal, c_{ji} , es simplemente $1/c_{ij}$ (con lo que conocido el triángulo inferior de la matriz, se puede determinar el superior y viceversa). De este modo, la suma de los elementos de cada columna de C (para la columna j -ésima: $w_1/w_j + w_2/w_j + \dots + w_n/w_j$) resulta ser el inverso del peso del criterio correspondiente ($1/w_j$). En conclusión, conocida la matriz C , los pesos buscados se determinan fácilmente.

Para construir esta matriz, basta con solicitar a los expertos, las $(n^2-n)/2$ comparaciones por parejas que corresponden al triángulo inferior (o superior) de la matriz, frente a las n^2 posibles. En dichas comparaciones, el experto se pregunta por el grado de importancia relativa de un criterio frente a otro. De acuerdo con su respuesta, se determina un valor numérico para el elemento correspondiente de la matriz, según la tabla siguiente:

Tabla 1: Valores numéricos de comparación por parejas.

1	igual
3	débil
5	fuerte
7	muy fuerte
9	extremo

Asimismo, se pueden utilizar los valores 2, 4, 6 y 8 para los casos intermedios. De acuerdo con la definición de la matriz de comparación, para una colección de pesos dada, debería cumplirse la llamada *relación de consistencia*, $c_{ik} = c_{ij} \times c_{jk}$, para todos los elementos de la matriz.

Pero la vaguedad del lenguaje y el eventual cambio de opinión al pasar de unas comparaciones a otras, producen con frecuencia inconsistencia en la matriz de comparación.

Por ejemplo, supongamos que un experto opina que el criterio I_2 es extremadamente más importante que el criterio I_4 y que éste es extremadamente más importante que el I_5 . Consecuentemente, pensará que el criterio I_2 es extremadamente más importante que el criterio I_5 . Traduciendo esta información a la matriz de comparación, resulta que $c_{24} = c_{45} = c_{25}$. Pero entonces, no se cumple la relación de consistencia $c_{25} = c_{24} \times c_{45}$, ya que $9 < 9 \times 9$.

Para resolver este problema, una posibilidad sería volver a obtener la opinión de los expertos hasta que la matriz resulte consistente, pero no resulta muy práctico porque puede ser necesario hacerlo muchas veces. Otra opción es considerar el llamado *índice de consistencia* de la matriz, definido con la fórmula: $CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1)$ con

λ_{max} el valor absoluto máximo de los *autovalores* de la matriz de comparación C^3 . Cuando la matriz es consistente $\lambda_{max} = n$ y, por tanto, $CI=0$. Se puede comparar este índice con el índice de consistencia media de matrices generadas aleatoriamente, conocido como *índice aleatorio* (RI : random index). El cociente entre ambos, llamado *ratio de consistencia* (CR : consistency ratio) determina la consistencia global de los juicios AHP (Sinha, K. C. & Labi, S., 2007). Saaty considera admisibles las matrices de comparación con $CR=CI/RI<0.1$ y propone repetir las preguntas a los expertos hasta conseguir que se cumpla esta última relación. Sigue sin ser la situación ideal, pues la consistencia no es completa y es preciso solicitar la opinión de los expertos varias veces.

En este trabajo se emplea la *técnica de la consistencia forzada* (Taira, H, et al, 1996). Los elementos suficientes para construir la matriz de comparación se distribuyen en dos clases: una colección de elementos independientes entre sí (no vinculados por relaciones de consistencia) y el resto de los elementos. Estos últimos son redundantes en el sentido de que pueden obtenerse a partir de los primeros utilizando las relaciones de consistencia. Basta entonces con solicitar las comparaciones por parejas correspondientes a los elementos independientes, con el consiguiente ahorro de tiempo y datos necesarios.

El *número de elementos independientes* en la matriz de comparación resulta ser $n-1$. Esto se puede comprobar identificando los n criterios con los vértices de un polígono de n lados, y los $(n^2-n)/2$ elementos suficientes para construir la matriz, con los segmentos que conectan a los vértices. El número de elementos independientes es entonces el número mínimo de segmentos que permiten conectar los n vértices, es decir, $n-1$. Pero hay muchas colecciones posibles de $n-1$ segmentos como los anteriores. De acuerdo con Taira et al (1996), un algoritmo adecuado para seleccionar los $n-1$ elementos independientes de la matriz es el siguiente:

- A partir de la opinión de los expertos, se ordenan los n criterios en cuestión atendiendo a su importancia.
- Los n criterios se colocan verticalmente como nodos de un grafo en el que: si el criterio I_i es más importante que el I_j , el nodo I_i está por encima del nodo I_j ; y si ambos criterios son igualmente importantes, los nodos correspondientes están al mismo nivel.
- Los $n-1$ elementos independientes seleccionados entonces son los dados por $n-1$ ramas del grafo de tamaño lo menor posible.

Por ejemplo, para $n=4$, supongamos que I_1 es igual de importante que I_2 , I_2 es más importante que I_3 y, finalmente, I_3 es más importante que I_4 . El grafo resultante será una letra Y, con I_1 e I_2 en la parte superior, I_3 en el centro e I_4 en la parte inferior. Entonces, una colección formada por $n-1=3$ elementos independientes es la dada por c_{13} , c_{23} y c_{34} . Supongamos que en la comparación por parejas, los expertos deciden

³ De esta forma, las columnas de la matriz C resultan ser proporcionales (también las filas) y, por ello, su rango es 1 , lo cual implica que posee un único *autovalor* no nulo. Como además, la suma de los elementos de la diagonal de una matriz cuadrada (su *traza*) es igual a la suma de sus autovalores, para la matriz C , de tamaño $n \times n$ y con unos en su diagonal, dicho autovalor es n . Si w es el vector de pesos, se cumple además que $C \cdot w = n w$, es decir que el vector de pesos es un autovector de la matriz C para el autovalor n .

$c_{13}=3$ $c_{23}= 5$ y $c_{34}=3$. A partir de ellos, por consistencia: $c_{14} = c_{13} \times c_{34}=9$; $c_{24} = c_{23} \times c_{34}=15$ y $c_{12} = c_{14} / c_{24}=3/5$. Se tienen así los $(n^2-n)/2=6$ elementos suficientes para construir la matriz C que resulta ser:

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 3/5 & 3 & 9 \\ 5/3 & 1 & 5 & 15 \\ 1/3 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/9 & 1/15 & 1/3 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

A partir de esta matriz (consistente por construcción), el inverso de la suma de los elementos de cada columna es el peso del criterio que le corresponde. En este caso: $w_1=9/28$; $w_2=15/28$; $w_3=3/28$ y $w_4=1/28$ son los pesos buscados, que reflejan la opinión de los expertos.

3. ÍNDICE DE ACCESIBILIDAD SOSTENIBLE

La mejora de la accesibilidad y la movilidad representa un objetivo importante de la mayoría de los instrumentos de política de propósito general, incluyendo los planes de uso del territorio, los planes de carreteras y la legislación de tráfico. Cuando la capacidad de las vías aumenta, o cuando se construye una nueva carretera con un diseño mejor que el anterior se mejora, en general, la movilidad del tráfico. Un aumento en el número de personas que hacen uso del transporte público también mejora la movilidad, al menos en tanto en cuanto se reduce el volumen de vehículos privados.

Las medidas que desincentivan la demanda de desplazamientos contribuyen a reducir todos aquellos impactos medioambientales del tráfico que son proporcionales al volumen de la circulación rodada. Esto es aplicable a la mayoría de los problemas medioambientales atribuidos al tráfico, incluyéndose entre ellos el ruido, la contaminación del aire, el consumo de combustible y el uso del territorio. Las medidas dirigidas a reducir la congestión en el tráfico también reducen los impactos medioambientales, principalmente la contaminación del aire. La limitación del volumen del tráfico en áreas residenciales representa un beneficio medioambiental altamente valorado por los residentes; este beneficio no se limita a la reducción del ruido y la contaminación, sino que también mejora la seguridad vial y reporta un ambiente más placentero y habitable.

El volumen de tráfico es el factor individual que afecta de manera más importante al número de accidentes. Los estudios indican que el número de accidentes con víctimas se incrementa en un 80% cuando el tráfico aumenta en un 100%. El número de accidentes mortales aumenta en un 25% cuando el tráfico se incrementa en un 100%.

Los planes de uso del territorio y el patrón de uso del mismo en un área determinada pueden afectar al número de accidentes al influir en el volumen de tráfico, en el reparto modal del mismo, en su distribución entre los diversos viales disponibles y en la tasa de accidentes de cada carretera o modo de transporte. La separación del tráfico en las áreas residenciales ha mostrado una reducción de la tasa de accidentes. El diseño de las vías de acceso que garantice una baja velocidad es otro de los elementos que contribuyen a reducir de manera significativa el número de accidentes.

El Índice de Accesibilidad Sostenible (IAS) que se presenta pretende identificar las deficiencias en la accesibilidad urbana, desde el punto de vista de la sostenibilidad, para mejorarla si fuera necesario; así como aplicar criterios de racionalidad que favorezcan la movilidad para los nuevos proyectos de crecimiento urbano. Éste índice pondera una serie de factores o descriptores considerados especialmente significativos en relación con la accesibilidad sostenible, para reflejar su comportamiento global en una ciudad concreta y para permitir, además, comparar el grado de consecución de accesibilidad sostenible de diferentes ciudades.

Las etapas en la definición del índice son las siguientes:

1. Seleccionar los descriptores significativos en relación con la accesibilidad sostenible y agruparlos en bloques temáticos, los llamados atributos.
2. Asignar pesos a los atributos anteriores y dentro de ellos a sus descriptores, a través de un proceso jerárquico analítico (AHP) que refleje la opinión de los expertos del área. Los pesos son números entre 0 y 1 que indican el grado de importancia concedido a los bloques temáticos, y dentro de ellos a los descriptores, como criterios para evaluar la accesibilidad sostenible.
3. Obtener valores de referencia de cada descriptor.

A partir de aquí,

- para cada bloque temático o atributo, se sumará o restará –de acuerdo con su influencia positiva o negativa en la accesibilidad sostenible- el producto del valor de referencia de cada descriptor de ese bloque por el peso que se le haya asignado; esta suma dará como resultado un número entre 0 y 1 para cada bloque temático que puede interpretarse como un subíndice correspondiente a dicho bloque.

- se multiplicará el subíndice anterior por el peso asignado a su atributo; este proceso se hará para todos los atributos, llamando IAS al número entre 0 y 1 dado por la suma de los resultados obtenidos.

En fórmulas,

$$IAS = \sum_{i=1}^m \rho_i a_i \quad (2)$$

donde: m es el número de bloques temáticos o atributos; ρ_i es el peso del bloque temático i -ésimo; y, finalmente, a_i es el subíndice correspondiente al bloque temático i -ésimo, que se calcula con la fórmula:

$$a_i = \sum_{j=1}^{n_i} \alpha_j \varpi_j d_j \quad (3)$$

donde: n_i es el número de descriptores del bloque temático i -ésimo; α_j es 1 (ó -1) según el descriptor j -ésimo contribuya positivamente (o negativamente) a la

accesibilidad sostenible; ω_j es el peso del descriptor j-ésimo del bloque i-ésimo; d_j es el valor de referencia normalizado del descriptor j-ésimo.

Esta formulación está basada en el trabajo de Campos y Ramos (2005), sobre la evaluación de la movilidad sostenible en áreas urbanas y es similar a la de otros índices desarrollados por los autores de la presente comunicación, tales como el Índice de Accesibilidad Universal y otros (Alonso, J, 2006).

3.1. Atributos

Se han establecido los siguientes atributos y descriptores de los mismos para la definición del Índice de Accesibilidad Sostenible (IAS):

- Tráfico de vehículos públicos a_1 , definido por los siguientes descriptores:
 - o Frecuencia media de paso de los medios de transporte público (MTP): *porcentaje que no supera los 10 minutos.*
 - o Velocidad media de los MTP: *porcentaje que supera el umbral de 20 Km/h.*
 - o Distancia a una estación de MTP: *porcentaje de población que reside a distancia de una parada de MTP menor de 300 metros .*
 - o Medios de transporte adaptado: *porcentaje, distinguiendo bus/metro/taxi.*
 - o Precio: *número entre 0 y 1 de acuerdo con el porcentaje de la renta per cápita que supone un abono anual.*
 - o Porcentaje de área urbana dentro del área de influencia de los MTP: *a menos de 300 metros de una parada de MTP.*
- Tráfico de vehículos privados a_2 , definido por los siguientes descriptores:
 - o Tiempo medio de recorrido: *porcentaje que supera 30 minutos (contribución negativa).*
 - o Velocidad media de recorrido: *porcentaje que no supera los 16 km/h (contribución negativa).*
 - o Precio: *número entre 0 y 1 de acuerdo con el porcentaje de la renta per cápita que supone el mantenimiento anual del vehículo.*
 - o Relación entre tiempos de desplazamiento: $MIN[(ratio\ MTP/VP - 1), 1]$, *(contribución negativa).*
 - o Parque de vehículos privados: *proporción de vehículos por habitante que supera los 500 vehículos por cada 1000 habitantes. (contribución negativa).*
 - o Ocupación media de vehículos: $MIN[Número\ medio\ de\ ocupantes - 2, 1]$.
- Desplazamientos peatonales o ciclistas a_3 , definido por los siguientes descriptores:
 - o Proporción de desplazamientos no motorizados frente a motorizados: *porcentaje que supera el 25%: $MIN[(ratio\ DNM/DM - 0.25), 1]$.*
 - o Porcentaje de zonas peatonales en las vías urbanas: *porcentaje que supera el 35% de la superficie destinada a calzadas y aceras: $MIN[(ratio\ ACERAS/CALLES - 0.35), 1]$*
 - o Km. de vías ciclistas en el área urbana por cada millón de habitantes: *superior a 40; $MIN[\frac{1}{80}(VC - 40), 1]$*
 - o Distancia media de la residencia a un área comercial: *porcentaje de población que reside a distancia de un área comercial menor de 1500 metros .*
 - o Distancia media de la residencia a una escuela: *porcentaje de población que reside a distancia de una escuela menor de 1500 metros .*

- Distancia media de la residencia a una zona verde: *porcentaje de población que reside a distancia de una zona verde menor de 1500 metros*.
- Accesibilidad Universal a_4 , índice definido por los descriptores presentados en el Primer Congreso Internacional de Movilidad CIMO 2006
- Usos de suelo (a_5), definido por los siguientes descriptores:
 - Densidad DT de población por superficie total (que supera 200 habitantes/Ha) (contribución negativa); $MIN[\frac{1}{200} (DT - 200), 1]$.
 - Densidad DE de población por superficie edificada (que supera 1750 habitantes/Ha edificada) (contribución negativa); $MIN[\frac{1}{750} (DE - 1750), 1]$.
 - Número CC de centros comerciales por cada 250.000 habitantes; $MIN[\frac{1}{2} (CC - 1), 1]$.
 - Proporción ZV de zonas verdes -incluyendo instalaciones deportivas- por habitante (que supera 7.5 m²/hab); $MIN[\frac{1}{7.5} (ZV - 7.5), 1]$.
 - Número P de plazas de aparcamiento por cada 100 vehículos privados (que supera 1); $MIN[(P - 1), 1]$.
 - Proporción relativa VP de superficie de vías públicas respecto a la superficie total (que supera el umbral de 2000 m²/Ha) (sin contar parques y jardines); $MIN[\frac{1}{1000} (VP - 2000), 1]$.
- Impacto ambiental a_6 , definido por los siguientes descriptores:
 - Nivel de monóxido de carbono (porcentaje de días/año en que no se supera el umbral diario de 10 µg/m³).
 - Nivel de dióxido de azufre (porcentaje de días/año en que no se supera el umbral diario de 125 µg/m³).
 - Nivel de dióxido de nitrógeno (porcentaje de horas/año que no supera el umbral horario de 200 µg/m³).
 - Nivel de ruido (porcentaje de días por año en que no se supera el umbral de 55 dB).
 - Porcentaje de vías con medidas de “templado” del tráfico.
 - Porcentaje de vehículos de transporte privado movidos por energías limpias.
- Seguridad vial a_7 , definido por los siguientes descriptores:
 - Porcentaje de cruces de vías sin semáforos o pasos peatonales (contribución negativa)
 - Número M de agentes de movilidad por cada 50.000 habitantes (que supera 1); $MIN[(M - 1), 1]$.
 - Número A mensual de accidentes por cada millón de habitantes, que no involucran peatones o ciclistas (que supera 200) (contribución negativa); $MIN[\frac{1}{200} (A - 200), 1]$.
 - Número AP mensual de accidentes por cada millón de habitantes que involucran peatones (que supera 3) (contribución negativa). $MIN[\frac{1}{3} (AP - 3), 1]$. El n° de accidentes de peatones se calcula según la formulación de Brüde y Larsson (Elvik, R. & Vaa, T., 2004):

$$0,0000734 \cdot VM^{0,50} \cdot NPEATONES^{0,72}.$$

- o Número AC mensual de accidentes por cada millón de habitantes que involucran ciclistas (que supera 1) (contribución negativa). $MIN[\frac{1}{2}(AC-1), 1]$. El nº de accidentes de ciclistas se calcula según la formulación de Brüde y Larsson (Elvik, R. & Vaa, T., 2004):

$$0,0000180 \cdot VM^{0,52} \cdot NCICLISTAS^{0,65}.$$

3.2. Determinación del índice IAS.

Para determinar el índice IAS, una vez definidos los atributos y sus descriptores, se obtienen los pesos correspondientes, aplicando el método AHP, descrito con detalle en la sección 2.

Los pesos de los atributos resultan ser, $\rho_1=75/281$; $\rho_2=5/281$; $\rho_3=75/281$; $\rho_4=75/281$; $\rho_5=1/281$; $\rho_6=25/281$ y $\rho_7=25/281$.

En cuanto a los pesos de los descriptores dentro de cada atributo, que permiten calcular el subíndice correspondiente a dicho atributo, resultan los siguientes:

1. Tráfico de vehículos públicos. $\omega_1=27/44$; $\omega_2=9/44$; $\omega_3=1/44$; $\omega_4=3/44$; $\omega_5=3/44$ y $\omega_6=1/44$.
2. Tráfico de vehículos privados: $\omega_1=75/176$; $\omega_2=15/176$; $\omega_3=5/176$; $\omega_4=75/176$; $\omega_5=5/176$ y $\omega_6=1/176$.
3. Desplazamientos peatonales o ciclistas: $\omega_1=15/24$; $\omega_2=3/24$; $\omega_3=3/24$; $\omega_4=1/24$; $\omega_5=1/24$ y $\omega_6=1/24$.
4. Accesibilidad Universal: este índice se ha construido a partir de atributos y descriptores específicos en Alonso, J. (2006).
5. Usos de suelo: $\omega_1=15/42$; $\omega_2=15/42$; $\omega_3=1/42$; $\omega_4=1/42$; $\omega_5=5/42$ y $\omega_6=5/42$.
6. Impacto ambiental: $\omega_1=1/36$; $\omega_2=1/36$; $\omega_3=1/36$; $\omega_4=15/36$; $\omega_5=3/36$ y $\omega_6=15/36$.
7. Seguridad vial: $\omega_1=5/31$; $\omega_2=1/31$; $\omega_3=15/31$; $\omega_4=5/31$ y $\omega_5=5/31$.

Respecto a los valores de referencia de cada descriptor, se toman, a modo de ejemplo, los siguientes datos para el caso de Madrid:

1. Tráfico de vehículos públicos. $d_1=0.53$; $d_2=0.41$; $d_3=0.25$; $d_4=0.75$; $d_5=0.5$; $d_6=0.55$;
2. Tráfico de vehículos privados: $d_1=0.65$; $d_2=0.34$; $d_3=0.55$; $d_4=0.18$; $d_5=0.28$; $d_6=0.50$;
3. Desplazamientos peatonales o ciclistas: $d_1=0.45$; $d_2=0.43$; $d_3=0.06$; $d_4=0.34$; $d_5=0.67$; $d_6=0.78$;

4. Accesibilidad Universal: este índice se ha construido a partir de atributos y descriptores específicos en Alonso, J. (2006).
5. Usos de suelo: $d_1=0.52$; $d_2= 0.78$; $d_3=1$; $d_4= - 0.68$; $d_5=1$; $d_6=0.38$;
6. Impacto ambiental: $d_1=0.13$; $d_2=0.09$; $d_3=0.18$; $d_4=0.08$; $d_5=0.16$; $d_6=0.03$;
7. Seguridad vial: $d_1=0.06$; $d_2= 0.19$; $d_3=0.37$; $d_4=0.31$; $d_5=0.29$;

Con estos pesos y valores de referencia, se obtiene los subíndices correspondientes a cada atributo, de acuerdo con la fórmula (3):

1. Tráfico de vehículos públicos: $a_1 = 0.51$
2. Tráfico de vehículos privados: $a_2 = 0$
3. Desplazamientos peatonales o ciclistas: $a_3 = 0.42$
4. Accesibilidad Universal: este índice se ha construido a partir de atributos y descriptores específicos en Alonso, J. (2006): $a_4 = 0.61$
5. Usos de suelo: $a_5 = 0.24$
6. Impacto ambiental: $a_6 = 0.07$
7. Seguridad vial: $a_7 = 0$

Finalmente, el índice IAS, según la fórmula (2), resulta ser: $IAS = \sum_{i=1}^7 \rho_i a_i = 0.42$, valor que indicaría que la ciudad de Madrid, aún teniendo un índice aceptable tiene margen para la mejora de sus condiciones de accesibilidad y sostenibilidad.

En la práctica, los valores de referencia pueden medirse con la periodicidad que se considere más adecuada y, en consecuencia, el índice IAS puede ser mensual, anual, etc.

3.3. Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica

Las actividades en el mundo actual, y en concreto en las ciudades, evolucionan de un modo tan vertiginoso que producen información a un ritmo muy superior a las capacidades humanas para asimilarla, analizarla o sacar conclusiones.

Todos estos atributos, con sus descriptores correspondientes, relacionados en el epígrafe anterior se podrían integrar dentro de los llamados Sistemas de Información Geográfica (SIG). Se trata de una variedad de software que, genéricamente hablando, permite representar datos o eventos distribuidos a cualquier escala, como pueden ser la densidad de población de las ciudades, las zonas de mayor riesgo de accidentes, las zonas que no cumplen criterios de accesibilidad universal, intensidad de ruido, las intensidades de tráfico en las calles principales, localización de obras, etc. Los SIG van mucho más allá de la simple visualización de gráficos, ya que su principal objetivo es el análisis de información geográfica relacionada. Por ejemplo, una vez representados los datos sobre un mapa, se podrían hacer preguntas como cuáles son los itinerarios accesibles más cercanos a una determinada zona comercial; o bien

cuáles son las estaciones de bomberos más cercanas a una determinada zona en la que se produce un incendio, etc.

De esta forma, mediante la realización de este tipo de preguntas, en la actualidad se pueden tomar decisiones de todo tipo, como la ubicación de nuevas construcciones, localización de zonas de servicios, trazados de nuevos viales, construcción de nuevos centros comerciales, etc.

Se puede dar una definición más funcional de GIS diciendo que se trata de un sistema apoyado en un ordenador que proporciona cuatro posibilidades para manejar datos georeferenciados y atributos no espaciales asociados: entrada de datos, gestión de datos, manipulación y análisis de datos y salida de datos.

El reto para la nueva generación de planificadores urbanos es crear una base teórica que permita unificar todos los datos disponibles. En definitiva, traducir los datos en conocimiento.

Para estructurar un proyecto SIG hay que establecer una clara distinción entre modelos y teorías. Una teoría es una construcción basada en la lógica y las matemáticas, que se supone que describe el universo real en el que vivimos. Un modelo es una construcción que describe un universo mucho más simple, que incluye algunos aspectos del universo real y prescinde de otros. Tanto las teorías como los modelos son instrumentos útiles para comprender la naturaleza. Pero resultan útiles de diferentes maneras, y es importante tener siempre presente la diferencia. Una teoría es útil porque se puede poner a prueba comparando sus predicciones con las observaciones del mundo real. Sin embargo, una teoría puede resultar inútil cuando sus consecuencias son demasiado complicadas para poderlas predecir. Un modelo es útil porque su funcionamiento es lo bastante simple para predecirlo y entenderlo. Sin embargo, un modelo puede resultar inútil cuando prescinde de tantas cosas que pierde contacto con la realidad. A medida que exploramos el universo, nos salimos de los senderos transitados para adentrarnos en lo desconocido. En el terreno transitado elaboramos teorías. En las fronteras a medio explorar elaboramos modelos. En el sistema SIG que se quiera implementar haremos una abstracción y una simplificación del mundo real elaborando un modelo con el que trabajaremos asignando información a los elementos gráficos.

Por otro lado, en los últimos años, los términos SIG y GPS (Global Positioning System o Sistema de Posicionamiento Global) han comenzado a estar vinculados cada vez más íntimamente, puesto que los GPS permiten dotar a los SIG de la capacidad de procesar, analizar y representar información geográfica que cambia en tiempo real.

Existe un mecanismo por el que el SIG vincula los elementos gráficos a la base de datos. Se trata del vínculo gráfico-base de datos.

En un software de SIG de propósito general como por ejemplo MicroStation Geographics, el vínculo consta de dos valores: el número de entidad (entity number), el cual identifica la tabla de la base de datos y el valor de Mslink, que especifica la fila dentro de la tabla.

La figura 1 muestra el esquema interno de la vinculación entre un elemento gráfico – por ejemplo, una calle y la información de atributos de dicha calle (en los registros de su base de datos). Se puede observar que, a los datos del elemento gráfico línea poligonal (tipo de elemento, nivel, simbología, coordenadas, etc.) almacenados en el fichero de diseño, se añade un número de entidad (entity) y un valor Mslink.

La figura 1 muestra como el número de entidad (entity) se utiliza como llave en la tabla Mscatalog para encontrar el nombre de la correspondiente tabla de atributos de usuario. El valor de Mslink se utiliza para determinar la fila dentro de la tabla, habitualmente a través de un índice (index) que es construido y mantenido por el software de la base de datos. Por eso, estos dos números, son suficientes para asociar los datos de atributo con el elemento gráfico. El software puede también trabajar hacia atrás para localizar el elemento del mapa correspondiente a cualquier fila particular en cualquier tabla.

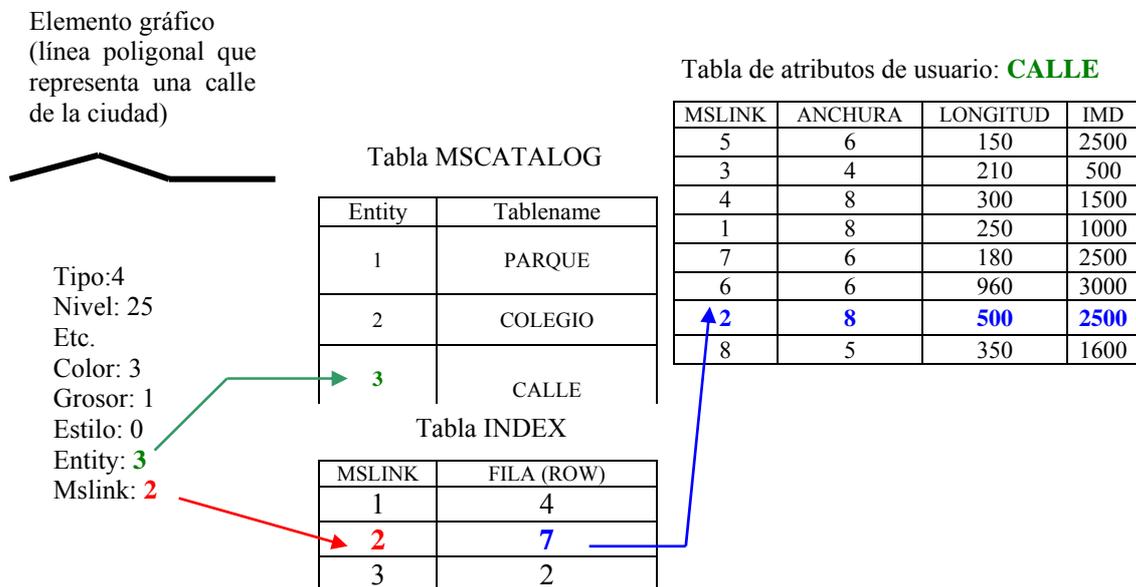


Fig. 1. Vínculo gráfico – base de datos en un sistema SIG. Fuente: Elaboración propia

En el esquema anterior se puede observar como el elemento gráfico representado en una determinada cartografía y que representa una calle de la ciudad, tendría almacenado en el sistema interno los datos que resulten interesantes para el análisis de la movilidad, como por ejemplo, en este caso se trataría de una calle de 8 metros de anchura, 500 metros de largo y con una intensidad de tráfico diario de 2500 vehículos.

Este esquema muestra el funcionamiento interno de la vinculación y, considerando todos los atributos especificados en el epígrafe 3.1, permitiría establecer un sistema de consultas y obtención de resultados de acuerdo a la formulación matemática del IAS.

4. CONCLUSIONES

- Es posible cuantificar la accesibilidad y movilidad sostenible en un entorno urbano mediante la aplicación de un índice como el IAS expuesto. Esto permitiría tomar decisiones encaminadas a la mejora de la accesibilidad y movilidad

sostenible, en función de la evolución del IAS y, asimismo, comparar unas ciudades con otras.

- La subjetividad existente en la evaluación de la accesibilidad actual y futura de una ciudad, se puede eliminar, al menos en parte, mediante la aplicación de procesos jerárquicos analíticos para decidir la importancia relativa de los diversos factores que influyen en la accesibilidad sostenible.
- Se pueden crear mapas temáticos que permitan identificar zonas o tramos relativos a algunos parámetros, tales como: itinerarios accesibles; zonas con deficiencias de servicio de transporte público; ubicación de áreas comerciales y viales de acceso; zonas con baja seguridad vial; deficiencias de zonas verdes y espacios peatonales; valoración del impacto ambiental; clasificación de usos de suelo; vías ciclistas; etc.

5. REFERENCIAS

- Campos, V.B.G., Ramos, R. A. R. (2005) Sustainable mobility evaluation in urban areas. *Advanced OR and AI Methods in Transportation*. 172-177.
- Saaty, T.L. (1980) *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill. New York.
- Sinha, K.C., Labi, S. (2007) *Transportation decision making*. John Wiley & Sons. New Jersey.
- Taira, H., Fan, Y., Yoshiya, K., Miyagi, H. (1996) A Method of Constructing Pairwise Comparison Matrix in Decision Making. *IEEE*, 2511-2516
- Alonso, J. (2006) Hacia una cuantificación de la accesibilidad urbana. *Actas del CIMO 2006*. 122
- Elvik, R. & Vaa, T. (2004) *The Handbook of Road Safety Measures*. Elsevier. Oxford.
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (2006) *Guía práctica para la elaboración e implantación de planes de movilidad urbana sostenible*. IDAE. Madrid.