

Sistemas urbanos: Amplio campo para la investigación

Eduardo Enrique Zurek Varela *

La descripción de sistemas por medio de modelos matemáticos es una herramienta fundamental para el desarrollo de la ciencia y la tecnología. Por tal razón, los modelos de ingeniería, y dentro de esta área los modelos urbanos, cobran vital importancia en la planeación y la evolución de nuestros sistemas urbanos (es decir, ciudades, países, etc.), ya que dichos sistemas en la actualidad se encuentran en crisis debido a su desmesurado y desordenado crecimiento.

El vertiginoso incremento en muchos de los parámetros (tamaño, cantidad de población, contaminación, etc.) de nuestras ciudades actuales implica una toma de decisiones cada vez más acertada, y científicamente realizada, sobre la ubicación de centros de servicios (centros comerciales, industriales, estaciones de policía, hospitales, estaciones de bomberos, etc.). De igual manera, es imprescindible realizar un buen diseño de las rutas de los medios de transporte urbano.

La aplicación de modelos urbanos no sólo es a nivel global de las ciudades, sino que también se pueden utilizar, por ejemplo, para determinar la localización y el tamaño de los estantes dentro de un supermercado, la localización y tamaño de

las entradas y salidas de un gran centro de espectáculos, etc.

El análisis de sistemas urbanos requiere conocimientos y métodos de una amplia gama de disciplinas científicas. Según A. Catanese (CAT72), algunas de las ciencias, puras o aplicadas, que se utilizan para dicho análisis son: matemáticas, estadísticas y probabilidad, teoría de sistemas, teoría de decisión, investigación de operaciones y planeación de conjunto.

El mismo autor expresa que el estudio de modelos urbanos es de interés en áreas como: planeación urbana, ciencias políticas, sociología, ciencias económicas, geografía, administración pública, arquitectura, ingeniería, matemáticas aplicadas, estadística aplicada, investigación de operaciones y análisis de sistemas.

La historia de los modelos urbanos está directamente relacionada con la forma como los sistemas urbanos mismos han evolucionado. Desde las primeras comunidades y ciudades hasta las grandes metrópolis modernas, los centros urbanos han seguido líneas de desarrollo determinadas por condiciones geográficas, económicas, sociales y tendencias arquitectónicas. Desde ciudades trazadas por la genial pluma de un arquitecto, hasta ciudades que crecen en el más desmedido desorden.

A continuación se presenta una breve reseña histórica de los sistemas urbanos, con el fin de poder reconocer el papel que

* Ingeniero de Sistemas. Actualmente profesor de las cátedras Modelos de Ingeniería II y Teoría de Sistemas del Departamento de Sistemas, Universidad del Norte.

han desempeñado los modelos urbanos en la solución de problemas generados en cada etapa de su desarrollo.

Urbanismo de la antigüedad a la edad moderna

Carlos Alberto Plata Gómez (PLA88) nos presenta una descripción de la forma como el ser humano dio comienzo a la vida urbana:

Pero el hombre tiene que recorrer un largo camino hasta que pueda aparecer una sociedad propiamente urbana. Gracias a la observación y a medida que perfecciona las técnicas de recolección y de caza de animales, el mundo se le hace más pequeño y sus recorridos tienden a limitarse a las áreas propias de los animales codiciados. Sin embargo, su vida no es sedentaria sino que sigue un ritmo natural: el de los animales o vegetales que constituyen su base económica. Al recorrer permanentemente un territorio no se escapa de sus dotes de observación la existencia de ciertos lugares que ofrecen unas condiciones especiales que pueden ser aprovechadas. Estos lugares ejercerán una gran atracción por su seguridad ante los peligros o como abrigo, y el hombre los visita con frecuencia y los habita temporalmente. El conocimiento de estos refugios se transmite de generación en generación y forma parte del patrimonio cultural de cada pueblo. Ciertos historiadores han querido ver en esta constante preocupación de lugares determinados, el rudimentario comienzo de la vida sedentaria y, en consecuencia, de la vida urbana.

El mismo autor nos habla sobre el nacimiento de los primeros asentamientos urbanos:

... La dureza del medio suscita la adaptación a través de la lucha y el hombre encuentra

que la asociación es un instrumento importante en su propósito de dominio y bienestar. El poblado le proporciona esas facilidades y lo libera de muchos esfuerzos y problemas. Amuralla sus viviendas y entiende que en ese núcleo alguien debe tener poder y autoridad para regir la marcha de la comunidad. Surgen así las clases sociales como expresión de una mayor capacidad de trabajo, de una mayor tenencia de animales domesticados o de una mayor capacidad de dominio sobre el medio.

Las ciudades siguieron su crecimiento y, siglos más tarde, en el Oriente Medio se observaban ciudades rodeadas de altas murallas, debido a conflictos y rivalidades generados por problemas de límites y otros riesgos.

Como ejemplo de planeación propiamente dicha, se puede hablar de dos ciudades en Egipto, planeadas directamente por la autoridad real: Kahun y Tell el-Amarna. La primera, con capacidad para albergar 3.000 habitantes, es cuadrada y amurallada con lados de aproximadamente 350 m de longitud; la segunda, también cuadrada, está formada por tres calles principales que la cruzan de lado a lado y que son paralelas al río Nilo.

El urbanismo griego tuvo como característica una planificación hipodámica (calles cruzadas en ángulo recto) y, partiendo de ésta, total libertad en la planificación de la ciudad.

Dentro del Imperio Romano, las ciudades militares fueron el tipo más comúnmente utilizado para formar colonias o campamentos. Estas ciudades estaban formadas por dos calles principales cruzadas en ángulo recto, paralelas a las cuales se tendían calles menores. Todo el poblado era rodeado por una muralla.

Según A.E.J. Morris (MOR74), a las ciudades medievales se les puede dividir en las siguientes partes principales: la muralla, con sus torres y puertas; calles y sus correspondientes espacios de circulación; la plaza de mercado y otros edificios comerciales; la iglesia, usualmente localizada en un espacio especialmente destinado para ella; y la gran masa de las construcciones generales del pueblo y su correspondiente espacio para jardín.

Las murallas que rodeaban a las poblaciones medievales tenían principalmente fines militares. Cuando el crecimiento de una ciudad superaba los límites de una muralla, se construía una nueva muralla que abarcara la muralla anterior y las nuevas tierras y construcciones que pertenecían a la ciudad, teniendo en cuenta que ésta podía seguir creciendo en el futuro. Por tal razón dichas ciudades tuvieron un crecimiento en forma de anillos concéntricos.

Las calles de las ciudades medievales se caracterizaron por ser angostas; el crecimiento orgánico del pueblo seguía rutas irregulares (las calles no eran rectas); las calles principales que unían las entradas del pueblo con el centro fueron tanto extensiones lineales de la plaza de mercado como rutas de comunicación.

Morris dice también que el Renacimiento se caracterizó por un marcado crecimiento en la extensión y población de las ciudades europeas. Este rápido crecimiento dio pocas oportunidades para un desarrollo de conjunto.

Las principales áreas de planeación urbana en el Renacimiento fueron: sistemas de fortificación; regeneración de partes de ciudades por la creación de nuevos

espacios públicos y sus calles correspondientes; reestructuración de ciudades existentes por la construcción de nuevos sistemas de calles principales, las cuales, extendidas como rutas regionales, frecuentemente generaron un fuerte crecimiento; la adición de extensos nuevos distritos, normalmente para propósitos residenciales; y el trazado de un número limitado de nuevas poblaciones.

Urbanismo contemporáneo

El explosivo crecimiento de las ciudades contemporáneas ha provocado el nacimiento de muchas teorías urbanísticas que pretenden renovar los conceptos urbanísticos existentes y hasta proponer nuevos modelos de ciudades. A continuación se describen algunas de estas teorías (PLA88):

Una de las primeras teorías urbanísticas contemporáneas indicaba la construcción de pequeños poblados cerca de las fábricas que se encontraban fuera de las ciudades, con el fin de mejorar el estado en que se encontraban las barriadas aledañas a dichas fábricas y equilibrar el elemento natural y el artificial, y la producción industrial con la agrícola. Esta teoría fue propuesta por R. Owen en Inglaterra y Fourier en Francia a principios del siglo XIX.

Sir Ebenzer Howard ideó «una ciudad amena, económica y socialmente autosuficiente» en la que predominaba el elemento agrario sobre el urbano. Este proyecto se conoció como «ciudad jardín»: fue el primer plan modelo realizable.

La «ciudad lineal», desarrollada a lo largo de una línea de transporte, evita las

gestiones circulatorias, la sobrevaloración de terrenos encerrados e integra a la ciudad los beneficios de la vida rural. Esta idea nació en España.

Con base en la «ciudad lineal» surgió en la Unión Soviética la teoría de la «ciudad cinta». Se trataba de dar una organización «urbana» a todo el territorio de una nación. Esto se lograría por medio de la construcción de edificios destinados a vivienda humana sobre una red de «ciudades lineales».

Aplicaciones de los modelos urbanos

Las cinco principales áreas de trabajo en lo referente a modelos urbanos de ingeniería, según Larson y Odoni (LO81), son; modelos probabilísticos en sistemas de servicios de emergencia, localización de facilidades de servicios públicos, modelos de redes, modelos de congestión, y sistemas de colas espacialmente distribuidas. Desde el punto de vista de cada una de estas áreas se observan más claramente las aplicaciones de los modelos urbanos de ingeniería.

Los ejemplos más comunes de *sistemas de servicio de emergencia*, son: estaciones de policía, estaciones de bomberos y hospitales. Los sistemas de servicios de emergencia se caracterizan por requerir tiempos de respuestas cortos, se debe atender todas las solicitudes de servicios (si es posible), y se debe tener en cuenta que las llamadas por servicios están distribuidas estocásticamente en el espacio y en el tiempo. Además, los centros de servicios pueden tener localizaciones fijas o móviles; se debe establecer un sistema de prioridades entre los llamados; y hay que manejar el tiempo de ocio como un factor importante.

Cuando se trata de *localizar facilidades de servicio público*, se asume que lo primordial es minimizar el costo esperado que implica atender a todos los usuarios. La localización de un supermercado de tal forma que se minimice el costo esperado promedio en que incurren los clientes para llegar a él, es un caso que se puede catalogar dentro de este campo.

Los *modelos de redes* son útiles cuando se desea describir algún sistema con puntos de aglomeración interconectados entre sí (por ejemplo, un conjunto de ciudades interconectadas entre sí por carreteras o por vía aérea), o cuando se desea describir detalladamente un sistema con vías interiores (por ejemplo, las calles de una ciudad). Los modelos de redes se describen mediante grafos. En un grafo los puntos de aglomeración se definen como *nodos*, y las interconexiones como *arcos*.

La teoría de colas tiene completa aplicación en los *modelos de congestión*. Estos contemplan los siguientes procesos: llegada de clientes, procesos de servicio, y disciplina de la cola.

Los *sistemas de colas espacialmente distribuidas* tienen las siguientes características: los elementos que requieren atención ocurren aleatoriamente en el tiempo y el espacio, y la duración del servicio requerido también es desconocida; es fundamental conocer la estructura y la distribución espacial del lugar donde se va a desempeñar el sistema; si se cuenta con un número limitado de unidades de servicio para atender los requerimientos del sistema, es probable que aparezcan problemas de congestión.

Problemas de distancia promedio

Teniendo en cuenta que un factor importante en las medidas de eficiencia de sistemas de servicios de emergencia es el tiempo de respuesta a las llamadas por servicio (a la entidad que realiza el requerimiento por servicio se la denominará *incidente*), se hace indispensable calcular la distancia promedio esperada para llegar a atender los incidentes y, conociendo la velocidad esperada del ente que presta el servicio (denominado *facilidad*), se puede calcular el tiempo esperado de respuesta.

Es indispensable, para los cálculos de distancia promedio, definir tanto el espacio donde se moverá o localizará la facilidad como el espacio donde puede ocurrir el incidente. Teniendo en cuenta lo anterior, se considerarán dos tipos de problemas: distancia promedio en áreas y distancia promedio en grafos.

Distancia promedio en áreas

El recorrido, si el desplazamiento se realiza sobre áreas, puede ser de tres formas: *metropolitano* (figura 1), que ocurre cuando el desplazamiento se realiza con cambios de dirección dados por un ángulo recto (como es el caso del recorrido realizado sobre las calles de una ciudad); *euclidiano* (figura 2), que se presenta cuando el desplazamiento se realiza en línea recta entre los dos puntos de interés (por ejemplo, el caso del desplazamiento aéreo entre dos ciudades); y *angulado* (figura 3), que ocurre cuando el desplazamiento se logra realizando cambios de dirección dados por ángulos dentro de un rango determinado ($90^\circ < \text{ángulo} < 180^\circ$).

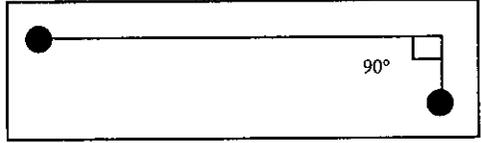


Figura 1. Recorrido metropolitano



Figura 2. Recorrido euclidiano

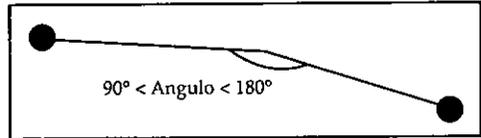


Figura 3. Recorrido angulado

Para ejemplificar los problemas de distancias promedio en áreas, obsérvese la figura 4.

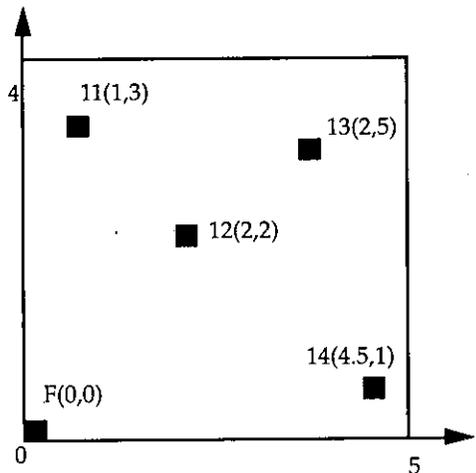


Figura 4. Área para distancia promedio

La distancia de F hacia I_k , es (con recorrido metropolitano):

$$D = |x_k - x_f| + |y_k - y_f|$$

Luego, si se toman n puntos, con igual probabilidad de ocurrencia de un incidente, la distancia promedio de F a dichos puntos viene dada por:

$$D = (1/n) \sum (|x_k - x_f| + |y_k - y_f|), \text{ para } k=1..n.$$

Para este ejemplo:

$$D = (1/4) \sum (|x_k - x_f| + |y_k - y_f|), \text{ para } k=1..4.$$

Donde:

(x_f, y_f) : Coordenadas de la facilidad. En este caso $(0,0)$.

(x_k, y_k) : Coordenadas del incidente. En este caso: $(1,3)$, $(2,2)$, $(4,2,5)$, $(4,5,1)$.

Luego,

$$D = (|1-0| + |3-0| + |2-0| + |2-0| + |4-0| + |2.5-0| + |4.5-0| + |1-0|)/4$$

Entonces:

$$D = 5.$$

Suponiendo que los incidentes están distribuidos con una función continua de densidad de probabilidad conocida $f(x,y)$ sobre el área, la función distancia promedio se puede definir como:

$$D = \iint D_{\text{mín}}F(x,y) f(x,y) dx dy, \text{ tal que } (x,y) \text{ pertenecen al área.}$$

Donde:

$D_{\text{mín}}F(x,y)$: Distancia mínima de la facilidad a un incidente ubicado sobre las coordenadas (x,y) .

$f(x,y)$: Función de densidad de probabilidad para el incidente ocurrido en (x,y) .

Para el ejemplo aquí tratado (ver figura 4):

$$D_{\text{mín}}F(x,y) = |x-x_f| + |y-y_f| = |x-0| + |y-0| = |x| + |y|$$

$$f(x,y) = 1/\text{Area del rectángulo} = 1/20.$$

Entonces:

$$D = \int_0^4 \int_0^5 (|x| + |y|) (1/20) dx dy = 2 +$$

$$5/2 = 9/2$$

Distancia promedio en grafos

En grafos, el recorrido se realiza desplazando las entidades sobre los arcos, y la distancia de viaje se obtiene teniendo en cuenta las longitudes de los arcos. Obsérvese el ejemplo de la figura 5.

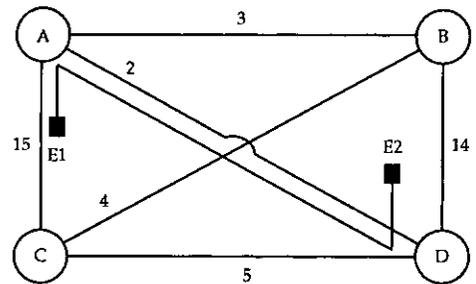


Figura 5. Distancia en un grafo

Sea E1 una entidad ubicada sobre el arco A-C (o C-A) a 6 unidades de distancia del nodo A. Sea E2 otra entidad ubicada sobre el arco B-D (o D-B) a 4 unidades de distancia del nodo D. La distancia mí-

nima entre la entidad E1 y la entidad E2 es la suma de: distancia de E1 al nodo A, más longitud del arco A-D (o D-A), más distancia del nodo D a E2. Es decir,

$$\text{distancia E1 a E2} = 6 + 2 + 4 = 12.$$

Supóngase el caso que la entidad E1 puede ubicarse en cualquier posición sobre el arco A-C, y la entidad E2 puede ubicarse en cualquier posición sobre el arco B-D. ¿Cómo se calcula la distancia esperada promedio entre las entidades E1 y E2? Una forma es hallando todas las distancias posibles, multiplicando cada distancia por su probabilidad de ocurrencia, y sumando todos los productos obtenidos.

La anterior solución se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$\text{Distancia A-C, B-D} = \iint D_{\text{mín}}(x,y) f(x,y) dx dy$$

Donde,

x: Es la distancia desde E1 (ubicada en el arco A-C) al nodo A.

y: Es la distancia desde E2 (ubicada en el arco B-D) al nodo D.

$D_{\text{mín}}(x,y)$: Es la distancia mínima entre las entidades E1 y E2.

$f(x,y)$: Es la probabilidad que E1 se encuentre ubicada a una distancia x del nodo A, y E2 se encuentre ubicada a una distancia y del nodo D.

Conclusiones

El amplio número de aplicaciones de los

modelos urbanos, y su dificultad de adaptación a sistemas urbanos reales, hacen de esta área un campo fértil para la investigación que puede generar muchas soluciones a los problemas que en la actualidad poseen las grandes urbes.

Intentando generar soluciones a estos problemas, en la Universidad del Norte se desarrolló una herramienta de *software* para el estudio y solución de modelos urbanos. Este programa permite plantear problemas de complejidad limitada tanto en grafos como en áreas cuya solución se obtiene en algunos casos (distancia promedio en áreas sin barreras y distancia promedio entre arcos de un grafo) resolviendo integrales por métodos numéricos, y en otros (distancia promedio en áreas con barreras) mediante técnicas de simulación.

Cabe resaltar como aporte interesante de la tesis «*Software* de apoyo para el cálculo de distancias promedio en el área de modelos de ingeniería» (ZUR94), los métodos alternativos tanto para la solución de problemas de distancia promedio entre arcos de un grafo como para el cálculo de distancia promedio en áreas.

Ambos métodos se definen mediante las siguientes características básicas:

1. Se determina el espacio muestral sobre el cual se desarrolla el problema.
2. Se determina la función distancia para cada punto de ubicación tanto de la facilidad como del incidente.
3. Se determina la función de densidad de probabilidad para la función distancia.

4. Se halla la esperanza matemática de la función distancia.

Las soluciones matemáticas de este tipo tienen como inconveniente la complejidad de las integrales (o sumatorias) resultantes para solucionar el problema, pero esta dificultad se puede soslayar utilizando técnicas numéricas para la resolución de dichas integrales, utilizando el computador.

Dado que casi siempre la complejidad de los sistemas urbanos es muy alta, se hace indispensable contar con herramientas cada vez más sofisticadas para el estudio y la solución de los problemas planteados. Desde el desarrollo de nuevos modelos matemáticos, pasando por la creación de novedosos programas para computadora, hasta llegar a la implantación de soluciones, existe un largo camino por recorrer para lograr que nuestros sistemas urbanos funcionen de tal manera que todas (o la gran mayoría) de las necesidades de atención en una ciudad (por ejemplo: emergencias, transporte, etc.) sean atendidas de la mejor manera posible.

Referencias

(CAT72)

CATANESE, Antony. *Scientific methods of urban analysis*. Urbana: University of Illinois Press, 1972.

(LO81)

LARSON, Richard, ODONI, Amadeo. *Urban operation research*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1981.

(MOR74)

MORRIS, A.E.J. *History of urban form - Prehistory to the Renaissance*. New York: John Wiley & Sons, 1974.

(PLA88)

PLATA, Carlos. *La ciudad, su crecimiento y la norma*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ciencias Jurídicas, 1988.

(ZUR94)

ZUREK, Eduardo. «Software de apoyo para el cálculo de distancias promedio en el área de modelos de ingeniería». Barranquilla: Universidad del Norte. División de Ingeniería. Departamento de Ingeniería de Sistemas, 1994.