

# MATEMÁTICAS PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD EN ARQUITECTURA

Francisco A. Ortega Riejos<sup>1</sup>

## RESUMEN

De acuerdo con el propósito general del *Primer Seminario Multidisciplinar sobre Enseñanza Universitaria y Desarrollo Sostenible*, este artículo tiene como objetivo el análisis del tratamiento que desde la Universidad se le da al Desarrollo Sostenible en el ámbito de las diferentes disciplinas. Específicamente, en el presente trabajo se perfilarán las conexiones entre actividad universitaria y desarrollo sostenible en tres contextos:

- a. Los Estudios de Grado de la titulación de Arquitectura
- b. Los Estudios de Postgrado en el Máster Oficial: “Ciudad y Arquitectura Sostenibles”
- b. La Investigación en el área de la Matemática Aplicada.

El documento se estructura a partir de una introducción al ámbito local de la sostenibilidad desde varios puntos de vista. Las tres secciones siguientes describirán, en los contextos señalados, la vinculación existente entre sostenibilidad y actividad universitaria.

---

<sup>1</sup>Departamento de Matemática Aplicada I.  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura.  
Universidad de Sevilla.

## INTRODUCCIÓN

### **Una nueva geografía de la población**

El origen de la preocupación por la sostenibilidad en las ciudades se remonta a la Antigüedad. Está datado que en el año 312 a. J.C., los romanos tuvieron que construir su primer acueducto para abastecer de agua potable a Roma, debido a la contaminación existente en el río Tíber. A finales del siglo I, cuando Roma tenía una población superior al millón de habitantes, se habían construido nueve acueductos para dotar de agua corriente a las viviendas de los patricios y aprovisionar a los casi mil baños públicos existentes. El tamaño que había adquirido Roma había superado con creces lo deseable para conformar una polis. Este cálculo había sido establecido unos siglos antes por Platón que lo fijó en 5040 ciudadanos libres (7!) lo que, en términos de población real (es decir, contando a los esclavos) supondría una cifra comprendida entre 75.000 y 100.000 habitantes.

El siguiente hito donde nos detendremos lo marca Londres, que en 1800 era la única población con más de un millón de habitantes. Por aquel entonces, las cien ciudades más pobladas sumaban 20 millones de habitantes y la extensión media de cada una de esas grandes ciudades era de sólo unos miles de hectáreas. Las otras ciudades que anteriormente había compartido con Londres el récord de alcanzar el millón (Roma, Constantinopla, Delhi, Pekín y Tokio) coincidían en ser centros nacionales del comercio para sus respectivos países y tener una industria movida por energías renovables.

Pero en el Londres de mediados del siglo XIX se dio el salto a la revolución industrial, incorporando máquinas de vapor y tecnologías basadas en combustibles fósiles que se usaron para la producción de bienes de consumo, para el transporte y, un poco más tarde, para la generación de electricidad. Este soporte energético es actualmente el denominador común de las 20 megápolis (áreas urbanas con más de 10 millones de habitantes) y de las 343

ciudades que actualmente superan el millón de habitantes (Demographia WWA, 2006).

La tendencia actual y futura de la población es concentrarse en torno a ciudades de tamaño medio/grande a la búsqueda de oportunidades. Las grandes ciudades se han convertido en centros de poder que reclaman ayudas incesantemente a los entes nacionales y supranacionales para continuar resultando atractivas y competitivas en la localización de actividades económicas.

Un paradigma de esta competitividad la tenemos en la reciente nominación de la sede olímpica de los Juegos de 2012. Entre las cinco ciudades finalistas, Londres resultó ganadora (frente a Madrid, París, Moscú y Nueva York) por haber sabido presentar un ambicioso plan de regeneración de las zonas más deprimidas de la capital y de su red de transporte público.

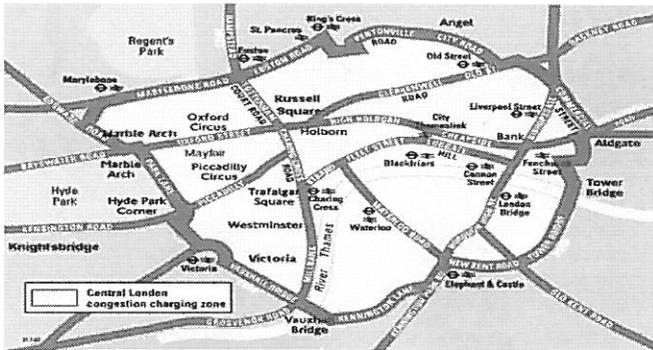


## **Modelos recientes de planificación urbana sostenible**

Según el análisis realizado por el equipo de gobierno de la ciudad de Londres, sus 7,4 millones de habitantes actuales no bastan para continuar manteniendo su posición privilegiada en la economía

global. Es necesario aumentar en 800.000 habitantes durante la próxima década para lograr ese objetivo.

Dado que Londres ya está acotada perimetralmente por la arteria de circunvalación M25 y el Cinturón Verde, la única opción consiste en el aumento de la densidad demográfica interna, ofreciendo mejores conexiones de transporte público entre los nuevos núcleos poblacionales y los centros de trabajo. Entre los Proyectos novedosos plasmados en el manifiesto *Transport Strategy* (2001), impulsado por el alcalde Ken Livingstone dentro del *London Plan*, están la Tasa de Congestión (*Congestion Charge*), la Red Prioritaria de Autobuses Urbanos (LBPN), la Red Estratégica de Ciclo-rutas (LCN+), la Red de Rutas Peatonales (SWN) y las Zonas de Aparcamiento Controlado (CPZ) y de Exclusión de Emisiones (LEZ).



El peaje urbano de Londres se inició en febrero de 2003 para acceder a una zona central de 32 km<sup>2</sup>, después de haber analizado algunas experiencias anteriores como las de Nueva York, Singapur y Hong-Kong. Durante los cuatro años anteriores a esta iniciativa se estuvieron realizando estudios de viabilidad para determinar el posible impacto en el tráfico y preparar las oportunas medidas de contingencia (Huertas, 2006). Entre los elementos del estudio se incluyeron la realización de numerosas encuestas sobre la demanda del tráfico, la evaluación de capacidad de tráfico en los troncos y en las intersecciones relevantes, la determinación del impacto probable en rutas radiales alrededor del perímetro zonal, el diseño de las nuevas intersecciones, la localización de cámaras, etc. Como consecuencia de esta necesidad de analizar el nuevo escenario que se presentaba, los equipos de investigación universitarios que intervinieron encontraron una adecuada fuente de investigación para sus acciones.

Como es conocido, la Tasa de Congestión ha conseguido una reducción del 30% en el volumen de tráfico que entra en la zona durante su periodo operacional (07:00-18:30) y su éxito ha animado a otras ciudades como Estocolmo a establecer una experiencia similar.

### **Investigación en el contexto de la sostenibilidad**

La investigación en el ámbito de la sostenibilidad se ha convertido en una línea prioritaria para el Gobierno de España. Las recientes convocatorias de Proyectos de Investigación realizadas por los Ministerios de Educación y Ciencia, de Medio Ambiente y de Fomento incluyen entre las líneas de carácter estratégico los proyectos cuyas temáticas versen sobre

- Residuos Urbanos, de Construcción y Demolición.
- Gestión urbana sostenible
- Transporte urbano sostenible

- Efectos ambientales del transporte
- Construcción sostenible

El mecenazgo del estado está justificado por las dificultades de investigar en el contexto urbano, ya que resulta costoso económicamente y complejo técnicamente. Basta observar que la ciudad es un espacio no homogéneo para la aplicación de modelos abstractos, donde además

- La información se presenta agregada por zonas
- La demanda de servicios no es ni continua ni homogénea
- Las distancias más cortas no son caminos euclídeos
- La información sobre los flujos de actividad es incompleta, difusa, variable en el tiempo y muy sensible a cambios.

Las premisas definitorias de lo que es una actuación sostenible se sintetizan en:

1. Existencia de límites ambientales: Si se sobrepasan ciertos límites los ecosistemas se deterioran, y el daño puede ser irreversible.

2 Gestión de la demanda: Los gobiernos no deben limitarse a satisfacer las demandas sociales, deben gestionarlas, lo cual incluye reducir o reconducir esas aspiraciones de mejora en la calidad de vida si existe riesgo para el medio ambiente.

3. Eficacia ambiental: Lograr el máximo beneficio económico por unidad de recursos utilizada y de residuos producida.

4. Eficacia social: Obtener el mayor beneficio social por cada actuación.

5. Equidad: Distribución equitativa de bienes y servicios, y de oportunidades para el acceso a los mismos.

Los indicadores necesarios para evaluar el grado de sostenibilidad asociado a una intervención deben estar adaptados a esos criterios, así como los modelos de optimización utilizados para toma de decisiones y la elaboración de propuestas.

## **LA SOSTENIBILIDAD EN LOS ESTUDIOS DE ARQUITECTURA**

Los estudios de Arquitectura sintetizan conocimientos provenientes de áreas tan diversas como las Humanidades, el Arte, la Ciencia y la Tecnología. En el Plan de Estudios vigente participan ocho Departamentos Universitarios:

- Proyectos Arquitectónicos (PA, 23.2% de la troncalidad)
- Construcciones Arquitectónicas I (CA1, 20.1% de la troncalidad)
- Urbanística y Ordenación del Territorio (UOT, 14.9% de la troncalidad)
- Mecánica de los Medios Continuos (MMC, 12.1% de la troncalidad)
- Historia, Teoría y Composición (HTC, 10.9% de la troncalidad)
- Expresión Gráfica Arquitectónica (EGA, 9.9% de la troncalidad)
- Matemática Aplicada I (MA1, 5.1% de la troncalidad)
- Física Aplicada II (FA2, 3.9% de la troncalidad)

Las materias troncales, obligatorias y optativas incluidas en las tres líneas curriculares (*Planeamiento Urbano, Edificación y*

*Arquitectura y Patrimonio*) totalizan cincuenta y nueve asignaturas. Aunque en muchos programas docentes de estas asignaturas, la consideración de desarrollo sostenible está implícita, las asignaturas de la siguiente relación incorporan el término sostenibilidad entre las palabras clave de sus contenidos:

ASIGNATURA	TEMAS (tratados desde la óptica de la sostenibilidad)
<b>Construcción 1</b> Curso: 1º Departamento: CA1 Tipo: Troncal Créditos: 6	<ul style="list-style-type: none"><li>- Introducción a la Construcción de Edificios.</li><li>- Acondicionamiento ambiental.</li><li>- Materiales de construcción.</li></ul>
<b>Urbanística</b> Curso: 2º Departamento: UOT Tipo: Troncal Créditos: 9	<ul style="list-style-type: none"><li>- Análisis de las formas urbana y territorial.</li><li>- Identificación de las tramas que componen la ciudad.</li><li>- Síntesis estructural de lo urbano y su interrelación.</li><li>- Diagnósis y técnicas para la renovación.</li></ul>
<b>Acondicionamiento 1</b> Curso: 3º Departamento: CA1 Tipo: Troncal Créditos: 5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Acondicionamiento acústico.</li><li>- Acondicionamiento higrotérmico y calidad del aire.</li><li>- Ventilación natural y sistemas pasivos.</li><li>- Soleamiento e iluminación natural.</li></ul>

ASIGNATURA	TEMAS (tratados desde la óptica de la sostenibilidad)
<p><b>Los sistemas Urbanos de Comunicaciones.</b>  <b>Diseño de Redes.</b>                      Curso: 4º                      Departamento: UOT                      Tipo: Optativa                      Créditos: 4,5</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Flujos y canales</li> <li>- Intermodalidad</li> <li>- Accesibilidad,</li> <li>- Relatividad distancia-tiempo</li> <li>- Áreas metropolitanas y Movilidad sostenible</li> <li>- Impacto ambiental de las infraestructuras de transporte</li> </ul>
<p><b>Planeamiento Territorial y Metropolitano.</b>                      Curso: 4º                      Departamento: UOT                      Tipo: Optativa                      Créditos: 4,5</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La ciudad global</li> <li>- La ciudad sostenible</li> <li>- Ecosistema urbano</li> <li>- Gestión de los recursos</li> <li>- Gobierno de la ciudad</li> <li>- Planificación metropolitana</li> </ul>
<p><b>Otras Tecnologías, Industrialización de la Construcción.</b>                      Curso: 4º                      Departamento: CA1                      Tipo: Optativa                      Créditos: 4,5</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Materiales ecológicos o alternativos.</li> <li>- Construcción con elementos prefabricados.</li> <li>- Reutilización.</li> <li>- Reciclado.</li> </ul>

ASIGNATURA	TEMAS (tratados desde la óptica de la sostenibilidad)
<b>Arquitectura y Medio Ambiente</b> Curso: 4º Departamento: CA1 Tipo: Optativa Créditos: 4,5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Sabiduría climática y regionalismos</li><li>- Estrategias de diseño urbano ecológico y sostenible</li></ul>
<b>Planeamiento y Medio Ambiente</b> Curso: 5º Departamento: UOT Tipo: Optativa Créditos: 4,5	<ul style="list-style-type: none"><li>- Instrumentos de gestión y control ambiental.</li><li>- La evaluación de Impacto Ambiental (IA).</li><li>- Los estudios de IA: Contenido y tramitación.</li><li>- Estrategias europeas de Desarrollo y de Medio Ambiente.</li><li>- La construcción de los indicadores de Sostenibilidad.</li><li>- La ciudad de los ciudadanos.</li><li>- Las Agendas Locales 21</li></ul>

## EL MÁSTER “CIUDAD Y ARQUITECTURA SOSTENIBLES”

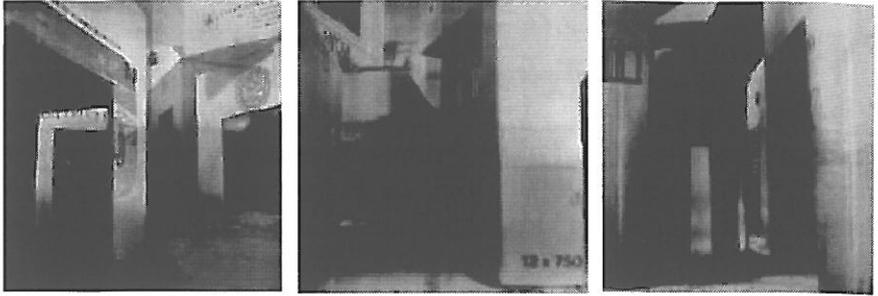
El Programa de Postgrado de Arquitectura engloba a los Másteres Oficiales de “Arquitectura y Patrimonio Histórico” y “Ciudad y Arquitectura Sostenibles”, ambos coordinados por el Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción (IUCC) y donde participan profesores de la Escuela Universitaria de

Arquitectura Técnica y de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Este Programa de Postgrado tiene la Mención de Calidad concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia y una considerable demanda de matriculación.

El máster “Ciudad y Arquitectura Sostenibles” (CAS) estructura la docencia en diez módulos formativos, concluyendo con un trabajo final donde se elabora un proyecto, profesional o investigador, acorde con el interés del alumno.

Los objetivos específicos del CAS son:

1. Cualificar, tanto a nivel teórico como práctico, a los investigadores universitarios, a los profesionales y a los técnicos de la administración, para afrontar una transformación sostenible del territorio, la ciudad y la arquitectura, en todas sus escalas, acorde con las políticas de desarrollo y las reglamentaciones autonómicas, españolas y europeas.
2. Desarrollar capacidades y destrezas en el conocimiento, en el proyecto y en la gestión sostenible del medio construido y natural.
3. a. En la opción profesional, dar una formación avanzada para el desempeño de tareas en el ámbito medioambiental, con criterios y técnicas actualizadas, y en sintonía reflexiva con las directrices de los organismos gubernamentales encargados de su gestión y transformación; en particular, con las propias del marco territorial, urbano y medioambiental de Andalucía.
3. b. En la opción investigadora, profundizar en el conocimiento asociado con las líneas de investigación cuyo objetivo sea la sostenibilidad, la ecología y el ahorro energético en nuestras ciudades y edificios.



<b>Módulo 1</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 9 Departamentos: 5	<b>Introducción al patrimonio y a la sostenibilidad</b>
<b>Módulo 2</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 13 Departamentos: 5	<b>Contexto científico y normativo de la sostenibilidad</b>
<b>Módulo 3</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 11 Departamentos: 3	<b>La construcción de una cultura: -modos sostenibles de vida y -escenarios arquitectónicos</b>
<b>Módulo 4</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 11 Departamentos: 6	<b>Enfoque multidisciplinar</b>
<b>Módulo 5</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 11 Departamentos: 6	<b>Tecnologías medio-ambientales: aplicaciones de tecnologías blandas</b>
<b>Módulo 6</b>	Horas Lectivas: 25 Profesores: 9 Departamentos: 3	<b>Procesos de conservación ecoeficiente</b>

<b>Módulo 7</b>	Horas Lectivas: 50 Profesores: 18 Departamentos: 7	<b>El medio ambiente como soporte de sostenibilidad: bases territoriales, urbanas e infraestructurales para un habitar sostenible</b>
<b>Módulos 8-10</b>	Horas Lectivas: 40 Profesores: 30 Departamentos: 7	<b>Proyecto de sostenibilidad: Metodología, intervención e investigación.</b>

Los resultados de la investigación al amparo del Máster son excelentes tanto en cantidad (el doctorado del IUCC lidera en número la lectura de tesis en la Universidad de Sevilla) como en la calidad de los trabajos.

En relación a la vinculación de los objetivos de investigación con la sostenibilidad, destaquemos a modo de muestra tres documentos:

1. Llatas Oliver, C. (2001). *“Residuos generados en la construcción de viviendas propuestas y evaluación de procedimientos y prescripciones para su minimización”*.

Memoria de tesis doctoral en la que, primeramente, se identifican y cuantifican los residuos de construcción y demolición (RCD) generados en cada uno de los procesos constructivos para, a continuación, realizar propuestas a nivel de proyecto y de ejecución con las que se podría obtener una reducción en la producción de residuos de hasta un 70 %. Asimismo, se establece una recomendación para el empleo elementos prefabricados y uniones en seco que facilitan una posterior recuperación de estos elementos mediante un derribo selectivo (deconstrucción).

2. García Martínez, A. (2006). *“Aplicabilidad de los sistemas LEED, BREEAM y EQUER al modelo de construcción convencional de Andalucía”*.

Trabajo de investigación en el que se recopilan y comparan diversos sistemas de análisis y evaluación del grado de sostenibilidad en los edificios. Concretamente, las metodologías identificadas con las siglas LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), BREEAM (BRE Environmental Assessment Method) y EQUER (Simulation du cycle de vie des bâtiments) se aplican sobre construcciones realizadas en Andalucía.

3. Silgado Rodríguez, J. (2006). *“La Gestión de Residuos en la Ciudad Histórica y Sostenible. El ejemplo de la ciudad de Écija”*.

Trabajo de compilación de los actuales sistemas de recogida, transporte y gestión de los residuos urbanos, así como de la problemática específica que plantea la introducción con éxito de instalaciones para el almacenaje y la evacuación de residuos en ciudades cuya estructura de calles tienen las características propias de los centros históricos europeos. Las propuestas se analizan desde diferentes criterios como la incidencia en el paisaje urbano, la invasión de los medios de recogida y transporte sobre el viario, la clasificación implícita de residuos que se fuerza al usuario a realizar y la valoración en cuanto a ruidos y malos olores que conllevan determinados sistemas de recolección y almacenaje.

## **UTILIDAD DE LAS MATEMÁTICAS EN LA EVALUACIÓN Y EN EL DISEÑO DE PROPUESTAS**

Un indicador es una medida, generalmente cuantificada sobre los recursos utilizados o los resultados obtenidos en áreas relacionadas con los objetivos específicos de una determinada empresa o institución. La finalidad de los indicadores es la medición de los objetivos logrados para corregir y mejorar la situación. Las características generales que debe cumplir un indicador son

- Validez: los indicadores deben medir lo que dicen medir.
- Fiabilidad: rigurosidad en la obtención de datos.

- Comunicabilidad.
- Blindaje a la manipulación.
- Economía: tanto en la recogida de datos como en su posterior procesamiento.
- Adecuación: los indicadores deben seleccionarse en función de los objetivos planteados y no en función de los datos.
- Consenso: aprobación de su adecuación por expertos.

La selección de indicadores es una temática de gran interés y actualidad en el ámbito del estudio de la calidad. Los expertos constantemente se cuestionan si se están midiendo elementos significativos y si las medidas que se están empleando son redundantes. Se puede llegar a obtener un gran volumen de datos y encontrarnos con un sistema de indicadores tan grande que su utilización sea imposible en la práctica. Éste es el principal motivo por el que surge el Problema de la Selección de Indicadores (PSI).

### **Integración de Indicadores y sus dificultades.**

La calificación de la calidad de un servicio se obtiene mediante un mecanismo de agregación de los distintos atributos de calidad que intervienen en el proceso. Normalmente, el nivel de calidad se determina mediante la combinación de diversos indicadores, ponderados de acuerdo con unos determinados criterios de relevancia o importancia que previamente ha establecido un experto. Existe una serie de dificultades inherentes a la agregación de estos atributos de calidad:

1. Un determinado atributo puede ser estudiado a través de diferentes indicadores, existiendo un solapamiento en la medición muy difícil de separar.

2. No todos los indicadores que analizan un atributo tienen la misma importancia y es difícil atinar con el correcto sistema de ponderación.
3. La relación entre los indicadores no es lineal fuera de un determinado rango de valores, intervalo que es necesario determinar en cada caso si se quiere reducir el problema del multi-atributo a una simple combinación lineal ponderada de los valores proporcionados por los indicadores.
4. Una vez evaluado un atributo su valoración final no es independiente de las valoraciones obtenidas por otros atributos, generándose procesos de revaloración o de retroalimentación de compleja modelización.

### **Indicadores de sostenibilidad en el transporte: evaluación, análisis y propuestas**

La actual preocupación por la sostenibilidad conduce a la implantación de sistemas de transporte eficientes en los costes (aspecto económico), respetuosos con el medio ambiente (contaminación, uso del suelo, consumo de energía, y medio natural), seguros (reducción de la accidentabilidad) y que proporcionen un nivel de calidad en el servicio para todo el territorio (equidad, integración social, etc.). Los sistemas de indicadores de transporte proporcionan información para orientar la toma de decisiones en el seno de las políticas de movilidad.

El sistema de indicadores de TRANsporte y Medio Ambiente (TRAMA) está basado en las líneas directivas y metodológicas promovidas por la Agencia Europea de Medio Ambiente. Consiste en una base de datos de indicadores de sostenibilidad entrelazada con otra base de datos nacionales de transporte, medio ambiente, economía y demografía. El análisis de los datos relativos al período 1990-2003 constata la existencia de:

- Crecimientos en la demanda de viajes: incrementos del 76% en personas y del 50% en mercancías.

- Aumento de los gases de efecto invernadero, que se incrementaron en un 47% durante dicho período.
- Reducción, a nivel general, de la emisión de contaminantes atmosféricos, debido a la implantación de medios de transporte cada vez más eficientes desde el punto de vista energético.
- Incremento de kilómetros de carreteras de alta capacidad (un 119%) y de inversiones en transporte (crecimiento acumulado del 27%).

Al mismo tiempo, se puede observar la evolución de variables económicas de interés como los precios del transporte, cuyo crecimiento (94%) fue superior al experimentado por el IPC (80%), y el índice de motorización (vehículos por cada mil habitantes) que aumentó un 46%, mientras que el PIB lo hizo en un 31% a lo largo de ese mismo periodo.

Monzón y Pérez (2006) han realizado un análisis de regresión por parejas de los indicadores anteriormente señalados. En sus conclusiones se pone de manifiesto que la actividad del transporte y el nivel de renta están claramente vinculados. Es decir, el (deseable) incremento del PIB conllevaría un aumento de la demanda de transporte, lo que lamentablemente se traduciría en el crecimiento de la emisión de gases de efecto invernadero.

Esta encrucijada es una ejemplificación del dilema que permanente existe en el Desarrollo Sostenible. Sin embargo, parece razonable y conveniente que las innovaciones tecnológicas contribuyan a crear y mejorar sistemas de transporte en términos de sostenibilidad y que las políticas (nacional, autonómica y local) fomenten su implantación, potenciando su uso por parte de la ciudadanía para desacelerar las emisiones contaminantes.

## Nuevos objetivos, nuevos modelos

Los modelos matemáticos se introducen para representar de forma abstracta una situación compleja en el mundo real, caracterizada por la existencia de variables que modifican la formulación matemática inicial. La adaptación del modelo a la realidad se lleva a cabo mediante la calibración de dichas variables, verificando la coherencia del modelo y permitiendo su refinamiento y evaluación de resultados para predecir futuros acontecimientos y extender su aplicación a otros contextos (Ortega, 2000). Muchos modelos matemáticos han sido inspirados desde áreas del conocimiento diferentes a la matemática pura; sin embargo, la formulación y el estudio de dichos modelos han impulsado el desarrollo de la matemática aplicada en particular y de las Matemáticas en general, consolidando numerosas líneas de investigación y una extensa lista de publicaciones que trasciende el ámbito restringido de los matemáticos.

Citemos, dado el contexto en que se enmarca el discurso, la tesis del profesor Fernández Nieto, E.D. (2003), *“Aproximación Numérica de Leyes de Conservación Hiperbólicas No Homogéneas. Aplicación a las Ecuaciones de Aguas Someras”*, donde se desarrolla un software de simulación de flujos hidrodinámicos; además, para poner de manifiesto su aplicabilidad a casos reales se realiza una simulación de la rotura de la balsa de Aznalcóllar sobre un modelo vectorialmente referenciado del cauce del río Guadiamar.

La difusión de contaminantes en medios continuos puede ser tenida en cuenta para planificar la localización de sistemas de conducción de aguas residuales en medios marinos (Cáceres *et al.*, 2006), para minimizar el impacto ambiental sobre los arrecifes de coral, los bancos de arena submarinos y las praderas de Posidonia.

Cambiando la escala geográfica, los centros de tratamiento de residuos sólidos urbanos constituyen enclaves cuya proximidad no es deseada por la población, pero cuya lejanía está penalizada con un incremento en el coste del transporte de los materiales de

desecho debido a la elongación de las rutas. De nuevo estamos ante la necesidad de establecer compromisos entre tendencias contrapuestas (alejar versus acercar) que pueden ser modelizadas y óptimamente resueltas (Boffey *et al.*, 2006) formulando adecuadamente el problema de localización. Este artículo comprueba la validez de su metodología sobre la totalidad de la provincia del Algarve.

Una etapa relevante en el diseño de redes de transporte público es la que trata de determinar la localización de estaciones sobre alineamientos predefinidos. La elección que se efectúe de los apeaderos puede condicionar la futura utilización del medio de transporte y, en consecuencia, su éxito o fracaso desde los puntos de vista social y económico. En el artículo de Laporte *et al.* (2002) se propone una metodología para evaluar la cobertura de la línea y un procedimiento para optimizar dicho objetivo en función de la selección realizada. El marco real donde se experimenta la adecuación de esta metodología es el corredor de la avenida de República Argentina para la línea 1 del Metro de Sevilla.

El desarrollo sostenible de las ciudades demanda la sustitución en parte del modo privado de transporte por el modo público (metro y tren de cercanías, principalmente). La cobertura del servicio que proporcionan las estaciones dotadas de aparcamiento disuasorios (*park-and-ride*) es difícil de evaluar, ya que contempla tanto usuarios que acceden a pie como en vehículos privados. Un estudio sobre integración de apeaderos para líneas de Cercanías ferroviarias con aparcamientos de disuasión, en el ámbito metropolitano de Sevilla, se puede hallar en Laporte *et al.* (2000).

La reducción del transporte motorizado privado en las ciudades sin que decaiga el nivel de movilidad de la población es un objetivo importante en los planes de ordenación urbana de muchas ciudades. Un instrumento para tal fin suele ser la implantación de sistemas de transporte público masivo (o la potenciación de los ya existentes), tanto de los denominados de alta calidad (metro y cercanías ferroviarias) como los de calidad estándar (autobuses y tranvías). Un punto muy relevante del proceso de planificación de

los sistemas urbanos de transporte es el dedicado al diseño de una red eficiente y efectiva para un coste preestablecido. Este diseño debería corresponderse en lo posible con la información suministrada por las matrices origen-destino (O/D) disponibles, para maximizar la satisfacción de la demanda de viajes, además de integrarse con los otros medios de transporte público disponibles, favoreciendo la robustez de la globalidad del sistema. Los objetivos del Proyecto del Sexto Programa Marco de la Unión Europea *ARRIVAL* (Algorithms for Robust and online Railway optimization: Improving the VALidity and reliability of large scale systems), en el que participan doce universidades europeas además de la Universidad de Sevilla coordinada por el profesor Dr. Juan Antonio Mesa (Escuela Superior de Ingenieros), se orientan hacia este propósito

## AGRADECIMIENTOS

Deseo dejar constancia de mi reconocimiento a la excelente labor realizada por los doctores José María Mesa López-Colmenar y Eladio Romero González en la coordinación del Seminario.

Este artículo ha sido patrocinado por el Proyecto de Investigación 70029/T05 del Ministerio de Fomento.

## BIBLIOGRAFÍA

- Boffey, T. B., Mesa, J. A., Ortega, F. A. y Rodrigues, J. I. (2006). *Locating a Low-level Waste Disposal Site*. Computers and Operations Research (en prensa).
- Cáceres, M. T., Mesa, J. A. y Ortega, F. A. (2006). *Locating Waste Pipelines to Minimise their Impact on Marine Environment*. European Journal of Operational Research (en prensa).
- DEMographia World Urban Areas (2006). *World Agglomerations: Population and Density Estimates*. Edition: 13 February 2006.

Electronic Report available in <http://www.demographia.com/db-worldua.pdf>

- Fernández Nieto, E. D. (2003). *Aproximación Numérica de Leyes de Conservación Hiperbólicas No Homogéneas. Aplicación a las Ecuaciones de Aguas Someras*. Ph.D. Thesis, Universidad de Sevilla.
- García Martínez, A. (2006). *Aplicabilidad de los sistemas LEED, BREEAM y EQUER al modelo de construcción convencional de Andalucía*. Trabajo de Investigación. Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción. Universidad de Sevilla.
- Huertas García, E. (2006). *Londres hacia el Transporte Sostenible*. Actas del VII Congreso de Ingeniería del Transporte. Publicaciones de la Universidad de Castilla La Mancha. Ciudad Real, España.
- Laporte, G., Mesa, J. A. y Ortega, F. A. (2000). *Localización de Intercambiadores sobre un Anillo de Transporte Rápido*. Actas del IV Congreso de Ingeniería del Transporte, pp 129-137. Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- Laporte, G., Mesa, J. A. y Ortega, F. A. (2002). *Locating stations on rapid transit lines*. Computers and Operations Research 29, pp 741-759.
- Llatas Oliver, C. (2001). *Residuos generados en la construcción de viviendas propuestas y evaluación de procedimientos y prescripciones para su minimización*. Ph.D. Thesis, Universidad de Sevilla.
- Monzón A., Pérez, P.J. (2006). *Sistema de Indicadores de Medio Ambiente y Transporte en España – TRAMA*. Actas del VII Congreso de Ingeniería del Transporte. Publicaciones de la Universidad de Castilla La Mancha. Ciudad Real, España.

-Ortega, F.A. (2000). *2000: una Celebración de la Matemática*.  
Diario de Sevilla. Culturas (Suplemento Cultural, jueves  
11/05/2000), página 23.