

## ALCANCE Y LIMITACIONES DE LAS HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DEL MICROCLIMA URBANO

Irina Tumini<sup>1</sup> y Ester Higuera-García<sup>2</sup>

(1) Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad Politécnica de Madrid, Calle Juan Herrero, 28040, Madrid. Grupo de investigación de ABIO. Tfno: +34 662 491811. [itumini.iisbe@gmail.com](mailto:itumini.iisbe@gmail.com)

(2) Escuela Técnica Superior de Arquitectura – Universidad Politécnica de Madrid, Grupo de investigación de ABIO. Departamento de Urbanística y Ordenación del Territorio, Calle Juan Herrero, 28040, Madrid.

Recibido: 5/jun/2013 -- Aceptado: 16/sep/2013 - DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/ES6921>

### *STRENGTHS AND WEAKNESSES OF URBAN MICROCLIMATE SIMULATION TOOLS*

#### **ABSTRACT:**

The urban microclimate plays an important role on buildings energy consumption and comfort sensation in outdoor spaces. Nowadays, cities need to increase energy efficiency, reduce the pollutants emissions and mitigate the evident lack of sustainability. In reason of this, attention has focused on bioclimatic urbanism as a reference proposal for change the way to design and live the city. The computerized calculation introduction is important step ahead in modeling and simulation, allowing for results closer and closer to the real behavior of urban space. The great advantage in the use of computing systems is the capacity for evaluate different project scenarios and choose the one that ensures better environmental performance. However, the tools available have different characteristics and scope so it is difficult to choose the most appropriate in each case. This article presents a critical review of some of the existing calculation tools, highlighting their strengths and weaknesses, providing information organized according to objective parameters that can be very useful to guide the designer between different calculation options.

**Keywords:** Urban Simulation, Microclimate, 3D models, Simulation tools, Urban Design

#### **RESUMEN:**

El microclima urbano juega un rol importante en el consumo energético de los edificios y en las sensaciones de confort en los espacios exteriores. La urgente necesidad de aumentar la eficiencia energética, reducir las emisiones de los contaminantes y paliar la evidente falta de sostenibilidad que afecta a las ciudades, ha puesto la atención en el urbanismo bioclimático como referente para una propuesta de cambio en la forma de diseñar y vivir la ciudad. La capacidad de simular el comportamiento térmico del espacio urbano es entonces elemento fundamental en el diseño bioclimático de las ciudades. La introducción del cálculo computarizado ha permitido lograr avances importantes en la modelización y simulación, permitiendo la obtención de resultados cada vez más cercanos al comportamiento real del espacio urbano. La gran ventaja en el uso de sistemas de cálculo es que se pueden evaluar diferentes escenarios de proyecto y elegir entre ellos el que asegura mejores prestaciones ambientales. Sin embargo las herramientas disponibles tienen características y alcances diferentes por lo que resulta difícil elegir la más oportuna en cada caso. En este artículo se presenta una revisión crítica de algunas de las herramientas de cálculo existentes, resaltando sus ventajas y limitaciones, proporcionando una información ordenada según una serie de parámetros objetivos que puede ser muy útil para orientar al proyectista entre las diferentes opciones de cálculo.

**Palabras clave:** Simulación urbana, Microclima, modelos 3D, Herramientas de simulación, Diseño Urbano

### **1.- INTRODUCCION**

Es conocido que el espacio urbano tiene un efecto modificador sobre el clima y la posibilidad de simular su comportamiento y testar los escenarios futuros es fundamental para mejorar la sostenibilidad de las ciudades. El clima urbano se genera a partir de fenómenos muy complejos donde entran en juego muchos factores. La singularidad de cada caso, hace que sea imposible definir unas estrategias de control microclimático eficaz para todas las aplicaciones, obligando cada vez al proyectista a enfrentarse al problema con un amplio margen de incertidumbre en los resultados finales.

Entender los procesos que se generan en el espacio construido y cómo funcionan climáticamente las ciudades, es entonces esencial para poder proponer un diseño acorde con las condiciones concretas al lugar de aplicación.

Los estudios del comportamiento climático del espacio urbano se basan principalmente en las observaciones de los valores obtenidos de la medición directa, aplicando sistemas cada vez más sofisticados (1). Estos estudios experimentales han permitido avanzar en el conocimiento de los fenómenos que se producen en el entorno construido y

en la formulación de modelos teóricos de intercambio de calor y de la dinámica de fluido entre el aire y las superficies urbanas.

Sin embargo es gracias a la introducción del cálculo computacional cuando se produce un importante paso hacia adelante en las posibilidades de modelación del microclima, tanto en complejidad por el número de variables y de procesos considerados como en la precisión de los resultados estimados. El uso de estos sistemas incorpora además una serie de ventajas respecto a un enfoque experimental que son muy significativas a la hora de emprender un estudio del entorno urbano. Entre ellas podemos resaltar la menor inversión de tiempo y dinero respecto a la realización de largas campañas de mediciones in situ con equipos y personal especializado, la posibilidad de realizar estudios paramétricos y de evaluar escenarios hipotéticos sin contar que las observaciones experimentales están fuertemente condicionadas por las características específicas del lugar de emplazamiento por los que son difícilmente extensibles a otras ciudades (2, 3, 4, 5, 6).

Actualmente existen diferentes herramientas de cálculo disponibles con capacidad resolutoria muy variada, constituyendo un abanico de opciones dentro del cual resulta complejo manejarse y elegir caso por caso el sistema más adecuado. De aquí la necesidad de realizar una revisión de los sistemas más conocidos, estudiar sus características y analizar sus posibilidades en cuanto a la simulación del entorno urbano.

El estudio está dirigido a los proyectistas, arquitectos e ingenieros, que trabajan en el mundo de la nueva construcción o rehabilitación de barrios, que no disponen de tiempo y recursos para realizar una extensa campaña de mediciones in situ, pero que podrían emplear útilmente las herramientas de simulación para escoger entre varias opciones de diseño, las que aseguran mejores condiciones microclimáticas, promoviendo así la eficiencia energética y la calidad del espacio abierto urbanizados.

## **2.- APROXIMACIÓN AL ESTUDIO DEL MICROCLIMA URBANO**

Las condiciones climáticas que se registran en el entorno urbano son sustancialmente diferentes de las observadas en las áreas rurales. Eso se debe a un diferente balance energético que en el espacio antropizado se ve afectado por la absorción de la radiación solar y la emisión de la radiación infrarroja, por el encauzamiento de los vientos en los cañones entre edificios y por el calor emitido por los coches, los aparatos de climatización y otras fuentes (7). Para un volumen determinado de aire, volumen de control (Figura 1.), el balance energético superficies-aire puede expresarse como (7, 8):

$$Q^*+Q_F=Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \text{ (cal)}$$

Donde

$Q^*$  es la radiación neta

$Q_F$  representa la energía de origen antropogénica, estimada a través del volumen de control

$Q_H$  es el flujo sensible y  $Q_E$  es el flujo latente

$\Delta Q_A$  es el calor por advección a través de la cara lateral del volumen de control.

$\Delta Q_S$  representa la energía de almacenamiento dentro del volumen de control.

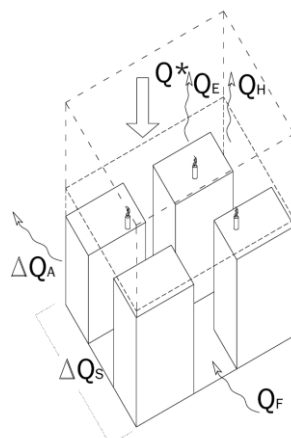


Figura 1. Esquema del volumen de control y del flujo energético en el ambiente urbano. Elaboración propia a partir de los esquemas presentado por Santamouris M et. all 2001

Aunque el clima de una ciudad se caracteriza por el lugar donde se asienta, podemos observar que espacios distintos crean condiciones térmicas diferentes. Eso se debe a que en la formación del microclima influyen tanto las características climáticas y topográficas del lugar como la morfología urbana. En otras palabras, en las formulaciones de cálculo podemos distinguir dos escalas: la micro<sup>1</sup> y la meso<sup>2</sup>, donde se producen diferentes mecanismos que son de difícil estimación debido a la incertidumbre en la exacta definición de todas las componentes urbana y la falta de conocimiento de modelos teóricos que sea representativos de cómo interactúan entre ellas. Además de la espacial, también la escala temporal influye en la definición del modelo de cálculo en cuanto se pueden hacer estimaciones según las estaciones del año o considerar las variaciones que se producen a intervalos de pocos minutos. Dependiendo de la escala espacial y temporal se puede emplear diferentes estrategias. No existe todavía una metodología universal que sea de aplicación a todas las escalas con lo que para cada caso se debe elegir la más oportuna (6, 9).

Para este trabajo se ha enfocado el estudio en los sistemas que permiten simular las condiciones de la microescala en cuanto es el nivel donde mayormente se manifiestan los efectos de la aplicación de las estrategias de diseño y es la más próxima al ciudadano. Estos sistemas aplican modelos de cálculo que entran en el detalle de los fenómenos que se producen en el espacio entre las superficies (fachadas y suelos) hasta la altura de las cubiertas de los edificios, analizando la geometría concreta del espacio objeto de observación (Figura 2.). El entorno de estudio así definido toma el nombre de *Urban Canopy Layer* (UCL)<sup>3</sup>, y corresponde a la porción de atmosfera que afecta directamente a la demanda energética de los edificios y a las condiciones de confort térmico en los espacios abiertos (6, 9).

<sup>1</sup> La microescala: se indica el entorno espacial reducido a la escala de barrio y se tratan las variaciones climáticas que se producen a pequeñas distancias, algunos metros, debido a la interacción de la atmosfera con los elementos urbanos (edificios, calles, plazas, jardines, etc.).

<sup>2</sup> La mesoescala: el elemento de estudio es la ciudad y la escala de orden es de distancia de algunos kilómetros. En la mesoescala se analizan las variaciones climáticas producidas por el conjunto urbano, y en este caso los factores que más influyen en su intensidad son la topografía, cercanía a fuentes de agua como los ríos o la presencia de grandes parques urbano.

<sup>3</sup> *Urban Canopy Layer* (UCL) es la capa que va del suelo hasta las cubiertas de los edificios y que se asocia a la microescala urbana.

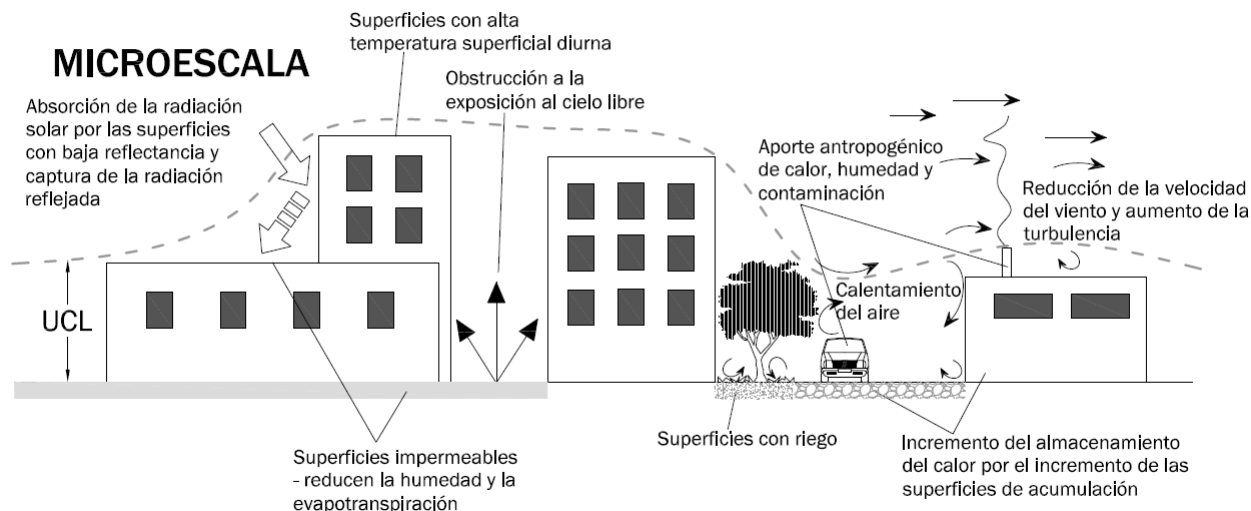


Figura 2. Fenómenos de intercambio de calor (absorción, reflexión y emisión de la radiación solar entrante) y fluidos (movimiento turbulento entre aire y superficies) que se producen en el entorno urbano en el UCL. Fuente: elaboración propia adaptado de Voogt J. *How Researchers Measure Urban HeatIslands*.

La estimación del comportamiento climático de este volumen de estudio, aunque limitado, debe considerar muchos elementos: la morfología urbana, la complejidad de la geometría (que es determinante tanto para la obstrucción solar, como para encauzar los vientos predominantes), la absorción y emisión de radiación, la presencia de la vegetación y las emisiones de calor antropogénico. Los modelos empleados para el cálculo del clima a la microescala se basan en la aplicación de los modelos físicos del intercambio de calor entre superficies y atmósfera que se generan considerando como principal fuente de energía la radiación solar y que pueden resumirse en dos fenómenos principales: la transmisión de onda<sup>4</sup> y el movimiento de fluidos<sup>5</sup> (9, 11, 12, 13).

La cantidad de radiación absorbida, reflejada o emitida por elementos del espacio urbano depende de la cantidad de radiación entrante y de las características<sup>6</sup> de los materiales de las superficies incidentes. Estos dos factores son muy importantes en la determinación de la cantidad de calor emitido a la atmósfera y, en consecuencia, de la temperatura del aire. También la temperatura superficial es un elemento muy significativo, no sólo por la cantidad de calor emitido a la atmósfera, sino también porque influye el movimiento del aire en contacto con las superficies. La simulación del movimiento de aire es determinante para la previsión de las condiciones térmicas en el espacio urbano y se puede modelar aplicando los principios de dinámica de fluidos. Las herramientas de simulación computarizadas aplican estos principios utilizando los modelos de *Computational Fluid Dynamic* (CFD), una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos basados en los enfoques teóricos de Navier-Stokes con algunas simplificaciones en el modelo de turbulencia para la realización del cálculo computacional (<http://www.cfd-online.com/>). El grado de complejidad de manejo y exactitud de los resultados depende de las aproximaciones y simplificaciones realizadas en el cálculo numérico.

<sup>4</sup> Transmisión de onda. En el entorno urbano la principal fuente de energía es el sol y se considera el intercambio radioactivo principalmente de dos bandas: la onda corta, con una longitud inferior a los 3µm, y la onda larga superior a los 3µm. (9, 10)

<sup>5</sup> Movimiento de fluidos. Principalmente se considera el movimiento de los fluidos de aire atmosféricos. Los cálculos se fundamentan en los principios de la física de fluidos en diferentes condiciones ambientales. (9)

<sup>6</sup> Características de los materiales. En la determinación del intercambio radioactivo en el entorno urbano las características ópticas de los materiales, sobre todo capacidad térmica, albedo y reflectividad al infrarrojo, son de gran importancia. (14)

### 3.- HERRAMIENTAS DE CÁLCULO

El uso del cálculo computacional ha permitido el desarrollo de metodologías de simulación cada vez más elaboradas, capaces de considerar un mayor número de variables y de mejorar el conocimiento y la previsión de los procesos que se generan en el entorno urbano. Sin embargo las diferencias entre los procesos que se producen entre la mesoescala y la microescala hacen que no sea posible definir un único sistema multiescalar aplicable a todos los casos. Por eso en general se opta por emplear diferentes herramientas cada una realizada para resolver un problema específico.

En la actualidad existen muchos sistemas, pero su aplicación está limitada debido principalmente a(6, 9):

- Los datos de entrada: algunos sistemas necesitan de muchos datos de partida, valores estadísticos u obtenidos con mediciones in situ además de la geometría urbana con un diferente grado de aproximación.
- Aplicabilidad: muchas herramientas desarrolladas a través de estudios experimentales en lugares concretos, si aplicadas a otros contextos, pueden no ser descriptiva de las condiciones reales.
- Resultados de la herramienta: ajustar los valores de resultados con los objetivos perseguidos es determinante en la aplicabilidad del sistema, por ejemplo las que están enfocadas al estudio de la eficiencia energética de los conjuntos urbanos pueden no aportar informaciones sobre las condiciones en el espacio libre.

A continuación se presenta una descripción de una selección de herramientas informáticas para el estudio de clima urbano a nivel de microescala disponible en el mercado. La selección de las herramientas ha sido enfocada hacia la búsqueda de sistemas que puedan ser empleados por los proyectistas Arquitectos, Urbanistas e Ingenieros, descartando aquellos sistemas que por complejidad, tiempo de ejecución y recursos no son efectivos durante la fase de diseño. Todas tienen un grado de complejidad de manejo medio, aunque en ciertos casos pueda ser necesario un periodo de formación en la herramienta seleccionada. Además pueden ejecutarse sin necesitar gran potencia de hardware y, a exclusión de Autodesk Ecotec Analysis 2010, son software libres. Las principales características y la evaluación de cada una de ellas se recogen en una tabla de resumen (Tabla a). Saber a priori el alcance y limitaciones de cada herramienta es una información muy útil para orientar los proyectistas en la selección del sistema de cálculo más adecuado según el caso de aplicación y los objetivos del proyecto, permitiendo un ahorro de tiempo y esfuerzos y sobre todo promoviendo el uso de los sistemas de simulación que consideren la componente climática para un diseño más eficiente.

#### 3.1.- SUNTOOL

La herramienta SUNtool, desarrollada por Robinson (2006) a través de un proyecto financiado por la Comisión Europea, realiza una modelación energética a partir de la estimación de las obstrucciones solares, calculada en el espacio urbano (9, 15, 16).

Con esta herramienta Robinson (2011) propone un enfoque multiescala que contempla la integración de dos sistemas: uno a nivel de mesoescala que se encarga de simular las condiciones regionales, considerando los condicionantes a nivel de ciudad y uno a escala más pequeña, que tiene en cuenta las características de los barrios de estudio. El procedimiento de simulación empieza ejecutando el modelo en la macro escala y, cuando se han obtenidos los valores característicos del ambiente urbano, estos se introducen en los parámetros de input en la herramienta de simulación a microescala (9).

La herramienta se compone por una interfaz gráfica donde el usuario puede seleccionar la localización y los datos climáticos y las características de los edificios como la ocupación, la tipología, antigüedad, sistemas de acondicionamiento, etc.. En la interfaz se define también la geometría 3D de los edificios, las características del ajuste de la simulación y de los datos de output. La interfaz gráfica ha sido desarrollada de manera compatible con los principales software de diseño como CAD ([www.autodesk.com](http://www.autodesk.com)), ArchiCAD ([www.graphisoft.com](http://www.graphisoft.com)), Sketchup ([www.sketchup.com](http://www.sketchup.com)), Rhino ([www.rhino3d.com](http://www.rhino3d.com)) y de las herramientas de modelación ambiental como LT([www.carltd.com](http://www.carltd.com)), Ecotect ([www.squl.com](http://www.squl.com)) y Tas ([www.edsl.net](http://www.edsl.net)). El segundo componente es el motor de simulación 'Solver', constituido por diferentes módulos que pueden calcular separadamente el comportamiento microclimático, térmico, estocástico y de las aportaciones de la vegetación (15, 16, 17).

El sistema integra en una única herramienta diferentes módulos de simulación(9, 16, 18):

- Microclimático: el modelo se basa en la aplicación de los principios de hidrodinámica, del intercambio de radiación solar de onda larga y corta, las aportaciones de calor antropogénico y la evapotranspiración.
- Consumo energético: con este módulo se quiere evaluar la demanda energética de los edificios teniendo en cuenta, además de las características de los edificios y de la ocupación, la influencia del microclima y del conjunto urbano, cómo puede ser por ejemplo las sombras arrojadas por otros edificios.
- Modelo estocástico: se incluyen en este apartado los modelos relativos a las actividades humanas que no son previsibles, pero que sin embargo afectan de forma importante al balance energético de los edificios y del conjunto urbano en general.<sup>7</sup>
- Plantas: el objetivo de este módulo es simular y dimensionar las plantas de distribución de energía y agua, cómo por ejemplo los sistemas de *district heating*. En este caso una de las propuestas de los desarrolladores es que la herramienta haga un autodimensionado del sistema y que eso se ajuste en un segundo paso.

El sistema representa un importante paso hacia adelante en el estudio del espacio urbano para una mayor comprensión de los procesos que se generan en él y en consecuencia, proponer medidas para mejorar su sostenibilidad. Sin embargo existen todavía muchas imprecisiones en el cálculo y en la validación del software, razón por la cual la herramienta no está todavía disponible al público para su uso.

### 3.2.- SOLENE

Otra herramienta desarrollada por el grupo de investigación CERMA es el software SOLENE (<http://www.cerma.archi.fr/CERMA/expertise/solene/>). El software se basa en el diseño de un modelo 3D para la evaluación de la concepción climática de los proyectos de arquitectura. El objetivo principal que ha guiado el desarrollo de este sistema ha sido la realización de una herramienta que pudiera soportar el diseño bioclimático de los edificios en un espacio urbano. La herramienta se usa también en laboratorio para la formulación de conocimientos teóricos que puedan constituir una base referencial para el diseño arquitectónico.

El modelo 3D de elementos finitos, integra diferentes módulos de cálculo que tienen en cuenta la radiación solar, la iluminación y los efectos térmicos producidos por un espacio urbano en cuanto a condiciones exteriores y confort de los usuarios.

El modelo de cálculo se basa en la determinación de la componente de radiación incidente y reflejada por el espacio urbano, calculada teniendo en cuenta el albedo de los materiales superficiales. La energía emitida por una superficie se obtiene aplicando la ley de Stefan-Boltzmann  $E = \epsilon \sigma T_{si}^4$  (W/m<sup>2</sup>), donde con  $T_{si}$  (K) se indica la temperatura de la superficie,  $\epsilon$  es la emisividad del material y  $\sigma$  (Wm<sup>-2</sup>K<sup>-4</sup>) es la constante de Stefan-Boltzmann. La valoración del flujo de calor tiene en cuenta tanto la componente por convención como la transferencia por conducción, calculada considerando las fachadas como superficies multicapas, estimando la capacidad de almacenamiento del calor de cada capa y la conducción entre ella.

El programa permite obtener una serie de valores de output relacionado con la radiación solar (W/m<sup>2</sup>), iluminación (lux), el *Sky View Factor*<sup>8</sup> (SVF) y la distribución de la sombra, informaciones muy útiles a la hora de diseñar y orientar los edificios en un entorno urbano. También es posible obtener valores de consumo y las temperaturas superficiales en los cañones urbanos. (19, 20)

---

<sup>7</sup> Se refiere por ejemplo al abrir y cerrar de las ventanas que modifican el flujo de aire y la temperatura interior, o la ocupación de un espacio que varía cuando la gente se va de vacaciones. Entran en este apartado también la generación de residuos, la posibilidad de generar energía y biogás a partir de ellos, o el uso de la iluminación natural, que normalmente está asociado a una ocupación pero que en la mayoría de los casos no coincide con la realidad

<sup>8</sup> *Sky View Factor*. Exposición al cielo libre es por definición el ratio entre la cantidad de radiación recibida por una superficie y la cantidad de radiación emitida por el hemisferio entero y se usa para describir la cantidad de radiación solar entrante en un espacio urbano.

De la literatura consultada se demuestra que el sistema realiza una buena aproximación del comportamiento real del espacio urbano. Sin embargo la calidad de los resultados está fuertemente influida por la calidad y precisión de los datos de input, cosa que limita mucho la realización del modelo.(21, 22)

La herramienta ha sido diseñada para soportar el diseño de nuevas urbanizaciones dando pautas por ejemplo en la orientación de las calles, la distancia entre bloques y/o altura de los edificios para maximizar el aprovechamiento solar, mejorar la iluminación natural o elegir la solución de envolvente más apropiada.

### 3.3- RAYMAN

Una herramienta sencilla pero capaz de proporcionar una buena resolución del balance de transferencia radiativa y de la evaluación termo fisiológica de las personas es el modelo humano bioclimático RayMan. (5) El sistema ha sido desarrollado para estudiar las condiciones de confort térmico en los espacios exteriores, dando como valores de output índices característicos como el PMV<sup>9</sup>, el PET<sup>10</sup> y el SET<sup>11</sup>. Los datos requeridos para ejecutar el cálculo son la temperatura del aire, humedad y velocidad de viento además de la definición de la geometría del espacio. El valor de la temperatura media radiante (T<sub>mrt</sub>) puede ser introducido por el usuario o calculado por el mismo sistema. Una interfaz gráfica muy sencilla permite definir la geometría del espacio. En la herramienta se ha incorporado el cálculo del SVF y su visualización en una imagen de ojo de pez. El software puede ser empleado también para la determinación de las sombras, la radiación solar media y máxima diaria y las horas de sol (23).

La gran ventaja del uso de esta herramienta es que se puede evaluar con poco esfuerzo y una baja inversión de tiempo para el cálculo computacional, muchos escenarios (5). Sin embargo, una de las limitaciones en el uso del software es la necesidad de disponer de datos climáticos: temperatura del aire, humedad y velocidad del viento que deben ser introducidos como valores de partida para el cálculo. La herramienta puede emplearse eficazmente como sistema complementario a la simulación energética para estimar las condiciones de confort.

### 3.4- URSOS

En España el IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía), en colaboración con el Grupo de Energía y Edificación de la Universidad de Zaragoza (<http://gee.unizar.es/>) ha desarrollado el sistema de simulación de la sostenibilidad urbana URSOS, que junta una herramienta de evaluación energética para conjuntos de edificios con la evaluación de algunos criterios de sostenibilidad.

El sistema, a través de una interfaz amigable, permite la definición de una geometría urbana de manera rápida y fácil, también para usuarios no expertos. Los tres elementos que componen la geometría urbana son las calles, las parcelas con su uso específico y los edificios, que pueden ser organizados por tipologías. Una vez definida la geometría y el uso de los espacios, a través de un cálculo estático, se puede simular en pocos segundos el consumo energético de todos los edificios del conjunto. El sistema proporciona otras informaciones como el derecho al sol, la calidad de la ventilación natural cruzada y las condiciones de confort en los edificios, además de una serie de datos como la cantidad de superficie dedicada a la vegetación o al espacio público, que se calculan automáticamente por el programa.

Una evaluación de los indicadores de sostenibilidad completa la simulación energética dando una caracterización del conjunto urbano en los siguientes tres aspectos:

- Energético, es el que tiene más peso y evalúa, además del consumo energético de los edificios, el consumo debido a alumbrado y al transporte urbano.
- Medioambiental, en este apartado se evalúan unos indicadores sobre el consumo de suelo, las emisiones a la atmosfera, el consumo de agua potable y la generación de residuos.

---

<sup>9</sup> *Predict Mean Vote*. Índice de confort térmico utilizado para el diseño de espacios interiores y referencia para la normativa UNE-EN ISO 7730.

<sup>10</sup> *Physiologically Equivalent Temperature*. Índice de confort térmico basado en la respuesta fisiológica del cuerpo humano.

<sup>11</sup> *Standard Effective Temperature*. Índice de confort térmico que introduce el concepto de sensación térmica a partir de unas condiciones físicas de confort en un ambiente ficticio.

- Habitabilidad, aquí se contemplan parámetros como la cantidad de superficie para la movilidad peatonal, el espacio público, la cantidad de servicios básicos y de equipamientos y la accesibilidad al entorno natural.

Para la evaluación de los indicadores el usuario deberá introducir algunos datos de input más específicos, para permitir a la herramienta calcularlos y puntuarlos según una escala de valores que va de 1 a 5. Un segundo sistema de ponderación permite pesar los diferentes indicadores y obtener una valoración final de la urbanización según un índice de sostenibilidad.

La herramienta ha sido desarrollada como herramienta de diseño de urbanizaciones y nuevos desarrollos urbanos, pero puede ser empleada útilmente también para proyectos de rehabilitación urbana. La gran ventaja es la facilidad de uso y la rapidez con la que se puede obtener el resultado de la evaluación ya que puede emplearse en las primeras fases de diseño y en la toma de decisiones. A través de un sistema de “alarmas”, el resultado destaca los elementos e indicadores que son más desfavorables, dando claras directrices de diseño orientadas hacia una mayor sostenibilidad (24).

El sistema está orientado para la mejora energética del conjunto de edificios y por eso no se realiza una simulación de las condiciones térmica del espacio exterior.

### 3.5- AUTODESK ECOTECT ANALYSIS 2010

Entre las diferentes herramientas de simulación y análisis energético, Autodesk Ecotect Analysis 2010 permite también el estudio de conjuntos urbanos. El programa permite un amplio estudio de los diferentes comportamientos energéticos de los edificios, incluyendo también módulos para el estudio de la radiación solar, la iluminación natural, el consumo de agua y la propagación del ruido (25).

El programa está pensado para orientar a los proyectistas en las primeras fases de toma de decisiones en el diseño de edificios eficientes y en las fases sucesivas para la evaluación de las demandas y consumos energéticos. Como herramienta de ayuda al diseño, Ecotect integra un módulo para el estudio a nivel urbano enfocado principalmente a encontrar la mejor orientación de los edificios para el aprovechamiento solar. La herramienta permite incorporar valores climáticos específicos en su base de datos a través de la herramienta Weather Tool. Además de los datos de temperatura, los ficheros contienen una serie de datos relativos a la radiación solar, intensidad y dirección de los vientos. Es posible consultar estos datos con diferentes sistemas de visualización: por ejemplo podemos ver el recorrido del sol en un diagrama Stereográfico y hacer una superposición con otros diagramas como el de aprovechamiento solar.

El programa es capaz además de hacer un estudio más avanzado de la componente solar en un área específica analizando dos parámetros, que sin el cálculo computacional serían de muy difícil determinación: el *Sky View Factor*, la radiación solar incidente y la reflejada en el espacio urbano. Los modelos geométricos 3D del caso a simular pueden ser realizados directamente en el programa, a través del módulo de diseño, o importado desde otros programas de diseño como Autocad, Revit o Sketchup.

El uso del software en el estudio climático del espacio urbano es muy limitado, ya que Ecotect nace principalmente para el estudio energético de los edificios. El sistema hace una buena aproximación en el análisis de la radiación solar, de la componente de cielo y en el estudio de sombra, elementos muy importantes en el diseño bioclimático (9, 25). Sin embargo la única información sobre la componente de radiación solar no es suficiente para determinar los procesos térmicos en el espacio urbano.

### 3.6- ENVI-MET 3.1

La herramienta ENVI-met ha sido desarrollada por Michael Bruse (*Institute of Geography, Department of Geoinformatic, Environmental Modeling Group, University of Mainz*) con el objetivo de poder simular la interacción entre superficies-plantas-aire en un entorno urbano, basado fundamentalmente en modelos de dinámica de fluidos y termodinámica (26). La herramienta ha sido diseñada para simular las condiciones a la microescala con una resolución de la malla horizontal entre 0,5 y 10 metros en un lapso de tiempo entre 24-48 horas con intervalos de 10 segundos (27). La herramienta se compone principalmente por dos sistemas: el primero representa la superficie terrestre y el segundo la porción de atmosfera que va de la superficie terrestre hasta la cota máxima de 2500m. La superficie terrestre está constituida por la porción de ciudad estudiada como una estructura multicapa donde vegetación y suelo son tratados separadamente. La vegetación se divide también en varias capas con el fin de realizar una mejor representación del intercambio de energía y masa (26, 28, 29).



El programa se compone de una interfaz gráfica para la realización del modelo urbano 3D, una base de datos con los valores característicos para la vegetación, suelos, acabados superficiales, fuentes de calor y de contaminantes y un motor de cálculo.

El proceso de simulación se basa en la aplicación rigurosa de las teorías de termodinámica y dinámica de fluidos:

- **Flujo de Aire:** se aplica la teoría de dinámica de fluidos de Navier Stokes usando la aproximación de Bussinesq. En el cálculo de la turbulencia se considera también el efecto producido por los elementos urbanos como edificios y la vegetación.
- **Transferencia Radiativa:** se aplica un enfoque semi-empírico que simula la transmisión de la onda corta entrante entre el aire y las superficies de edificios y suelos.
- **La vegetación:** se simula su aportación a la absorción y reflexión de onda, la evapotranspiración y el movimiento turbulento que se produce entre las hojas y el aire.

ENVI-met simula los procesos que se producen en la micro-escala usando una compleja estructura del ciclo diario esquematizada en la figura 3 (2).

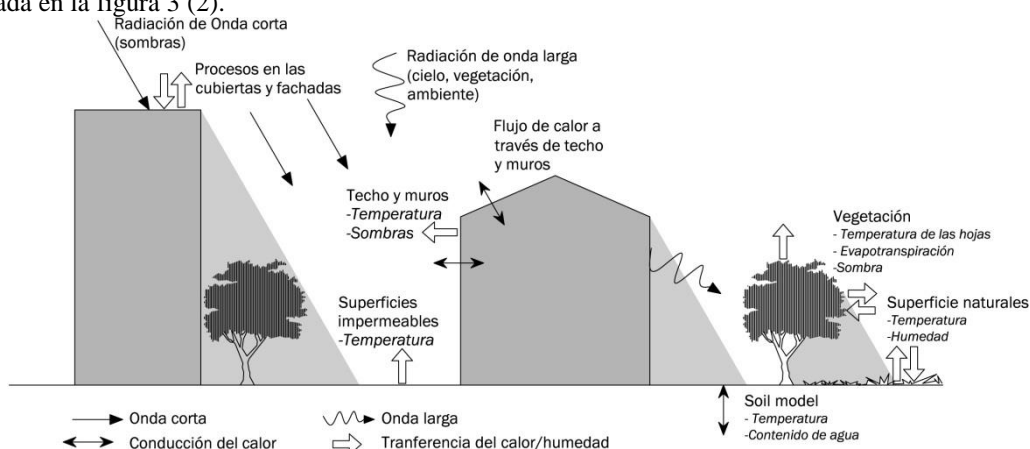


Figura 3. Modelo urbano usado por Envi-met 3.1. Elaborado a partir de Bruse M. 2010.

Aunque el sistema carece de flexibilidad a la hora de modelar el espacio urbano y de una cierta incertidumbre en los resultados obtenidos, constituye una de las mejores opciones para la simulación del microclima en espacios urbanos en cuanto a dificultad de uso, información de partida proporcionada por el usuario, tiempo de ejecución y valores de output. Respecto al uso de otras herramientas de resolución del cálculo de la mecánica de fluidos (CFD) ENVI-met tiene algunas ventajas que hacen que la herramienta sea compatible con las necesidades del trabajo profesional:

- la simplicidad de manejo y baja demanda de tiempo del software, ya que no se necesita personal altamente especializado en resolución de CFD, ni gran potencia de hardware,
- una buena representación de las transferencias superficiales entre vegetación y suelos con una configuración en multicapas,
- la posibilidad de usar una malla horizontal y vertical pequeña con una precisión hasta de 1 metro,
- existencia de un bajo número de parámetros de input para el conjunto del sistema vegetación-suelo-atmosfera.

También la literatura consultada demuestra que los errores en la simulación del flujo, en el cálculo de la radiación y en la dispersión de partícula (29, 30, 31) son errores aceptables comparados con las magnitudes manejadas (2, 32).

#### 4.- ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS HERRAMIENTAS

Para tener una visión de las potencialidades resolutivas y de la aplicabilidad de los sistemas estudiados, se definen unos parámetros de análisis cuyo resultado se muestran en la Tabla a.

Los parámetros se organizan en 3 categorías:

- **Sistema de cálculo:** en este apartado se indican los modelos teóricos en los que se basa el motor resolutivo de la herramienta. De los diferentes fenómenos que afectan las condiciones climáticas a nivel de microescala, podemos distinguir la absorción y reflexión de onda, el intercambio de calor y el movimiento de flujos en el atmosfera que

interaccionan entre ellos. La capacidad de simular uno o más procesos, de cómo interactúan entre ellos y de la influencia de los elementos urbanos es determinante en la definición del grado de acercamiento de los resultados a las condiciones reales. Las variables manejadas, el tipo de información de partida y los valores de output también dependen del modelo resolutivo utilizado.

- **Datos de Entrada:** son directamente relacionados con el modelo de cálculo empleado y con las hipótesis de partida. Por ejemplo los sistemas que admiten la introducción de muchos factores de partida permiten obtener resultados más cercanos a la realidad de los que usan valores estándar definidos por defecto. Sin embargo, la obtención de estos datos iniciales entraña una cierta dificultad que, según la fase de proyecto y el alcance del estudio, puede ser un factor determinante en la elección del sistema.
- **Valores de Salida de la Herramienta:** el tipo de resultado que se pueden obtener del proceso de simulación es quizá el elemento más significativo a la hora de orientar un estudio microclimático. Por ejemplo algunas herramientas que están enfocadas a la estimación del consumo de los edificios no proporcionan valores para el análisis del espacio abierto o las que están enfocadas a los nuevos desarrollos pueden no ser adecuadas en proyectos de rehabilitación.

También el grado de dificultad en la ejecución y de precisión en los resultados es un elemento determinante sobre todo en relación a los objetivos fijados. Por ejemplo en un estudio inicial en las primeras fases de aproximación al proyecto, se preferirá una herramienta que permita obtener resultados sin mucha inversión de tiempo y de recursos para poder evaluar diferentes escenarios de proyecto. Por otro lado, en una fase ya de proyecto definitivo será preciso emplear una herramienta que permita un mayor grado de precisión en los resultados para el dimensionado de los sistemas. El conocimiento de todos estos elementos es muy útil para orientar al proyectista en la selección de los sistemas y también para dar conocimiento de las posibilidades que estos ofrecen para que la previsión del comportamiento microclimático se introduzca en el proceso de diseño desde las primeras fases de acercamiento al proyecto.

Las herramientas estudiadas han sido elegidas entre las que permiten una aproximación al estudio de la componente térmica en el diseño urbano pero con un nivel de complejidad de manejo e inversión de tiempo compatible con el trabajo profesional de los diseñadores. Por eso no han sido objeto de análisis aquellos sistemas que requieren personal altamente especializado, gran potencia de hardware, extensos estudios previos o una alta inversión de tiempo, aunque permitan obtener valores más cercanos al comportamiento real y pueden ser útilmente empleados en proyectos de investigación.

Herramienta		SUNtool	SOLENE	RayMan	URSOS	Ecotect	ENVimet
<b>Propiedad</b>		Software Libre	Software Libre	Software Libre	Software Libre	Autodesk	Software Libre
Sistema de calculo	Transferencia Radiativa	Se considera el intercambio de onda corta entre las superficie, para la previsión de la radiación incidente y la reflejada.	El motor de cálculo se basa en un modelo que simula la clausura del cielo y reflexión de radiación de onda directa y reflejada.	Se basa en un modelo de transmisión de onda y de intercambio radioativo.	Simula la radiación directa entrante.	Emplea un modelo de simulación de la radiación solar directa y reflejada. Es posible exportar los datos a otros motores de cálculos como RADIANCE.	Simula la radiación directa entrante, la reflejada y la emitida por el entorno urbano.
	Transmisión del calor	Se modela el intercambio de calor entre las superficies de los edificios y el aire.	Calcula el flujo de calor entre las superficies de los edificios y la atmosfera.	No se considera.	Simula el consumo energético del conjunto de edificios a través de un cálculo estático.	La trasmisión del calor sólo se calcula las aportaciones solares en la simulación del edificio.	Se aplica un modelo de transmisión de calor basado en la ley de Stefan-Boltzman.
	Dinámica de fluidos	Se considera un modelo simplificado de CFD considerando una malla a nivel de mesoescala de una celda.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	Usa un modelo de dinámica de fluidos basado en los principios de Navier-Stokes.
Datos de Entradas	Geometría 3D	Se apoya a otros sistemas de representación gráfica 3D como CAD, ArchiCAD, Sketchup	El sistema permite la introducción y visualización de un modelo 3D.	Se introduce la geometría 3D, aunque se puede visualizar solo el 2D	Una interfaz amigable permite la introducción fácil de la geometría urbana.	Se puede introducir la geometría a través de la interfaz gráfica del software o importarla de otras herramientas.	La interfaz gráfica permite la introducción de la geometría, aunque solo se puede visualizar en 2D. Se debe definir una malla regular antes de introducir la geometría.
	Materiales	Definición de materiales de los edificios por defecto según la tipología y año de construcción o definidos por el usuario.	Se puede definir los materiales de la envolvente los edificios de forma detallada.	No se considera.	Se pueden indicar los materiales de la envolvente de los edificios.	Se pueden indicar los materiales de la envolvente de los edificios y de las superficies reflejantes.	Se pueden indicar los materiales de acabados de los suelos pero no de los edificios.
	Vegetación	No se considera.	No se considera.	Se pueden introducir árboles, indicar tipo y dimensiones.	No se considera.	No se considera.	Se pueden introducir árboles, arbustos y césped, indicar tipo y dimensiones.

	Herramienta	SUNtool	SOLENE	RayMan	URSOS	Ecotect	ENVImet
Datos de Entradas	Fuentes de agua	No se considera.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	Se pueden simular fuentes de agua profunda.
	Aportaciones Antropogénicas	No se considera.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	No se considera.	Se pueden indicar fuentes de calor o de contaminantes puntuales.
	Datos climáticos	No se pueden introducir datos medidos.	Se deben introducir datos de temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, nebulosidad o cobertura de nubes.	Se deben introducir los valores de temperatura del aire, humedad, radiación solar y velocidad del viento.	Se puede seleccionar el clima de acuerdo a las zonas climáticas de España.	Se pueden cargar los datos climáticos obtenidos de las bases de datos del Weather Data.	Se pueden introducir datos climáticos de partida que se mantiene constante durante la simulación.
Valores de Salida	Clima exterior	Permite simular el microclima en el espacio abierto.	No da valores de output.	No da valores de output.	No da valores de output.	No da valores de output.	Se obtiene un amplio abanico de resultados de los aspectos climáticos, visualizado en un mapa 2D y 3D.
	Consumo energético	Permite simular el consumo energético de los edificios.	Realiza un cálculo de las ganancias solares con el objetivo de orientar el diseño pasivo del edificio.	No da valores de output.	Permite simular el consumo energético del conjunto de edificios.	El programa tiene un motor de cálculo para la simulación del consumo energético de los edificios o se puede exportar a Energy+.	No da valores de output.
	Confort térmico	No da valores de output.	Estima el nivel de confort en el espacio externo.	Se obtienen varios índices de confort térmico: Tmrt, SET, PET, PMV.	No da valores de output.	No da valores de output.	Se obtienen los valores del PPD, PMV y de la Tmrt

	Herramienta	SUNtool	SOLENE	RayMan	URSOS	Ecotect	ENVImet
Valores de Salida	Radiación	Es capaz de simular el intercambio de onda larga y onda corta, así como la iluminación natural interior de los edificios.	Estima la transmisión de onda en el espacio urbano para la radiación directa y reflejada.	El valor de radiación puede ser introducido o estimado por el programa.	No da valores de output.	Estima la transmisión de onda en el espacio urbano para la radiación directa y reflejada.	Se puede obtener la radiación directa, reflejada y emitida.
	SVF	Realiza el cálculo de la exposición al cielo y de las sombras.	Calculo el SVF, realiza un estudio de las sombras y de la iluminación natural.	Calcula el SVF y lo representa en un gráfico estereográfico.	Permite realizar un estudio de las sombras y del derecho al sol.	Realiza el cálculo de la exposición al cielo y de las sombras en las diferentes épocas del año.	Se puede obtener el factor de exposición al cielo.
	Ayuda al diseño	No da valores de output.	El programa está pensado para ayudar el diseño de nuevos desarrollos urbanos.	No da valores de output.	Da indicaciones sobre las posibles mejoras en la eficiencia energética de los edificios.	Realiza una evaluación del diseño bioclimático de los edificios y de su emplazamiento.	No da valores de output.
	Otros	Incluye un modelo estocástico para la previsión de las actividades humanas. Permite la simulación de plantas de distribución. Realiza un cálculo del consumo de agua para mejorar la eficiencia de las instalaciones.	No da otros valores de output.	No da otros valores de output.	Realiza una evaluación de algunos indicadores de sostenibilidad.	No da otros valores de output.	Se puede simular el movimiento de partículas contaminantes.

Tabla a. Evaluación comparativa entre las herramientas de simulación.

## 5.- CONCLUSIONES

Entre los varios sistemas para estudiar el clima urbano, los métodos numéricos basados en la realización de un modelo 3D son los que mejor permiten evaluar diferentes escenarios de proyecto. La posibilidad de obtener una aproximación del comportamiento microclimático con una inversión razonable de tiempo y de recursos, hace que este tipo de enfoque sea cada vez más empleado tanto en los trabajos de investigación como en la práctica profesional.

Como se ha podido ver en la exposición de los diferentes sistemas, la realización de un modelo completo es bastante laborioso y complejo ya que se deben considerar muchos factores: el balance radiactivo y la dinámica de los fluidos son las dos componentes principales. Gracias a la introducción del cálculo computacional ha sido posible avanzar en el enfoque teórico y realizar modelos cada día más complejos y más cercanos a la realidad. Sin embargo, una mayor complejidad del modelo implica a la vez una mayor dificultad en la introducción de datos y la necesidad de usar equipos más potentes.

Los sistemas evaluados se enfrentan a la estimación del comportamiento urbano utilizando enfoques que implican un cierto grado de aproximación en el acercamiento al cálculo computacional. De los tres apartados analizados podemos observar:

**Sistema de Cálculo:** todas las herramientas realizan una simulación de la componente de radiación solar, considerando que la cantidad de luz entrante en el espacio urbano es un elemento fundamental para el diseño. También la transmisión del calor es otro de los fenómenos considerado por la mayoría de los sistemas, exclusión hecha por RayMan que está enfocado al estudio del confort térmico de las personas y no valora la transmisión de calor entre superficies y atmosfera. Solo dos de los programas examinados realizan también una valoración de la dinámica de los fluidos en la microescala, en ambos casos se basan en el cálculo numérico de CFD que, aunque asumen importantes simplificaciones en la modelización de las condiciones de contexto, aportan una serie de resultados y un mayor acercamiento al comportamiento real del espacio urbano que no es posible obtener considerando solo la transmisión del calor.

**Datos de entrada:** la definición de la geometría tanto en planta como en alzado es fundamental para la estimación del comportamiento del espacio así que todas las herramientas estudiadas permiten la introducción de la geometría 3D, aunque con grandes diferencias en la interfaz utilizada y los datos pedidos. La definición de la geometría con ENVImet es limitada a la de una malla 3D que puede tener una precisión hasta 1m de longitud, a diferencia de las otras que no necesitan definir la malla antes de diseñar el espacio urbano. Algunas como Suntool y Ecotect permiten además importar el modelo geométrico de otros sistemas facilitando así esta tarea de trabajo. La mayoría de la información relativa a la geometría, tipo de materiales empleados y presencia de otros elementos urbanos, se definen en el modelo 3D. Las características de los materiales de acabado están almacenadas en una base de datos asociada y en el caso de ENVImet el usuario puede acceder a esta base y modificarla. A pesar de la gran importancia que tiene la presencia de la vegetación, solo dos herramientas permiten la introducción de los elementos vegetales como tales. En cuanto a los datos climáticos hay muchas diferencias entre las estrategias empleadas por cada sistema. Las que utilizan datos climáticos procedentes de bases de datos estandarizadas y las que necesitan valores obtenidos de mediciones in situ. Esta segunda opción es la que a priori permite obtener valores más cercanos a los reales, por otro lado si no hay estaciones meteorológicas cercanas o los datos recolectados no son suficientes, esto suponen la dificultad de realizar una campaña de mediciones in situ. Por ejemplo en el caso del software SOLENE, la precisión de los resultados depende mucho de la fiabilidad de los valores medidos.

**Valores de Salida de la Herramienta:** en cuanto a los resultados hay muchas diferencias entre las herramientas seleccionadas, ya que el único resultado proporcionado por todas es la exposición al cielo (*Sky View Factor-SVF*). Se puede apreciar también que la mayoría de los sistemas están enfocados en la eficiencia energética de los edificios y en el estudio de nuevos desarrollos, incluyendo algunos una guía para el diseño. También resaltar que estos sistemas cuya principal potencialidad es en orientar el diseño de la morfología urbana, están claramente enfocados al proyecto de nuevos desarrollos urbanos y que son de difícil aplicación en los trabajos de rehabilitación de barrio. Solo dos de los sistemas estudiados proporciona resultados para la valoración de las condiciones de los espacios abiertos. Eso demuestra que a pesar del interés para la calidad ambiental y el confort térmico del espacio libre ciudadano (33, 34, 35, 36, 37, 38, 39), los profesionales Arquitectos, Ingenieros y Urbanistas, carece todavía de conocimiento y de herramientas adecuadas para su previsión en fase de diseño.

Con este estudio no se quiere hacer una valoración de la conveniencia de utilizar un sistema u otro, si no dar una visión de las posibilidades ofrecidas por los sistemas evaluados. Además, la comparación entre ellas sería poco significativa porque cada una emplea modelos, datos de partidas y objetivos diferentes. El trabajo demuestra que cada sistema es eficaz para algunos objetivos específicos por lo que la realización de un estudio exhaustivo del comportamiento del entorno urbano comporta el uso de diferentes herramientas.

Podemos también resaltar que las herramientas que consideran el efecto del movimiento de fluidos emplean modelos más cercanos al comportamiento real, lo que supone a la vez una mayor dificultad de manejo e inversión de tiempo para el cálculo computacional. En general podemos concluir que las herramientas actualmente disponibles en el mercado emplean métodos simplificados por lo que se deben asumir valores por defectos y limitar su flexibilidad en la introducción de variables para hacer que puedan ser empleadas por usuarios con un grado de especialización medio. Su uso se justifica en una fase de proyecto en orientar las estrategias de diseño y evaluar entre diferentes escenarios el que muestra mejores prestaciones en lugar de buscar estimaciones de valores cercanos a la realidad. Considerar la componente microclimática en un proyecto comporta beneficios a largo plazo, ya que es muy difícil cambiar el comportamiento térmico de una porción de ciudad con una geometría determinada. Las herramientas de simulación permiten realizar una evaluación objetiva de las estrategias de diseño y por eso su uso debería apoyar los proyectistas desde las primeras fases de toma de decisiones.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado dentro del marco del proyecto de investigación ECOURBAN – “Metodología para la Evaluación del Impacto Energético y Medioambiental en el Ecodiseño de Urbanizaciones” cofinanciado por el Ministerio de Ciencia e Innovación dentro del Plan Nacional de investigación de I+D+i 2008-2011 – Numero de Referencia ENE2010-19850.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. López Gómez, A; López Gómez, J.; Fernandez Garcías, F. et al.. El Clima Urbano: Teledetección De La Isla De Calor En Madrid. CSIC. Madrid. 1991. ISSN: 0014-1496.
- [2]. Ali-Toudert Fazia, Mayer Helmut. "Numerical Study on the Effects of Aspect Ratio and Orientation of an Urban Street Canyon on Outdoor Thermal Comfort in Hot and Dry Climate." *Building and Environment*, 2, 2006, vol. 41, no. 2. pp. 94-108. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.01.013.
- [3]. Giridharan R., et al. "Urban Design Factors Influencing Heat Island Intensity in High-Rise High-Density Environments of Hong Kong." *Building and Environment*, 10, 2007, vol. 42, no. 10. pp. 3669-3684. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.09.011.
- [4]. Dieleman Hans. "Organizational Learning for Resilient Cities, through Realizing Eco-Cultural Innovations." *Journal of Cleaner Production*, 2013. vol. 50. pp. 171-180. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.11.027.
- [5]. Matzarakis A., Rutz F. and Mayer, H. "Modelling Radiation Fluxes in Simple and Complex Environments—application of the RayMan Model." *International Journal of Biometeorology*, 2007, vol. 51, no. 4. pp. 323-334. DOI:10.1016/j.jweia.2012.02.006.
- [6]. Mirzaei Parham A., Haghighat Fariborz. "Approaches to Study Urban Heat Island – Abilities and Limitations." *Building and Environment*, 10, 2010, vol. 45, no. 10. pp. 2192-2201. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.04.001.
- [7]. Santamouris M, Asimakopoulos D N, Assimakopoulos V D, et al. *Energy and Climate in the Urban Built Environment*. . SANTAMOURIS, M. ed., Athens, Greece: University of Athens, 2001. 410 p. ISBN 978-1-873936-90-7.
- [9]. Oke, T. R. *Boundary Layer Climates*. Routledge. Londres. 1987. ISBN: 0-415-04319-0
- [9]. Robinson, D. *Computer Modelling for Sustainable Urban Design: Physical Principles, Methods and Applications*. London: Earthscan, 2011. 301 p. ISBN 9781844076796.
- [10]. Fernando R. *Ropa, Sudor Y Arquitectura*. Madrid: H. Blumes ed., 1980. 126 p. ISBN 84-7.214-193-4.

- [11]. Santamouris M, Papanikolaou N, Livada I, et al. "On the Impact of Urban Climate on the Energy Consumption of Buildings." *Solar Energy*, 2001. vol. 70, no. 3. pp. 201-216. DOI: /10.1016/S0038-092X(00)00095-5.
- [12]. Ellis Aronin J. *Climate & Architecture*. Reinhold ed., New York: Reinhold, 1953. 304 p. ISBN 0-404-16200-2.
- [13]. Steemers K., Steane M. A. *Environmental Diversity and Architecture*. Oxon: Spon Press, 2004. 237 p. ISBN 0-415-31478-X.
- [14]. Gray K A and Finister M E. *The Urban Heat Island, Photochemical Smog, and Chicago: Local Features of the Problem and Solution*. Northwestern University, Department of Civil Engineering, 1999. 268 p.
- [15]. Robinson, D., Stone A. "Internal Illumination Prediction Based on a Simplified Radiosity Algorithm." *Solar Energy*. 2006. vol. 80, no. 3. pp. 260-267. DOI: 10.1016/j.solener.2005.02.016.
- [16]. Robinson D, Campbell N, Gaiser W, et al. "SUNtool – A New Modelling Paradigm for Simulating and Optimising Urban Sustainability." *Solar Energy*. 2007. vol. 81, no. 9. pp. 1196-1211. DOI: 10.1016/j.solener.2007.06.002.
- [17]. Robinson D., Stone A. "Solar Radiation Modelling in the Urban Context." *Solar Energy*. 9, 2004. vol. 77, no. 3. pp. 295-309. DOI: 10.1016/j.solener.2004.05.010.
- [18]. Robinson D. "Some Trends and Research Needs in Energy and Comfort Prediction." Presented at: Comfort and energy use in building. Windsor, United Kingdom, 27-30 April 2006.
- [19]. Idczak M, Groleau D, Mestayer P, et al. "An Application of the Thermo-Radiative Model SOLENE for the Evaluation of Street Canyon Energy Balance." *Building and Environment*. 2010. vol. 45, no. 5. pp. 1262-1275. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.11.011.
- [20]. Cerma. *La Wiki De La Liste Solenetb*. C. Martine, Chazelas ed., 26-03-2012, 2012 Available from: <<https://groupes.renater.fr/wiki/solenetb/index?do=backlink>>.
- [21]. Cherqui F, Groleau D, Wurtz E, et al. "A Step Toward the Global Assessment of District Projects: Solar Indicators and Way to Quantify Them". *Ninth International IBPSA Conference*. Montreal. August 15-18, 2005.
- [22]. Groleau D, Fragnaud F, Rosant J M. "Simulation of the Radiative Behaviour of an Urban Quarter of Marseille with the SOLENE Model". *Fifth International Conference on Urban Climate*. 1-5 September 2003. Lodz, Poland.
- [23]. Gulyás, Á, Unger J, Matzarakis A. "Assessment of the Microclimatic and Human Comfort Conditions in a Complex Urban Environment: Modelling and Measurements." *Building and Environment*, 12, 2006, vol. 41, no. 12. pp. 1713-1722. DOI: 10.1016/j.buildenv.2005.07.001.
- [24]. Unizar. *URSOS-Urbanismo Sostenible*. Jueves, 19 de Abril de 2012, 2012b Available from: <<http://ursos.unizar.es/index.php/home>>.
- [25]. Marsh A. *Autodesk-Ecotect (Version 5.6)*. , 2010.
- [26]. Bruse M. *ENVI-Met Website*. Online: [Http://www.Envimet.Com](http://www.envimet.com), 2004.
- [27]. Yu C and Hien W N. "Thermal Benefits of City Parks." *Energy and Buildings*. 2006. vol. 38, no. 2. pp. 105-120. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.08.005.
- [28]. Bruse M and Skinner C J. "Rooftop Greening and Local Climate: A Case Study in Melbourne". *Proceedings of the 15th International Congress of Biometeorology & International Conference on Urban Climatology Urban Climatology*. Sydney 1999.
- [29]. Samaali M, Courault D, Bruse M, et al. "Analysis of a 3D Boundary Layer Model at Local Scale: Validation on Soybean Surface Radiative Measurements." *Atmospheric Research*, 2007, vol. 85, no. 2. pp. 183-198. DOI: 10.1016/j.atmosres.2006.12.005.
- [30]. Nikolova I, Janssen S, Vos P, et al. "Dispersion Modeling of Traffic Induced Ultrafine Particles in a Street Canyon in Antwerp, Belgium and Comparison with Observations." *Science of the Total Environment*. December 2011. vol. 412-413, no. 0. pp. 336-343. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.09.081.



- [31]. Wania A., Bruse M, Blond N, et al. "Analysing the Influence of Different Street Vegetation on Traffic-Induced Particle Dispersion using Microscale Simulations." *Journal of Environmental Management*. 2, 2012. vol. 94, no. 1. pp. 91-101. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.036.
- [32]. Thorsson S., Lindqvist M., Lindqvist S. "Thermal Bioclimatic Conditions and Patterns of Behaviour in an Urban Park in Göteborg, Sweden." *International Journal of Biometeorology*. 2004, vol. 48, no. 3. pp. 149-156. DOI: 10.1007/s00484-003-0189-8
- [33]. Ahmed K S. "Comfort in Urban Spaces: Defining the Boundaries of Outdoor Thermal Comfort for the Tropical Urban Environments". *Energy and Buildings*. 1, 2003. vol. 35, no. 1. pp. 103-110. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00085-3.
- [34]. Bröde P, Krüger E L, Rossi F A, et al. "Predicting Urban Outdoor Thermal Comfort by the Universal Thermal Climate Index UTCI—a Case Study in Southern Brazil". *International Journal of Biometeorology*. 2012. vol. 56, no. 3. pp. 471-480. DOI: 10.1007/s00484-011-0452-3.
- [35]. Eliasson I, Knezb I, Westerberg U, et al. "Climate and Behaviour in a Nordic City". *Landscape and Urban Planning*, 8/15, 2007, vol. 82, no. 1–2. pp. 72-84. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2007.01.020.
- [36]. Havenith G, Fiala D, Błazejczyk K, et al. "The UTCI-Clothing Model". *International Journal of Biometeorology*. 2012, vol. 56, no. 3. pp. 461-470. DOI: 10.1007/s00484-011-0451-4.
- [37]. Knez I, Thorsson S, Eliasson I, et al. "Psychological mechanisms in outdoor place and weather assessment: towards a conceptual model". *International journal of biometeorology*. August 2009. vol 53. pp. 101-111. DOI: 10.1007/s00484-008-0194-z.
- [38]. Nikolopoulou M, Baker N, Steemers K. "Thermal comfort in outdoor urban spaces: understanding the human parameter". *Solar Energy*. 2001. vol. 70, no. 3. pp. 227-235. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00093-1.
- [39]. Irina Tumini. *El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid*. Tesis (Doctoral). ETS Arquitectura -Universidad Politécnica de Madrid. 2013.