



La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago

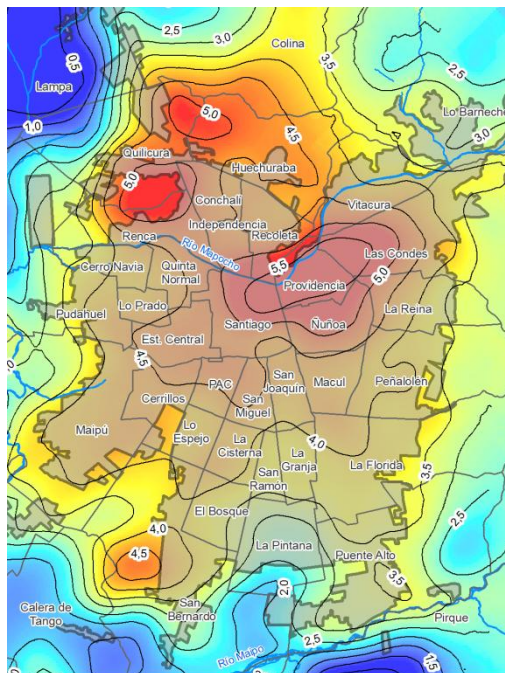
Pablo Sarricolea Espinoza

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tdx.cat) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tdx.cat) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tdx.cat) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

La isla de calor urbana de superficie y sus factores condicionantes: El caso del área metropolitana de Santiago



Memoria presentada por
Pablo Sarricolea Espinoza
para optar al grado de Doctor

Director de tesis: Dr. Javier Martín-Vide

Barcelona-España, Julio 2012

Capítulo 2

Climatología urbana

LA CLIMATOLOGÍA URBANA

2.1. Apunte histórico sobre las raíces de la Climatología urbana

Las primeras alteraciones climáticas por la acción del hombre que fueron documentadas se centraron en la contaminación del aire urbano. Landsberg (1981) señala que, desde que se desarrollaron las ciudades, la gente notó que el aire urbano era muy diferente del aire rural. La población urbana sentía un malestar persistente como reacción a la composición del aire contaminado. Ya en las odas del poeta Quinto Horacio Flaco (65–8 a.C.) se hace alusión a la contaminación por *smog* en Roma (Neumann, 1979). Concretamente, los escritos de Lucio Anneo Séneca (4 a.C.– 65 d.C.) señalan que el aire de Roma, pestilente y pesado, alteraba su estado anímico.

Hacia finales de la Edad Media, Londres se convirtió en el prototipo de la contaminación del aire. En el año 1306 el rey Eduardo I de Inglaterra (1239–1307) promulgó oficialmente la prohibición de la quema de carbón de origen mineral. Por su parte, la reina Isabel I (1533–1603) prohibió la quema de carbón en la ciudad durante las sesiones del Parlamento. El naturalista John Evelyn (1620–1706), miembro de la *Royal Society*, escribió un folleto en 1661 condenando el uso de carbón en la industria que decía: «Porque en todos los demás lugares el aire es más tranquilo y puro, en cambio aquí, las nubes de Azufre han eclipsado al mismo sol, que no es capaz de penetrar y difundir su luz» (*Fumifugium, or the Inconvenience of the Aer¹ and Smoke of London Dissipated, together with some Remedies*). El problema de la contaminación persistió en Londres durante casi 300 años hasta que, a consecuencia de un trágico episodio en 1952 que causó la muerte de aproximadamente 4.000 personas, se extremaron las medidas legislativas que convirtieron a Londres, entre otras ciudades inglesas, en zonas «libres de humo».

¹ *Aer* es aire en español y *Air* en el inglés moderno

2.2. La importancia de las diferencias térmicas entre la ciudad y su periferia en Climatología urbana

Otra de las alteraciones climáticas urbanas que fueron inadvertidas durante muchos siglos fue el aumento de las temperaturas de las ciudades y las diferencias entre la distribución de otras variables tales como la humedad y el viento. En 1820, Luke Howard (Landsberg, 1981) llevó a cabo un estudio titulado «*The Climate of London deduced from meteorological observations, made in the Metropolis and at various place around it*», el cual compara una serie de variables, destacando en nuestro caso el análisis comparativo de los promedios mensuales de temperaturas diurnas y nocturnas de estaciones meteorológicas localizadas en el centro de Londres y sus afueras. De esta forma descubrió que Londres era más cálido que su periferia. El resultado de sus investigaciones indicaría diferencias notables, tal y como afirma Luke Howard, «La ciudad es 2,2°C (3,7°F) más cálida durante las noches y 0,2°C (0,34°F) más fría durante el día que su periferia rural». Y estableció que la causa era el uso excesivo de combustibles.

Unos años más tarde, en 1855, Emilien Renou (1815–1902) encontró resultados similares en la ciudad de París, calculando diferencias entre las temperaturas urbanas y rurales de 1°C a 2°C. No obstante, en 1868 cuestionó sus primeras comparaciones al detectar problemas en la localización de las estaciones. Pese a ello ratifica: «Es evidente que la diferencia de temperatura entre el campo y la ciudad a la misma altura es de aproximadamente 1°C», y también señala que existe un almacenamiento de calor en las ciudades que se incrementa con la extensión espacial de la mancha urbana. Renou es el primero que distingue las condiciones sinópticas propicias para que dicha diferencia térmica sea más amplia, afirmando que «es más marcado durante las noches más frías del año, con cielo despejado, vientos débiles y una leve neblina». Finalmente, constata que la

velocidad de los vientos en el centro de la ciudad son menos intensos que en su alrededor.

Por su parte, el climatólogo germano Hann (1897 y 1908; en Moreno, 1993 y López Gómez *et al.*, 1993) observó diferencias térmicas entre la urbe y su entorno rural, fenómeno que designó como «*stadttemperatur*» o «temperatura urbana», midiendo diferencias entre 0,4 °C y 1,1 °C entre el centro de la ciudad y su periferia suburbana.

2.3. El método de los transectos en Climatología urbana

A finales de la década de 1920 y comienzos de la siguiente se produce desde el punto de vista metodológico un decisivo avance en la Climatología urbana con la puesta en marcha de las campañas de medición de variables climáticas a través de vehículos motorizados. Este método, más conocido como el de los transectos, tiene como objetivo multiplicar las observaciones y responder así a la necesidad de conocer de manera más detallada espacialmente, las variaciones climáticas que la ciudad produce en el clima local. Consiste en realizar recorridos que atraviesan la ciudad y su entorno, durante los cuales se mide la temperatura, la humedad y el viento, de forma cuasi-simultáneas, y a continuación comparar los resultados y graficarlos mediante mapas de isotermas y otras isolíneas. Esta contribución metodológica se debe al alemán Wilhelm Schmidt (1883–1936), quien en 1927 utilizó este método para el estudio del clima de la ciudad de Viena (en Moreno, 1993). Incluso se han utilizado líneas de trenes para medir las temperaturas, tal como el caso de Tokio (Yamashita, 1996), que generó información a lo largo de las 16 líneas de tren. A partir de ahí, los avances tecnológicos han permitido mejorar las mediciones con sensores de baja inercia y lograr así registros más adecuados.

No obstante, en la aplicación del método siempre existe la dificultad de la simultaneidad de las mediciones, lo cual fue advertido por Wilhelm Schmidt, que se sirvió de estaciones meteorológicas fijas para la corrección de sus transectos. En dicho sentido, la mayoría de los autores coincide en que en un período de tiempo de una hora se pueden hallar temperaturas comparables. Entre las adiciones metodológicas está el realizar transectos que midan más de una vez en el mismo lugar y al inicio y fin de los recorridos. Se consideran mediciones válidas y cuasi-simultáneas las que no difieren en más de 0,5°C. Además, es conveniente la selección de puntos que correspondan a lugares que posean a priori un comportamiento climático particular y que, por ello, sean de interés.

En el diseño de los transectos también existen sugerencias para alcanzar mejores resultados; el más recomendado es el que posee forma de «tela de araña». El principal ejemplo de ello es el propuesto para Londres en la figura 2.1.

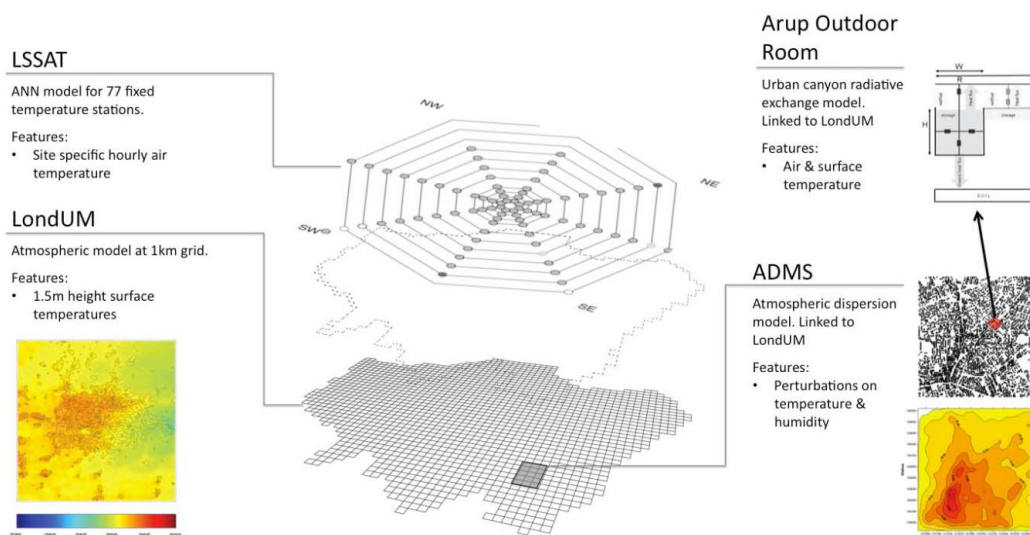


Figura 2.1. Método de los transectos aplicados en Londres siguiendo el patrón de tela de araña².

² International Association for Urban Climate, ISSUE n°36, June 2010. pp. 14
<http://www.urban-climate.org/IAUC036.pdf>

2.4. La consolidación de la Climatología urbana

Los avances alcanzados en el estudio del clima de la ciudad se consolidan a partir de la primera mitad del siglo XX. En 1937, Albert Kratzer publica la primera obra general sobre clima urbano, titulada *Das Stadtklima*. En ella, Kratzer señala que el clima de la ciudad se puede abordar desde tres perspectivas:

- i. El clima de la ciudad como un todo unificado: su influencia en la formación vapor y de aerosoles, en los factores de la radiación, en la duración del día, en el viento, las precipitaciones, y el aumento de la temperatura con el tamaño de la ciudad.
- ii. El clima de partes específicas de la ciudad: en el CBD, áreas residenciales, zona industrial, zonas de mayor o menor tráfico rodado, centro de la ciudad y la periferia.
- iii. El clima de las calles específicas de acuerdo a su orientación con respecto al sol y al viento, de acuerdo a su anchura, la ubicación de plazas y parques. Cada calle tiene su propio clima, particularmente en cuanto a la temperatura.

Kratzer (1937, página 69), citando la obra de Luke Howard, señala que este atribuye las diferencias térmicas entre la ciudad y su periferia, las cuales son:

1. Radiación solar: las áreas rurales por su baja rugosidad devuelve rápidamente la radiación solar al cielo, mientras que la ciudad la deja atrapada entre las viviendas
2. Viento: las áreas rurales son accesibles incluso a vientos suaves que refrescan el aire, mientras que las ciudades los interfieren el incluso, bloquean.

3. Humedad: la humedad en áreas rurales es almacenada por los suelos, e interactúa con la atmósfera, mientras que las áreas urbanas carecen de humedad, pues la evacua rápidamente por sus sistemas de drenaje.

Tras la Segunda Guerra Mundial aparece el término «*urban heat island*» o «isla de calor urbana o ICU» (UHI en sus siglas en inglés), contribución que debemos a Mandey (1958), por ser quien introdujo el término en un estudio donde analizaba la frecuencia de días de nieve en Metrópolis de Inglaterra, señalando que en la relación entre la isla de calor y día de nieve no se puede encontrar relación, pues las nevadas son importantes en días de viento, justamente cuando el efecto de isla de calor se ve disminuido. A partir de ahí, el término de isla de calor ha sido utilizado por todos los autores que se refieren al clima de la ciudad.

En 1965, se da a conocer la obra de Tony Chandler (1928–2008) sobre el clima de Londres, obra que constituye todo un hito en la Climatología urbana y el punto de partida para la mayoría de las investigaciones sobre clima urbano (Moreno, 1993), por ser el primer estudio climático en detalle sobre una ciudad. Además de hacer hincapié en las diferencias térmicas, observó que dicho fenómeno implica también una diferencia de humedad en sentido inverso. En otras palabras, lo que configura la isla de calor genera a la vez una isla de sequedad (Carreras *et al.*, 1990).

El descubrimiento de este doble fenómeno climático, junto con la publicación de los primeros trabajos generales sobre el clima urbano, así como la celebración en 1968 de un simposio internacional sobre climas urbanos, promovido por la WMO (1970), impulsó las investigaciones de Climatología urbana, centradas sobre todo en el reconocimiento de la isla de calor en distintas ciudades. Uno de los primeros y muy geográfico es el estudio de Lawrence (1971) que analiza para

algunas ciudades inglesas el día de la semana en que la ICU es más intensa, llegando a la conclusión que en los miércoles y martes la isla de calor es mayor. Para ello Lawrence numera los días de 0 a 6, donde cero es domingo, 1 lunes, 2 martes, etc., obteniendo la expresión $Y = 1,238 - 0,1 \sin((360\tau - 692) \div 7)$, donde «Y» es la intensidad de la isla de calor según el día de la semana y « τ » representa el día.

Desde el punto de vista de la teoría y la metodología en el estudio del clima urbano, son importantes las contribuciones de Oke (1973) y Lowry (1977). Por un lado, Oke diseña los primeros modelos explicativos de la intensidad de la isla de calor basados en los tamaños poblacionales de las ciudades. Por su parte, son también interesantes los trabajos de Lowry porque resuelve el problema metodológico de calcular la contribución real de la ciudad en el clima local. Lowry se basa en que existían dudas entre los climatólogos respecto a las estimaciones de los efectos locales y regionales de la ciudad sobre el clima, aunque todos concuerdan en que sí alteran las variables meteorológicas. Por lo tanto, él enuncia un marco de discusión sobre las estimaciones de las diferencias entre el medio urbano y rural circundante. El autor recomendó que se realicen análisis temporales, distinguiendo para los mismos sitios condiciones de usos de suelo urbanos y pre-urbanos, tanto en el centro y en la periferia, tal como se observa en la figura 2.2.

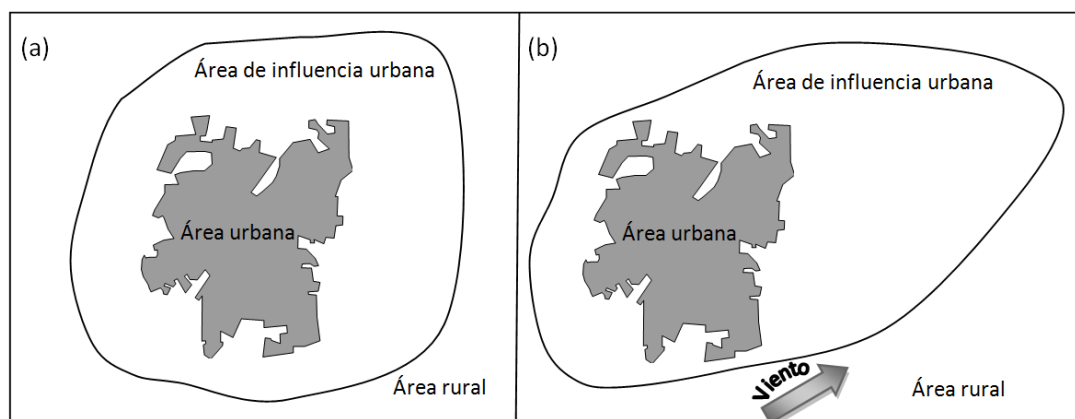


Figura 2.2. Relaciones hipotéticas entre las áreas urbanas, de influencia urbana y rural. En el caso (a) para las configuraciones de tiempo habituales. En el caso (b) para un tipo de tiempo advectivo y con efecto a sotavento. Fuente: Lowry, 1977 (modificado)

El desarrollo de las ecuaciones que propone Lowry es el siguiente:

$$M_{i,t,x} = C_{i,t,x} + L_{i,t,x} + U_{i,t,x} \quad (1)$$

Dónde

$M_{i,t,x}$ es el valor de la variable meteorológica bajo las condiciones sinópticas i , en el tiempo t y en la localización x .

$C_{i,t,x}$ representa el clima regional bajo las condiciones sinópticas i , en el tiempo t y en la localización x .

$L_{i,t,x}$ es la diferencia introducida por la localización (cuerpos de agua, topografía, etc.) bajo las condiciones sinópticas i , en el tiempo t y en la localización x .

$U_{i,t,x}$ es la alteración producida por la urbanización bajo las condiciones sinópticas i , en el tiempo t y en la localización x .

En la ecuación 1, sólo M es un valor conocido. La dificultad estaba en estimar los otros valores. Para ello, Lowry propuso el análisis temporal. M en el tiempo cero (M_0) con $U=0$ (sin efecto urbano), usando las series de tiempo, y M pasado un tiempo (M_t). Asumiendo L y C invariables, obtenemos el efecto de U .

$$M_t = C + L + U \quad (2)$$

$$M_0 = C + L + 0 \quad (3)$$

En este esquema, la alteración producida por la urbanización (U) sólo se conoce en el tiempo cero, es decir, cuando no había ciudad.

$$U = M_u - M_r \quad (4)$$

Debido a la dificultad de hacer cero la alteración urbana (U) en el tiempo, se opta por seleccionar dos observatorios (uno urbano y otro rural) con idéntico clima regional (C) y características de localización (L), es decir, altura, distancia a fuentes húmedas, etc. en área urbana y rural. Por lo tanto, si:

$$M_u = C + L_u + U \quad (5) \quad M_u, \text{ es la variable meteorológica medida en un área urbana,}$$

$$M_r = C + L_r \quad (6) \quad M_r \text{ es la variable meteorológica medida en un área rural. } L_u$$

$$L_u = L_r \quad (7) \quad \text{y } L_r, \text{ localizaciones comparables de los observatorios, queda:}$$

$$M_u - M_r = U \quad (8)$$

Otro importante avance es la representación que postula Oke (1987) del clima bajo la capa límite planetaria (*boundary layer climate*), donde encontramos concretamente la capa límite urbana (*urban boundary layer*). En la figura 2.3 y la tabla 2.1, se pueden observar su esquema de la capa límite urbana y las áreas climáticas existentes en el interior de la ciudad.

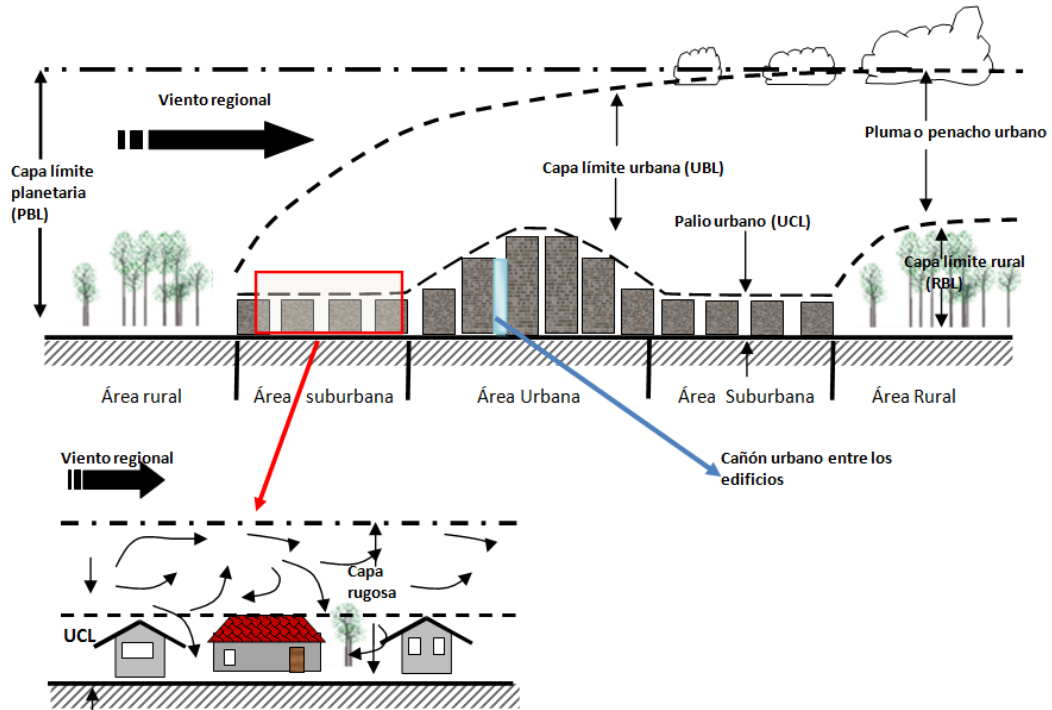









Figura 2.3. Esquema de las escalas climáticas y de las capas aerológicas verticales donde se encuentran los efectos de modificación de las áreas urbanas. Fuente: Oke, 1997 (modificada)

Tabla 2.1. Áreas climáticas urbanas.

Áreas Climáticas Urbanas ACU ¹	Representación	Nivel de rugosidad ²	Relación aspecto ³	% de suelo impermeable ⁴
1. Intenso desarrollo urbano, con edificios altos y muy cercanos entre sí, por ejemplo en el distrito central de negocios (CBD).		8	>2	>90
2. Intenso desarrollo, de alta densidad urbana con viviendas de altura de 2 a 5 pisos, adosados y con edificios más altos cercanos. Abundan las construcciones de ladrillo y concreto, como en el casco antiguo de la ciudad.		7	1,25–2,5	>85
3. Alto desarrollo urbano, con densidades medias, existencia de casas adosadas de un piso y apartamentos pequeños		7	0,5–1,5	70
4. Alto desarrollo urbano y bajas densidades. Coexisten viviendas, centros comerciales, almacenes y grandes estacionamientos pavimentados.		5	0,05–0,2	75–95
5. Desarrollo urbano medio, densidad suburbana, con casas de 1 o 2 pisos.		6	0,2–0,5	35–65
6. Utilización mixta del territorio, con grandes edificios y vastas áreas libres. Existen por ejemplo, instituciones como el hospital, la universidad y el aeropuerto.		5	0,1–0,5	<40
7. Desarrollo semi-rural con casas dispersas entre usos agrícolas, naturales y semi-naturales.		4	> 0,05	<10

Fuente: Oke 2004 traducido por el autor.

1: Conjunto simplificado de clases que incluye aspectos del régimen de Ellefsen (1990/91), así como medidas físicas relativas al viento, temperatura y humedad

2: Rugosidad del terreno efectiva de acuerdo a la clasificación Davenport (Davenport *et al.*, 2000).

3: Relación de aspecto = ZH / W . Donde ZH es Altura de los edificios y W es el ancho de las calles. El valor se distorsiona con la presencia de árboles que reduzcan la visión del cielo entre las calles.

4: Fracción de terreno impermeable por las características de construcción (edificios, carreteras, áreas impermeables pavimentadas y otras)

En el desarrollo teórico-metodológico deberemos referirnos también a que las investigaciones coinciden en que existen variables que permiten estimar con mayor exactitud las temperaturas. El factor de visión del cielo (SVF) es la variable más representativa de las influencias del trazado de las calles y morfología edificada. Este factor es fundamental en la formación e intensidad de la isla de calor, debido a que un SVF bajo, reduce las pérdidas de radiación infrarroja (emitida por la superficie) durante la noche. En este sentido, Fernández (1996) señala que los procesos climáticos urbanos son realmente complejos, pues de día un SVF bajo impide la insolación de la superficie y su calentamiento (índice de estrechez al decir de Landsberg), y por las noches reduce las pérdidas de la radiación infrarroja emitida y, en definitiva, contribuye a la formación de la isla de calor, como se pone de manifiesto en la mayoría de los estudios realizados. Eliasson (1994), refiriéndose a la ciudad de Göteborg (Suecia), correlaciona la temperatura del suelo y la del aire medidas en el centro de una calle, una esquena y en una plaza, con el SVF; sus resultados indican una estrecha dependencia entre el factor de visión del cielo y la temperatura del suelo y una baja correlación entre el SVF y la temperatura del aire. A modo ilustrativo, se presenta la forma de cálculo del SVF en la figura 2. 4 y en la figura 2.5 sus efectos sobre la máxima intensidad de la isla de calor.

	<p>Factor de visión del cielo (SVF) o ψ es: $\psi = \cos[\tan^{-1} 2H/W]$ $\psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 16/16]$ $\psi = \cos[\tan^{-1} 2]$ $\psi = \cos[1,107]$ $a = \text{Grados } [\tan^{-1} 2H/W]$ $\psi = 0,45$ $a = 63,4^\circ = 1,107\text{rad}$</p>
	<p>$\psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 8/16]$ $\psi = \cos[\tan^{-1} 1]$ $\psi = \cos[0,785]$ $a = \text{Grados } [0,785]$ $\psi = 0,71$ $a = 45^\circ = 0,785\text{rad}$</p>
	<p>$\psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 4/16]$ $\psi = \cos[\tan^{-1} 0,5]$ $\psi = \cos[0,463]$ $a = \text{Grados } [0,463]$ $\psi = 0,89$ $a = 26,6^\circ = 0,463\text{rad}$</p>
<p>H es 6, ya que es el promedio de 4 y 8</p>	<p>$\psi = \cos[\tan^{-1} 2 \cdot 6/16]$ $\psi = \cos[\tan^{-1} 0,75]$ $\psi = \cos[0,643]$ $a = \text{Grados } [0,643]$ $\psi = 0,80$ $a = 36,9^\circ = 0,643\text{rad}$</p>

Figura 2.4. Ejemplos del cálculo del SVF. Elaboración propia en base a Bonan, 2002.

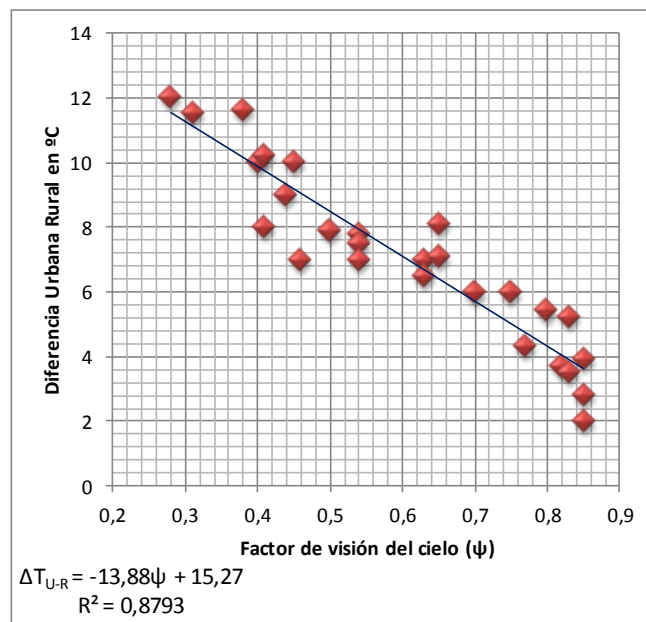


Figura 2.5. Relación entre el SVF y la máxima diferencia de temperatura urbana-rural, con datos de 29 ciudades de Canadá, los Estados Unidos y Europa. Elaboración propia en base a Oke 1987 y Bonan 2002.

2.5. La Climatología urbana y la teledetección

En el estudio del clima urbano de los últimos 30 años, quizás la aportación más novedosa corresponde a la percepción remota, concretamente al uso de imágenes de satélite. Estas imágenes registran, además del espectro visible, longitudes de ondas de las regiones del infrarrojo. Entre sus grandes ventajas se debe mencionar la visión global, la observación multiescalar, la frecuente cobertura (seguimiento), la homogeneidad en la adquisición, la posibilidad de captar zonas del espectro electromagnético invisibles al ojo humano y su formato digital (Chuvienco, 2002). No obstante, el uso de imágenes de satélite también posee inconvenientes, entre los cuales destacamos la calibración, la nubosidad (condiciones de la atmósfera), la frecuencia en la adquisición (cada cierta cantidad de días y horas) y las resoluciones espaciales y espectrales que poseen.

En Climatología regional las imágenes captadas por satélites geoestacionarios poseen una gran cobertura espacial y una alta frecuencia de captación (varias veces al día). No obstante, son deficientes para el estudio del clima urbano por su escasa resolución espacial, que alcanza a lo sumo, cuatro kilómetros en las bandas infrarrojas. Los satélites de órbita polar ofrecen, por el contrario, alta resolución espacial, aunque menor frecuencia de captación.

Según Curran (1985), existen además de la emisividad, cuatro propiedades térmicas importantes de las superficies que pueden ser detectadas mediante sensores remotos:

1. Capacidad térmica (c) o calor específico, que es una medida del potencial de un objeto para almacenar calor. Por ejemplo, el agua tiene una alta capacidad térmica y puede acumular más calor que la vegetación o el suelo.

2. Conductividad térmica (k), que mide el ritmo al que se transmite el calor en una cubierta o material. Las áreas urbanas son buenas conductoras de calor, muy al contrario de las cubiertas rurales y naturales, que se resisten más a esta transferencia.
3. Difusividad térmica (K), que es una medida de la velocidad (o ritmo) de variación de la temperatura dentro de un volumen de material. En general, las superficies secas difunden los cambios de temperatura hacia abajo, y a una velocidad menor que las superficies húmedas.
4. Inercia térmica (P), que es una medida del grado de respuesta térmica (o resistencia) de un material a los cambios de temperatura.

Las cuatro propiedades térmicas se pueden ejemplificar para distintas cubiertas terrestres, tal como se observa en la tabla 2.2. El suelo urbano posee una media alta inercia térmica, por lo que se enfría y calienta lentamente, y sus velocidades (difusividad térmica) de cambio son muy bajas.

Tabla 2.2. Propiedades térmicas de distintas cubiertas.

Tipo de cubierta	Capacidad térmica	Conductividad térmica	Difusividad térmica	Inercia térmica
Vegetación	7	1	9	9
Suelo seco	3	3	3	3
Suelo húmedo	3	3	3	9
Agua	9	1	9	9
Suelo urbano	3	9	1	7

Fuente: Elaboración propia en base a Curran, 1985 (1 es baja, 3 es medio-baja, 7 es medio alta y 9 es alta)

Para estudios de Climatología urbana lo más común es el empleo de las imágenes Landsat TM y Terra ASTER, que poseen altas resoluciones espaciales (entre unos 120 y 90 m). El inconveniente de estas imágenes es la frecuencia temporal y la hora de paso de las plataformas. Otras alternativas más costosas son

la contratación y panificación de vuelos con aviones equipados con radiómetros térmicos, pero el inconveniente que tienen es el acotado alcance temporal del estudio.

En comparación con las posibles alternativas, tales como Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (Terra ASTER), Landsat Thematic Mapper (Landsat TM) y Landsat Thematic Mapper Plus (Landsat ETM+), el producto Terra MODIS se considera de moderada resolución espacial (~1 km). Sin embargo, la alta resolución temporal (~12 h) de MODIS lo hace ideal para los estudios de la ICUs (Tomlinson *et al.*, 2012). En comparación, el número de imágenes disponibles de Terra ASTER y Landsat es significativamente menor que de MODIS. Además, este último pasa de noche, lo cual es una ventaja notable frente a otros sensores.

Voogt y Oke (2003) revisaron los diferentes estudios existentes de clima urbano sobre la base de las técnicas de la teledetección, y emplearon algunos términos que adoptaría la Climatología urbana. En el momento en que Voogt y Oke escribieron su artículo, el sensor Terra MODIS había estado activo por menos de dos años, y por lo tanto no lo mencionaron como un instrumento de uso común en Climatología urbana. Sin embargo, desde entonces, la NASA ha recogido 8 años de imágenes Terra MODIS, y estos productos han sido explotados para diferentes aplicaciones climáticas (Jin *et al.*, 2005).

Las imágenes Terra MODIS pueden ahora detectar la temperatura en la superficie de la Tierra y las condiciones de la atmósfera que son modificadas por el entorno urbano (Jin y Shepherd, 2005; Hung *et al.*, 2006), lo que las convierte en un instrumento muy potente para la Climatología urbana (Cheval y Dumitrescu, 2009)

Las imágenes de satélite registran la situación de un momento dado, y de ellas se deriva la temperatura de emisión superficial. Pese a ello, existen algunos algoritmos que permiten transformarla en temperatura del aire. No obstante, se necesitan datos difíciles de adquirir y calcular, pero que con Terra MODIS han sido solucionados gracias a sus productos MOD11A1. Aun así, del uso de imágenes de satélite surge el concepto de «*surface urban heat island*» (SUHI o ICUs en castellano) para referirse a la mayor temperatura de la superficie de la ciudad respecto a su entorno inmediato, la cual es captada por sensores remotos, e igualmente que la ICU alcanza su máximo en el período nocturno.

Fue Rao (1972) quien aportó las primeras observaciones de la ICUs. Desde entonces, se han utilizado una amplia variedad de sensores remotos (satélites, aeronaves, en tierra) para realizar observaciones de las temperaturas de la superficie urbana que contribuyen al conocimiento de la ICUs. Hay ejemplos del año 1977 para las ciudades de Washington DC y Baltimore donde se muestra la isla de calor medida mediante sensores remotos, tal como recoge la figura 2.6.

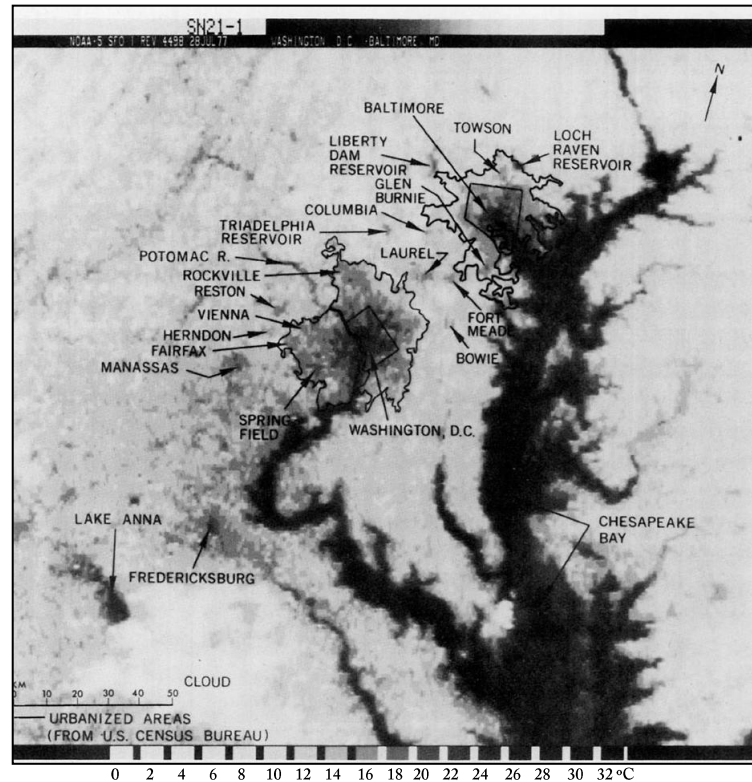


Figura 2.6. Imagen de las temperaturas superficiales, obtenida desde el sensor infrarrojo NOAA. El 28 de julio de 1977. Fuente: Matson *et al.* (1978)

Entre todos los estudios existentes sobre clima urbano a partir de imágenes de satélite destacan, los realizados por Lombardo (1985) con sensores NOAA para la ciudad de São Paulo y por Roth *et al.* (1989) utilizando el mismo sensor para el caso de tres ciudades costeras de Norteamérica. Posteriormente, aparecen los estudios de Carnahan y Larson (1990) que, usando imágenes Landsat TM diurnas, proponen el concepto «urban heat sink» (UHS) para referirse al hecho de unas temperaturas matutinas inversas a las de la isla de calor teórica en la ciudad de Indianápolis. Explican el fenómeno indicando que los materiales que componen las ciudades y las sombras que genera su rugosidad, hace que ellas se calienten lentamente. También destacan las aportaciones de Nichol (1996), quien encontró altas correlaciones entre las temperaturas del aire y del suelo en la ciudad de Singapur.

Por otra parte, Voogt y Oke (1997) señalan que el uso de sensores remotos debe ser complementado con mediciones en terreno para conocer lo que ellos denominan «la temperatura urbana completa», tal y como se deduce de la figura 2.7. Así, concluyen que los sensores remotos captan a vista de ojo de pájaro las temperaturas urbanas (figura 2.7D).

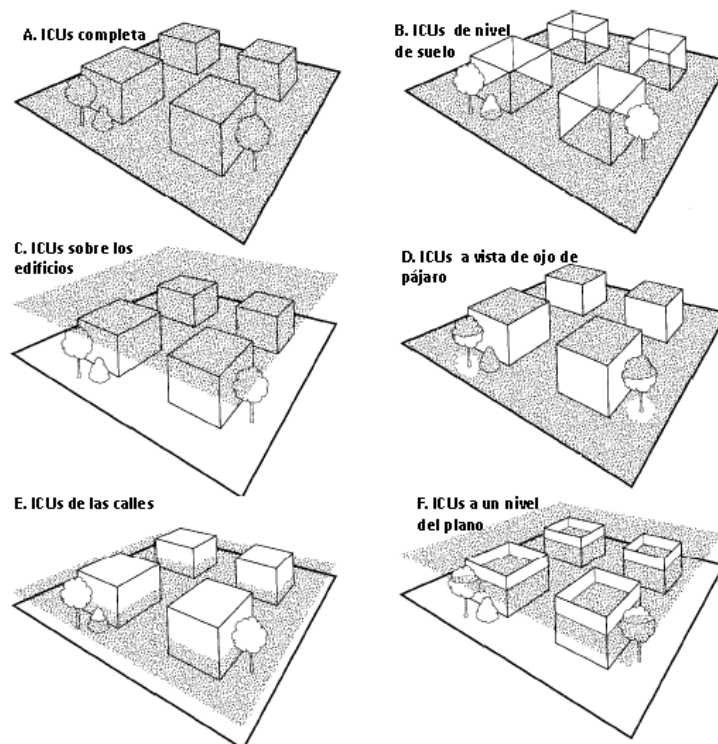


Figura 2.7. Esquemas de las temperaturas superficiales. Fuente: Voogt y Oke, 1997 (modificado)

A comienzos del siglo XXI, el número de publicaciones referidas a la Climatología urbana utilizando imágenes de satélite se incrementó, pero en muchos casos con resultados descriptivos y de correlaciones simples (Voogt y Oke, 2003). Además, en los últimos años ha aumentado la variedad de imágenes de satélite nocturnas de alta resolución (Terra ASTER), siendo una de las primeras experiencias, la llevada a cabo en Japón por Kato y Yamaguchi (2005). De tal modo, y con las aportaciones de Oke, Voogt y otros autores, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha establecido algunas

características comparativas entre los fenómenos de las islas de calor de superficie y atmosférica, algo que podemos observar en la tabla 2.3 y la figura 2.8.

Tabla 2.3. Características comparadas entre las islas de calor urbanas de superficie y atmosféricas.

Características	Isla de calor urbana de superficie (ICUs)	Isla de calor urbana atmosférica (ICU)
Desarrollo temporal	Presente en el día y en la noche Más intensa en los días de verano	Pequeña o inexistente durante el día Más intensa en las noches de invierno
Máxima intensidad	Más variación espacial y temporal Día: 10 a 15°C Noche: 5 a 10°C	Menos variación espacial y temporal Día: -1 a 3°C Noche: 7 a 12°C
Método típico para su estudio	Mediciones indirectas usando sensores remotos	Mediciones directas utilizando estaciones meteorológicas fijas y transectos móviles
Representación gráfica típica	Imagen térmica	Mapa de isotermas y gráficos de temperatura

Fuente: Elaboración propia en base a la EPA (compendio sobre la isla de calor urbana)

De la tabla 2.3 se desprende que las ICUs son más intensas en verano y se pueden manifestar tanto en el día como en la noche, con magnitudes entre 5°C a 15°C. Además, existen altas correlaciones espaciales entre las islas de calor de superficie y del aire (Arnfield, 2003) durante el período nocturno (figura 2.8).

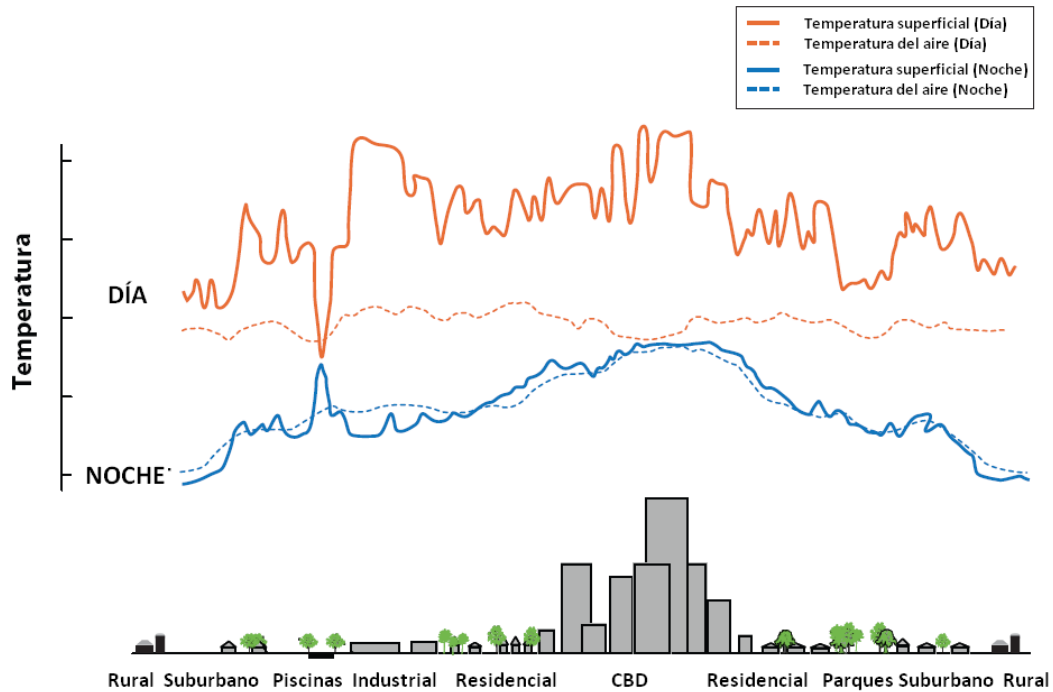


Figura 2.8. Relaciones entre las ICU de superficie y atmosféricas. Fuente: Elaboración propia en base a la EPA (compendio sobre la isla de calor urbana)

La figura 2.8 evidencia:

- 1) Altas correlaciones entre las temperaturas superficiales y del aire durante la noche (tanto en magnitud como distribución), con excepción de los cuerpos de agua (piscinas, lagos o ríos)
- 2) El casi nulo (e incluso negativo) efecto de ICU en el día,
- 3) Un marcado efecto de la ICUs durante el día, muy sometida a las superficies construidas y con dos núcleos, el centro de la ciudad y las zonas industriales periféricas, algo que ocurre por las tardes.

2.6. Aportaciones de la Climatología urbana a la planificación territorial y la gestión ambiental

La planificación territorial y la gestión ambiental deben tenerse en cuenta en los estudios de Climatología urbana, tal cual han enunciado autores como Oke (1987) y Eliasson (2000). Ahora bien, desde el punto de vista de dichas disciplinas, sus postulados señalan que se puede intervenir el territorio a partir de instrumentos y herramientas legales y técnicas, siempre que ello permita, entre otras cosas, mantener, potenciar y revertir situaciones en el espacio, en este caso urbano, de conformidad con los buenos suelos, el interés y la equidad social y la sostenibilidad ambiental.

El hombre siempre se ha adaptado a las condiciones que ofrece el clima. Sobre ello Golany (1996), estudiando las antiguas ciudades, halló que los techos de sus edificios poseían diferentes morfologías según la latitud en que se localizaban (figura 2.9a). Las ciudades modernas no seguían el mismo patrón y el avance de las técnicas de la construcción permitió el surgimiento de edificios de mayor altura, que cambiaron drásticamente la rugosidad del terreno (figura 2.9b), así como también el uso de la vegetación para generar sombra en los entramados urbanos (figura 2.9c) y los vientos (figura 2.10).

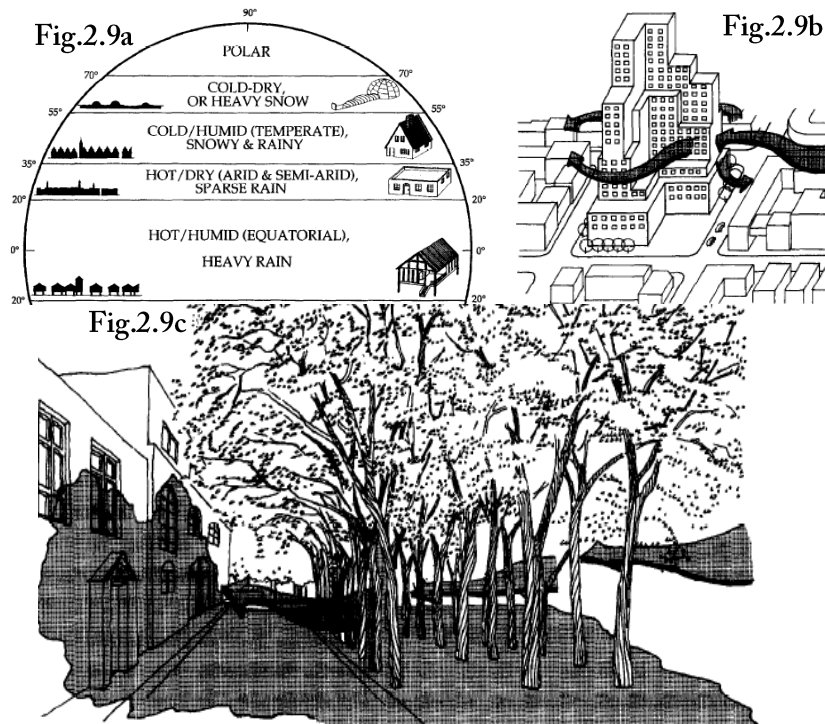


Figura 2.9. Diseños urbanos y sus efectos sobre la rugosidad y las sombras. Fuente: Golany, 1996.

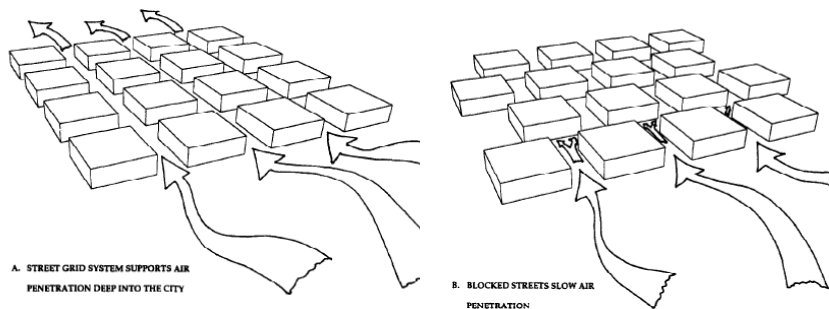


Figura 2.10. Diseños urbanos y sus efectos sobre los vientos. Fuente: Golany, 1996.

La figura 2.10 muestra de una manera muy esquemática cómo las calles pueden conducir y bloquear los flujos de los vientos en la horizontal. Desde el punto de vista de la insolación, de las trampas de radiación y del SVF, son interesantes las propuestas de Eliasson (2000) al mostrar los distintos SVF (figura 2.11) que se dan en las calles de una ciudad.

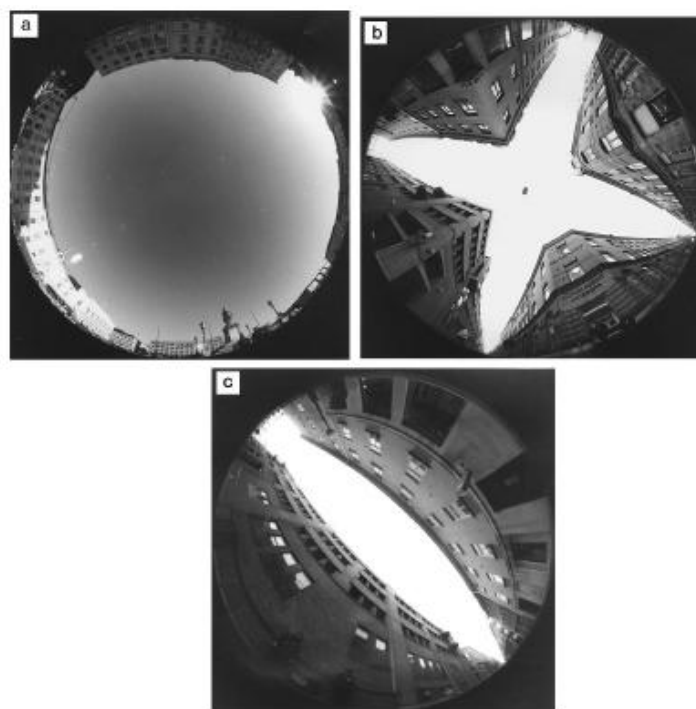


Figura 2.11. Diferentes efectos del diseño de las calles y los edificios en el valor del factor de visión de cielo.

Fuente: Eliasson, 2000. Muestra la importancia de la geometría de las calles y los edificios en los balances de radiación, pues ellos controlan las temperaturas en la ciudad y a su vez, tienen efectos sobre el consumo de energía y la ventilación de la ciudad. El SVF es una medida indirecta, y las fotografías muestran tres sitios, ubicados a una distancia de 200 m, en el centro de Gotemburgo

(Suecia). En una plaza (a) $SVF=0,93$; la esquina de unas calles (b) $SVF=0,47$ y en una calle encajonada (c) $SVF=0,29$.

Para conocer el efecto de las islas de calor, es primordial analizar su magnitud y los impactos que provocan sobre el clima. En dicho sentido, Landsberg (1981) señala generalidades de las modificaciones climáticas que ejercen las ciudades, lo cual se resume en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Alteración de algunos elementos del clima producidas por la ciudad, comparando sus efectos con su entorno rural.

	Elementos	La ciudad comparada con su entorno rural
Contaminantes:	Núcleos de condensación	10 veces más
	Partículas (polvo)	10 veces más
	Mezcla de gases	5 a 25 veces más
Radiación:	Radiación total sobre la superficie horizontal	0 a 20% menos
	Radiación ultravioleta (invierno)	30% menos
	Radiación ultravioleta (verano)	5% menos
	Duración de la insolación	5 a 15% menos

	Elementos	La ciudad comparada con su entorno rural
Nubosidad:	Nubes	5 a 10% más
	Bruma (invierno)	100% más
	Bruma (verano)	30% más
Precipitación:	Total	5 a 15% más
	Días con menos de 5 mm	10% más
	Nevadas en la ciudad	5–10% menos
	Nevadas a sotavento de la ciudad	10% más
	Tormentas	10 a 15% más
Temperatura:	Media anual	0,5 a 3,0°C más
	Media de las mínimas de invierno	1 a 2°C más
	Media de las máximas de verano	1 a 3°C más
	Grados-día de calefacción	10% menos
Humedad relativa:	Media anual	6% menos
	Invierno	2% menos
	Verano	8% menos
Velocidad del viento:	Media anual	20 a 30% menos
	Rachas máximas	10 a 20% menos
	Calmas	5 a 20% más

Fuente: Landsberg (1981, pág. 258).

A modo de síntesis, de la tabla anterior se concluye que la ciudad es más contaminada, nubosa, lluviosa y cálida que su entorno rural y posee menos radiación solar, viento y humedad relativa. No obstante, los totales de dichos elementos, pueden ser modificados a partir de la implementación de buenas prácticas urbanas y mediante instrumentos de planificación territorial.

La mayoría de investigadores (Eliasson, 2000) están de acuerdo en que a pesar del conocimiento acumulado sobre el clima de las ciudades y los buenos ejemplos aplicados en diseño urbano-climático, la consideración de la Climatología en el proceso de planificación urbana es muy baja (Oke, 1984; Pressman, 1996), tal como se observa en la figura 2.12. Eliasson se plantea dos cuestiones básicas para revertir esta situación: Mayor integración entre las consideraciones climáticas y la planificación territorial y, en segundo lugar, una adecuada y efectiva transferencia

de los resultados de la investigación científica en herramientas aplicables para la planificación urbana, lo cual constituye un gran desafío para los climatólogos urbanos. Es evidente que se han desarrollado herramientas fáciles de usar, como las de mitigación de la ICU (*Mitigation Impact Screening Tool*) implementadas por Sailor y Diestch (2007), con las que es posible estimar los impactos de cambios en el albedo y en las áreas verdes sobre las temperaturas, gasto energético y contaminación por ozono, lo cual está disponible para un número abundante de ciudades de los Estados Unidos.

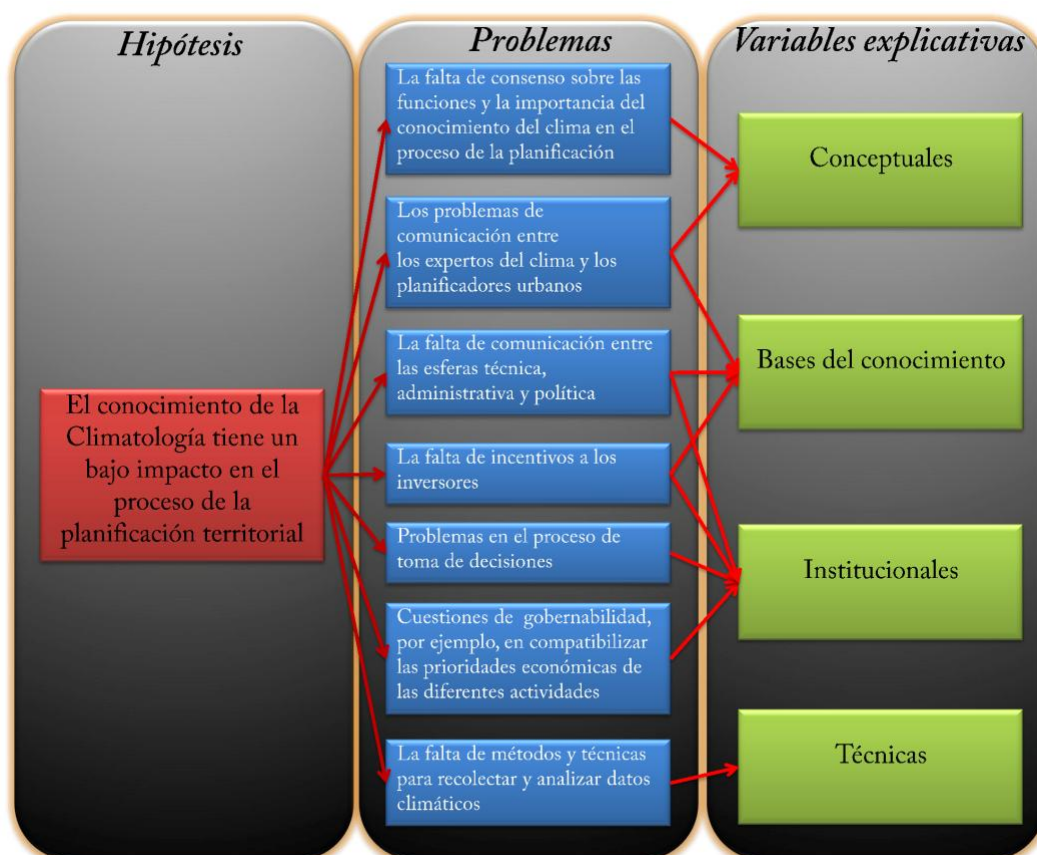


Figura 2.12. Hipótesis, problemas y variables explicativas de la relación entre Climatología y planificación territorial. Fuente: Eliasson 2000, traducido por el autor

Los resultados de Eliasson son producto de entrevistas a actores claves en la planificación urbana de Suecia. Detecta que el «Mercado» es una variable explicativa que no se había considerado *a priori*, y que influye fuertemente en la

producción de viviendas. Sus conclusiones señalan que se debe aumentar las competencias de los planificadores mediante herramientas y cursos de capacitación, sobretodo, ligados a la Climatología urbana, consiguiendo con ello, una comprensión más adecuada del conocimiento climático, fluidez y base conceptual común entre ellos. Además, a nivel gubernamental, esto repercute en una mayor capacidad institucional (ver Figura 2.13).

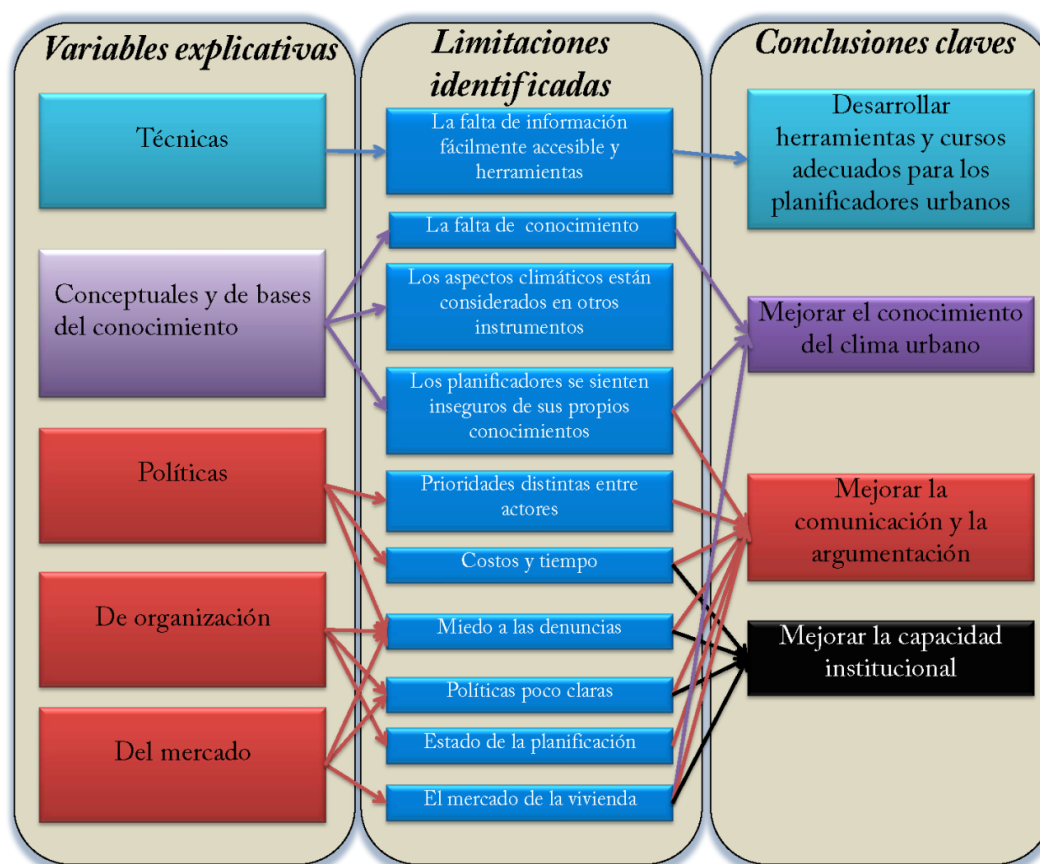


Figura 2.13. Variables, limitaciones y conclusiones claves encontradas para atender al problema de baja consideración de la Climatología en la planificación territorial.

Fuente: Eliasson 2000, traducido por el autor

En Chile la situación observada por Eliasson (2002) no es muy distinta, existiendo un único instrumento legal en materia de climatización de las

edificaciones, y que norma el confort térmico en el interior de la vivienda desde el año 2007³. Esto es un enorme avance, ya que regula el acondicionamiento térmico de las viviendas, fundamentalmente en el invierno. No obstante, se considera insuficiente, ya que no regula el acondicionamiento de las viviendas en época estival, justamente, cuando los efectos de la ICU pueden ser más perjudiciales para la salud humana.

En general, los autores coinciden en que las áreas verdes, los albedos, los materiales, las densidades de población, la altura de edificios y los anchos del viario son variables absolutamente controlables por el diseño urbano. No obstante, existen condiciones del clima regional que no se pueden controlar y que son propios del lugar. Podemos ver esto último en la figura 2.14, propuesta por Memon *et al.* (2008).

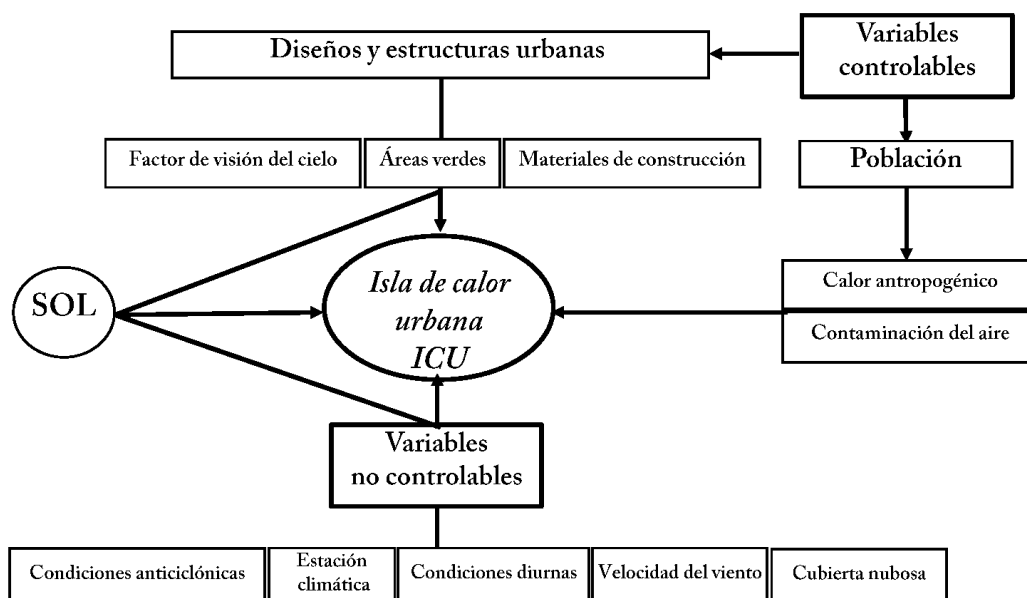


Figura 2.14. Esquema de las variables controlables y no controlables en el clima urbano y en la generación de la isla de calor. Fuente: Memon *et al.* (2008), traducido por el autor

³ Manual de aplicación de la Reglamentación térmica de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, Artículo 4.1.10. http://www.sodal.cl/files/1_Manual%20A%20R%20T.pdf

2.7. Bibliografía

Arnfield, J. (2003). Two Decades of Urban Climate Research: A Review of Turbulence, Exchanges of Energy and Water, and the Urban Heat Island. *International Journal of Climatology*, 1 (23), 1-26.

Bonan, G. (2002). *Ecological climatology: concepts and applications*. Cambridge University Press. England.

Carnahan, W., & Larson, R. (1990). An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment* (33), 65-71.

Carreras, C., Marín, J., Martín-Vide, J., Moreno, M., & Sabí, J. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la isla de calor de Barcelona. *Documents d'anàlisi Geogràfica. Universitat Autònoma de Barcelona* (17), 51-77.

Cheval, S., & Dumitrescu, A. (2009). The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 145-153.

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde la tierra*. Barcelona, España: Ariel Ciencia.

Curran, P. (1985). *Principles of remote sensing*. Longman Group Limited. London, England.

Davenport, A., Grimmond, C., Oke, T., & Wieringa, J. (2000). Estimating the roughness of cities and sheltered country. *12th AMS Conf. on applied Climatology*, (pp. 96-99). Asheville.

Eliasson, I. (2000). The use of climate knowledge in urban planning. *Landscape and Urban Planning* (48), 31-44.

Eliasson, I. (1994). Urban-suburban-rural air temperature differences related to street geometry. *Physical Geography* (15), 1-22.

Ellefsen, R. (1990/1991). Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy Build* (15-16), 1025-1049.

Fernández, F. (1996). *Manual de Climatología aplicada*. Madrid, España: Editorial Síntesis S.A.

Golany, G. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmos Environ* (30), 455-465.

Hung, T., Uchihama, D., Ochi, S., & Yasuoka, Y. (2006). Assessment with satellite data of the urban heat island effects in Asian mega cities. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8, 34-48.

Jim, M., & Shepherd, M. (2005). Inclusion of Urban Landscape in a Climate Model: How Can Satellite Data Help? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 681-689.

Jim, M., Dickinson, R., & Zhang, D. (2005). The footprint of urban areas on global climate as characterized by MODIS. *Journal of Climate*, 18, 1551-1565.

Kato, S., & Yamaguchi, Y. (2005). Analysis of urban heat island effect using ASTER and ETM+ data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment* (99), 44-54.

Kratzer, A. (1937). *Das Stadtklima*. Friedrich Vieweg and Sonhn, Braunschweig (1956).

Landsberg, H. (1981). *The Urban Climate* (First ed.). New York: Academic Press.

Lawrence, E. (1971). Urban climate and day of the week. *Atmospheric Environment*, 5, 935-948.

Lombardo, M. (1985). *Ilha de Calor nas Metr p les: o exemplo de S o Paulo*. S o Paulo: Hucitec.

López Gómez, A., Fernández, F., Arroyo, F., Martín-Vide, J., & Cuadrat, J. (1993). *El clima de las ciudades españolas*. Madrid: Impreso en Gr ficas R gar.

Lowry, W. (1977). Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. *Journal of Applied Meteorology* (36), 1377-1391.

Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* (84) 359: 70-72.

Matson, M., McClain, P., McGinnis, D., Pritchard, J. (1978). Satellite Detection of Urban Heat Islands. *Monthly Weather Review* (106), 1725-1734.

Memon, R., Leung, Y., & Chunho, L. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences* (20), 120-128.

Moreno, M. (1993). *Estudio del clima urbano de Barcelona: la isla de calor*. Vilassar de Mar: Oikos-tau.

Nichol, J. (1996). High resolution surface temperature patterns related to urban morphology in a tropical city: a satellite-based study. *Journal of Applied Meteorology* (35), 135-146.

Oke, T. (1987). *Boundary Layer Climates* (Second ed.). London: Routledge.

Oke, T. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment* (7), 769-779.

Oke, T. (2004). *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites*. WMO. Geneva: World Meteorological Organization.

Oke, T. (1984). Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings*, 7 (1), 1-10.

Oke, T., & Voogt, J. (1997). Complete urban surface temperatures. *Journal of Applied Meteorology*, 9 (36), 1117-1132.

Pressman, N. (1996). Sustainable winter cities: future directions for planning, policy and design. *Atmospheric environment*, 30 (3), 521-529.

Rao, P. (1972). Remote sensing of urban heat island from an environmental satellite. *Bulletin of American Meteorological Society* (53), 1554-1557.

Sailor, D., & Dietsch, N. The urban heat island Mitigation Impact Screening Tool (MIST). *Environmental Modelling & Software*, 22 (10), 1529-1541.

Tomlinson, C., Chapman, L., Thornes, J., & Baker, C. (2012). Derivation of Birmingham's summer surface urban heat island from MODIS satellite images. *International Journal of Climatology* (32) 214-224.

Voogt, J., & Oke, T. (2003). Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment* (86), 370-384.

Yamashita, S. (1996) Detailed structure of heat island phenomena from moving observations from electric tram-cars in metropolitan Tokyo. *Atmospheric environment* (30), 429-435.

Yuan, F., & Bauer, M. (2007). Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment* (106), 375-386.