

# 5

---

## **EVALUACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE LOS EFECTOS MICROCLIMÁTICOS DE LA VEGETACIÓN.**

## 5.1 INTRODUCCIÓN.

Una pauta de diseño podría definirse como una regla práctica, fruto de la experiencia y la investigación en un campo determinado. En el caso de este trabajo, las pautas de diseño que se describen, son el resultado de una investigación documental extensa, de la consulta personal a muchos especialistas en el tema y de las experiencias obtenidas tras haber analizado en campo, numerosos casos de estudio.

Para que estas pautas pudieran utilizarse en el mayor número de situaciones posibles, no se han estructurado según el tipo de clima, lo cual hubiese limitado mucho el ámbito de aplicación, se optó por elaborar unas pautas de acuerdo al elemento climático que se necesitará controlar, en terminos de resultados relativos.

Por ejemplo, tratándose de un clima templado y uno tropical, algunas de las pautas para el control de la radiación solar podrían ser aplicadas igualmente, ya que en ambos casos es necesario protegerse del sol en algún momento, por lo que la densidad del follaje y la forma de éste, pueden elegirse de la misma manera, no así la especie, dado que en climas templados podría requerirse soleamiento durante el invierno (especies caducifolias), en cambio en el trópico la protección se necesita todo el año (especies perennifolias).

Otro ejemplo es el control del viento, ya que la misma configuración espacial de un elemento que se utiliza en un caso para desviar el viento y proteger una zona durante el invierno, puede usarse en otro caso para encauzar la brisas y ventilar en la temporada cálida.

En la primera parte del capítulo se habla sobre el balance energético del microclima. A continuación se entra en lo que son las pautas para el control de la radiación, el viento la temperatura y la humedad. Finalmente se explican los procedimientos para estimar numéricamente la incidencia de los elementos climáticos sobre una persona u objeto en espacios exteriores y evaluar el grado de confort climático que se puede esperar, una vez aplicadas la pautas de diseño.

## 5.2 BALANCE ENERGÉTICO DEL ESPACIO MICROCLIMÁTICO.

Como ya se ha dicho, un microclima es el resultado de la interacción de los diversos elementos que constituyen un espacio urbano con el clima local. Hacer un balance de los flujos de energía producidos por esta interacción, puede ayudarnos a diseñar espacios que reúnan características climáticas específicas.

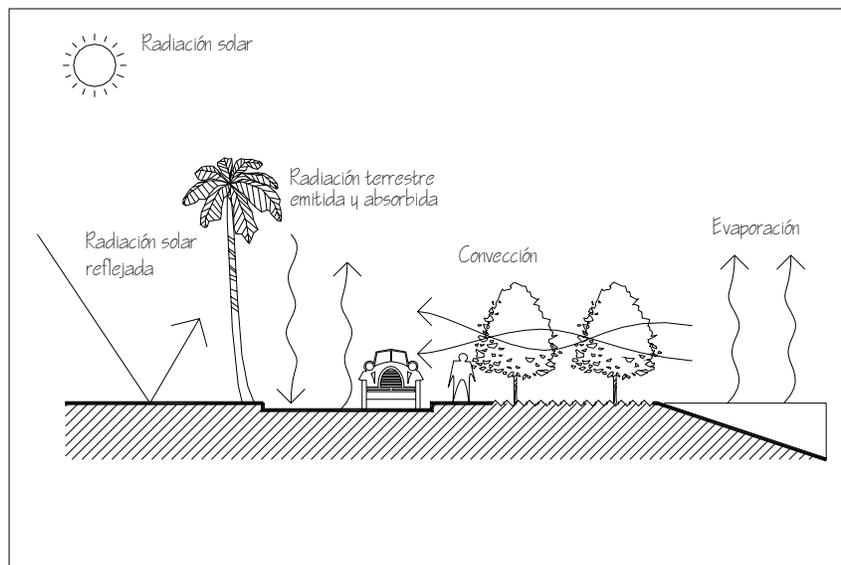


Figura 5.1 El balance energético de una superficie cualquiera, considera todos los flujos de energía hacia y desde la misma. Es útil tomar en cuenta las magnitudes de estos flujos en cada vía.

Un balance de este tipo, considera los principales *proveedores* (emisores) y *consumidores* (receptores) de energía dentro de un espacio : radiación de onda larga y corta, absorbida y reflejada, proveniente del sol, del cielo y de objetos circundantes ; conductividad de los límites del sistema, almacenamiento térmico, evaporación y calor cedido al aire por convección desde las distintas superficies y objetos del sitio, etcétera.

Un microclima estable se consigue solamente cuando los consumidores y proveedores de energía, están balanceados. El balance quedaría como sigue:

$$\text{Energía radiante suministrada} - \text{Evaporación} \pm \text{Radiación de onda larga emitida} \pm \text{Conducción} \pm \text{Convección} = 0$$

La figura 5.2 nos muestra los componentes del balance de energía para un día de verano. Hay que hacer notar que durante la noche los proveedores y los consumidores de energía, normalmente invierten sus papeles.

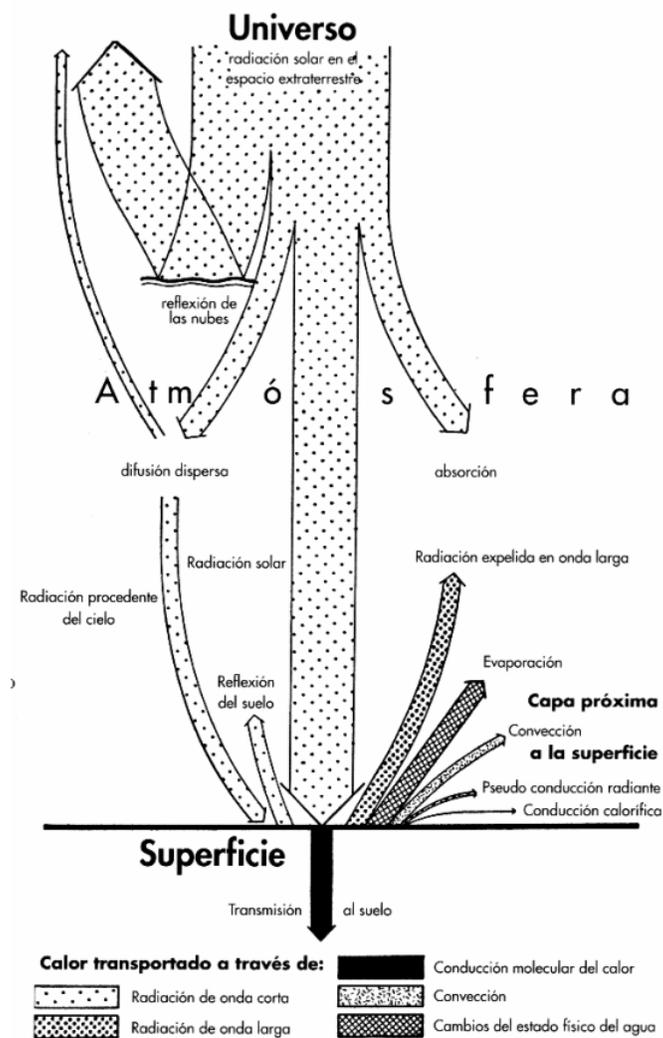


Figura 5.2 Distribución de energía para un día de verano. La intensidad del flujo está indicada por el grosor de las flechas(1).

Es posible influir fuertemente en los flujos de radiación, tanto de onda corta como larga que entran al sistema, introduciendo objetos que proyecten sombras. Éstos disminuirán la entrada de radiación solar interceptándola, pero podrían incrementar el flujo de radiación infrarroja, ya que la mayoría de los elementos sombreadores, incluyendo la vegetación, son mejores emisores de este tipo de radiación que el cielo.

Pero de cualquier manera el resultado final será una disminución neta del flujo entrante de energía radiante.

Otra manera de modificar este flujo, es manipulando adecuadamente los albedos (reflectancias) de las diversas superficies y elementos del sistema.

También se puede manipular la distribución de energía entre los distintos consumidores. Si algunos de éstos están más/menos restringidos, entonces mayor/menor energía fluirá hacia el resto de los consumidores. El principio de la distribución dice que es posible aumentar el consumo de algunos elementos, restringiendo las vías de energía hacia otros componentes del sistema.

Por ejemplo podríamos limitar la conducción de calor hasta ciertos estratos o bien prevenir la evaporación utilizando materiales impermeables, esto aumentará la temperatura superficial de algunos componentes del sistema y por lo tanto habrá más emisión de radiación infrarroja que podrían absorber otros elementos.

Si por el contrario elegimos materiales con alta conductividad que dejen pasar la energía hacia estratos más profundos y con mayor capacidad de almacenamiento térmico (la cual se liberaría en un lapso de tiempo mayor), o que sean altamente higroscópicos y permitan la evaporación de su contenido de humedad, disminuirán considerablemente las temperaturas superficiales y consecuentemente la radiación emitida.

Por otro lado también podemos influir en las pérdidas o ganancias por convección, introduciendo en el sistema elementos que disminuyan o encaucen las corrientes de aire dentro del sistema.

Finalmente cabe decir que, será necesario saber detectar y en su caso reconducir los flujos de energía dentro del espacio microclimático, de tal manera que los objetivos finales del diseño de un sistema, ya sean personas o edificios, puedan emitir o recibir la cantidad de energía adecuada a sus necesidades.

## 5.3 PAUTAS DE DISEÑO MICROCLIMÁTICO.

La ubicación la forma y los límites, normalmente son aspectos preexistentes del sistema, por lo que rara vez se podrán hacer actuaciones para modificarlos, salvo en el caso de proyectos de nuevas urbanizaciones, avenidas o plazas, en los que se parta casi de cero y por lo tanto haya que tomar decisiones sobre los diversos aspectos de diseño.

Pero lo más usual, es que el diseñador solo pueda actuar sobre los elementos que componen internamente el espacio urbano en cuestión, es decir:

1. Forma del terreno: creación de taludes, desniveles, etc.
2. Elementos construidos: pavimentos, muros, esculturas, rampas, escaleras, cubiertas etc.
3. Elementos acuáticos: fuentes, espejos de agua, canales, estanques, etc.
4. Elementos vegetales: arbolado en línea, arbolado en grupo, pérgolas y coberturas vegetales.

Las pautas de diseño que se expondrán a continuación tratarán principalmente los elementos vegetales, dado que es el tema principal de este trabajo, sin embargo como no dejan de ser importantes en el balance energético del sistema, los demás elementos se mencionarán aunque sea de forma muy breve.

### 5.3.1 CONTROL DE LA RADIACIÓN.

La radiación proveniente del sol “mueve” el clima sobre la Tierra y virtualmente es el “combustible” de casi cualquier microclima. La radiación solar también es uno de los factores principales cuando se trata de evaluar el confort humano o el comportamiento térmico de los edificios.

A pesar de su fuerte influencia, es uno de los elementos climáticos que puede ser modificado y controlado de manera más directa por los elementos vegetales a escala microclimática.

La principal fuente de radiación dentro del espacio urbano es la radiación solar, sin embargo no es la única dentro del balance, también se debe considerar la radiación

terrestre es decir la emitida por los objetos y superficies presentes en el paisaje urbano, desde luego esto no es más que una simplificación hecha para poder estudiar el fenómeno con mayor facilidad.

De la radiación que llega a la tierra proveniente del sol, una parte es reflejada por la nubes hacia el espacio exterior, otra absorbida por la atmósfera y otra más dispersada por el vapor de agua, partículas sólidas (aerosoles) y demás componentes atmosféricos. Finalmente sólo una pequeña parte, llega hasta la superficie terrestre (ver figura 5.2).

Esta radiación tiene dos componentes, la directa y la difusa. La componente directa es la que llega en línea recta desde el sol, debido a esto, mediante cálculos geométricos, es posible predecir su trayectoria en cualquier localidad y época del año; pero no su intensidad, esto dependerá de los factores climáticos y atmosféricos de cada sitio.

Lo que sí se puede afirmar es que en días despejados, es la componente más importante, en lo que a aporte energético se refiere.

Ya que como hemos visto, la radiación directa es un factor importante dentro del balance energético, será de mucha importancia hacer un estudio del soleamiento, según la ubicación, forma y orientación de la zona de estudio, antes que cualquier otra consideración.

La radiación difusa es el resultado de las múltiples reflexiones y dispersiones que sufre la radiación solar al atravesar la atmósfera; es anisotrópica, aunque viene prácticamente de cualquier dirección, predomina la proveniente de la bóveda celeste.

Energéticamente no es el componente más importante, aunque en días con cielo cubierto o semi cubierto puede llegar a serlo.

El otro tipo de radiación, como ya se mencionó, es la radiación terrestre. Por el contrario de la radiación solar, cuya parte más importante está dentro del espectro visible, la terrestre no se puede ver, ya que es infrarroja, lo cual la hace más difícil de controlar.

## **CONTROL DE LA RADIACIÓN SOLAR.**

La radiación que incide sobre los ocupantes y objetos en un espacio urbano, procede directamente del sol (directa y difusa) y de reflexiones de las superficies no sombreadas que componen dicho espacio.

### **a) Radiación Directa y Difusa.**

La protección de la radiación solar directa y difusa, se consigue mediante la obstrucción de ésta, colocando elementos vegetales sombreadores en la zona a proteger. Para lo cual se pueden establecer las siguientes acciones:

1. Incorporación de pantallas de sombra horizontales o verticales, según la altura solar.
2. Utilización de cubiertas de materiales constructivos (lona, madera, hormigón, uralita, etc.) en conjunto con las vegetales.

**Elementos vegetales.** Se elegirán de acuerdo al espacio de actuación :

- Para calles y paseos peatonales : arbolado en línea coberturas verticales y pérgolas.
- Para plazas : arbolado en línea, árboles en grupo coberturas verticales y pérgolas.

**Características de la vegetación.** Las más interesantes para este propósito son :

- Forma y disposición del follaje.
- Altura y diámetro máximos de crecimiento esperados.
- Tiempo que tarda en alcanzarlos.
- Transmitancia del follaje. para especies caducifolias, en invierno y verano.
- Fechas aproximada de foliación de las especies caducifolias.
- Exposición solar, cuando se forman varias capas o grupos.

**Configuración espacial** de los elementos vegetales :

- Alturas solares  $< 30^\circ$ , elementos que formen barreras verticales.
- Alturas solares  $> 30^\circ$ , elementos que formen barreras horizontales.
- La separación entre árboles se determinará según las dimensiones, forma y densidad del follaje.

- Para barreras verticales se seleccionarán árboles o arbustos, con follaje uniforme distribuido a lo largo del tronco.
- Para barreras horizontales, el follaje debe estar en la parte superior, la forma de éste no es tan importante, siempre y cuando el conjunto constituya una capa más o menos homogénea.
- Cuando se utilicen pérgolas, se puede disminuir su transmitancia utilizando dos o más capas de follaje, colocando una especie resistente al sol en la parte superior y especies de sombra en las capas inferiores.
- Las especies caducifolias se utilizarán en climas donde se requiera protección en verano y soleamiento en invierno.
- Las especies perennifolias, se utilizarán en climas o situaciones que necesiten protección en cualquier época.

## **b) Radiación Reflejada.**

Para la reducción de la radiación reflejada, se pueden establecer tres acciones diferentes :

1. Impedir que la radiación directa llegue hasta la superficie reflectora, incorporando elementos vegetales, horizontales de sombra, como arbolado en sus diferentes configuraciones o pérgolas.
2. Obstruir la reflexión ubicando elementos verticales de baja altura, como setos vegetales.
3. Actuar directamente sobre la superficie reflectora, mediante la introducción de una cobertura vegetal de bajo albedo, también puede ser una combinación de elementos vegetales y pétreos (ver tabla 5.1).

**Elementos vegetales.** Los elementos que se mencionan son válidos para plazas y calles.

- Como elementos de sombra : arbolado y pergolados.
- Como elementos antirreflejantes : coberturas vegetales y setos vegetales.

**Características de la vegetación** para las coberturas vegetales :

- Altura esperada.

- Velocidad de crecimiento.
- Transmitancia del follaje.
- Fechas aproximadas de foliación de las especies caducifolias.
- Exposición solar.
- Resistencia al tráfico.

**Configuración espacial** para coberturas vegetales y setos :

- Cuando se requiere que una superficie reciba el sol en invierno, por ejemplo la fachada de una casa, conviene usar especies caducifolias.
- En superficies transitables, es recomendable combinar superficies vegetales con materiales pétreos o pavimentos, hay que cuidar la proporción entre unos y otros y hacer un promedio de los albedos.
- Inclinación y orientación de la superficie.
- Dimensiones : Ly, Lx y área. En el caso de los setos, altura y espesor de la barrera.

## CONTROL DE LA RADIACIÓN TERRESTRE.

El control de la radiación terrestre se basa en el principio de que todos los cuerpos emiten radiación de acuerdo con su temperatura, la radiación emitida por un cuerpo ( $R_e$ ) se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$R_e = \sigma \cdot T^4 \cdot \epsilon$$

Donde  $T$  es la temperatura de la superficie del objeto en grados Kelvin,  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^2\text{K}^{-4}$ ),  $\epsilon$  es la emisividad del objeto, la cual está entorno a 0,9 para la mayoría de los objetos y materiales de los espacios urbanos, como se aprecia en la tabla 5.1.

Es evidente que las temperaturas superficiales de los objetos, son importantes a la hora de evaluar este parámetro, por lo que la mayoría de las estrategias estarán encaminadas a controlarlas.

Tipo de superficie	Albedo %	Emisividad %
--------------------	----------	--------------

<b>Suelos</b>	5-75	90-98
Húmedo oscuro cultivado	5-15	
Húmedo gris	10-20	
Seco arenoso	25-35	84-91
Húmedo arenoso	20-30	
Dunas de arena seca	30-75	
<b>Vegetación</b>	5-30	90-99
Césped	20-30	90-95
Campos verdes	3-15	
Campos de trigo	15-25	
Pradera	10-30	
Chaparral	15-20	
Pastizal	25-30	
Bosque mixto	5-20	
Caducifolias sin hojas	15	97
Caducifolias con hojas	20	98
Coníferas	5-16	97-98
Bosque pantanoso	12	97-99
<b>Agua</b>	5-95	92-97
Altura solar alta	5	92-97
Altura solar baja	95	92-97
Nieve fresca y limpia	70-95	99
Nieve vieja	40-70	82
<b>Superficies Urbanas</b>		
Asfalto	5-15	95
Hormigón	10-50	71-90
Ladrillo	20-50	90-92
Piedra	20-35	85-95
Pintura blanca	50-90	85-95
Pintura roja, verde, café	20-35	85-95
Pintura negra	2-15	90-98

Tabla 5.1. Propiedades radiantes de superficies encontradas frecuentemente en los espacios urbanos.

El control de las temperaturas superficiales y como consecuencia de las emisiones de radiación infrarroja tiene un triple objetivo:

- Mejorar las condiciones de confort de los ocupantes del espacio a tratar, aumentando o disminuyendo el intercambio de radiación de onda larga.
- Si controlamos la temperatura de la piel de un edificio, podremos controlar en parte su balance energético.
- También se puede modificar la temperatura del aire que entre en contacto con las superficies tratadas.

Para controlar las temperaturas superficiales se pueden establecer las siguientes acciones:

- Control del flujo de radiación solar hacia la superficie a tratar.* Si lo que se quiere es calentarla, se evitará colocar objetos sólidos opacos o elementos vegetales

que obstruyan los rayos solares. pero si lo que se desea es mantenerla fresca, se colocarán elementos vegetales de sombra.

En el análisis de los casos reales, se observó que las superficies sombreadas por la vegetación, permanecían de 30 a 40 °C más frías, que aquellas que estaban a pleno sol.

- *Implantación de coberturas vegetales.* Estas superficies mantienen su temperatura cercana a la del aire, tanto de día como de noche, por lo que resultan útiles como reguladoras del intercambio radiativo.
- *Irrigación.* Una superficie vegetal irrigada, si la humedad ambiental es baja, podría estar más fría que la temperatura del aire por el enfriamiento ecaporativo.
- *Albedos y almacenamiento térmico.* Si lo que se necesita es tener una superficie fresca, son mejores los materiales de color claro (albedo alto), por ejemplo un suelo de hormigón tiene un albedo de 30 - 50%.

Por el contrario, si se requiere un pavimento que capte el calor y lo almacene, se recomiendan materiales oscuros (albedo bajo) y gran masa térmica, por ejemplo el asfalto cuyo albedo es de 5-15%.

- *Combinación de elementos vegetales y materiales sólidos.* Con la utilización en conjunto de vegetación y materiales constructivos, se pueden desarrollar sistemas para el enfriamiento de las superficies, ya sea por evaporación (materiales higroscópicos) o conducción (materiales impermeables).

Por ejemplo un muro de contención hecho con material poroso, estará fresco al evaporarse el contenido de humedad proveniente del suelo. Si el mismo muro está hecho de un material impermeable, pero con alta conductividad, permanecerá fresco al estar en contacto con el suelo. La cubierta vegetal, en este caso, sirve para mantener el suelo húmedo y fresco.

En cuanto a los elementos vegetales, su configuración espacial y las características de la vegetación, serán los mismos en los descritos para el control de la radiación solar.

### **5.3.2 CONTROL DEL VIENTO.**

El viento es otro de los componentes del microclima que afecta a personas y edificios, que puede ser modificado significativamente por vegetación y barreras sólidas.

Es extremadamente variable, tanto en su dirección como en su velocidad. Esto se debe principalmente a las turbulencias, que están en función de la velocidad (entre más rápido es el movimiento, más grandes son), y de la rugosidad del terreno, (a mayor rugosidad, mayor turbulencia).

La mayoría de los objetos en el paisaje urbano, afectan al viento; algunos reducirán su velocidad o lo redireccionarán y otros podrían incrementarla. El viento también está influido por la orientación y la ubicación relativa del sitio.

Mientras que la radiación puede ser representada con bastante precisión mediante ecuaciones y modelos matemáticos, el viento sigue sin poder ser descrito adecuadamente de esta forma.

Básicamente existen tres métodos para entender el viento dentro de un espacio urbano :

El primero es a través de modelos a escala, en túneles de viento o canales de agua. Las condiciones son simuladas con la mayor precisión posible, aplicando factores de escala adecuados. Este método nos da la oportunidad de hacer modificaciones en nuestro modelo y ver directamente los efectos sobre el viento, sin embargo, se requiere de equipo que no siempre está accesible.

Un segundo método sería a través de simulaciones por ordenador. Durante los últimos años, se ha puesto mucho empeño en el desarrollo estos métodos, también llamados CFD (*Computational Fluid Dynamics*), para la predicción de flujos de aire dentro y fuera de edificios.

Los resultados son esperanzadores, sin embargo la precisión de estos depende de la experiencia y conocimientos del usuario en cuestiones de simulación numérica, aspectos que generalmente se escapan del área de conocimiento del arquitecto, además de un gran equipo de cómputo, si se quieren resultados con una definición aceptable.

En su estado actual, la CFD es más una herramienta de investigación que una ayuda en el diseño de edificios y espacios exteriores.

El tercer método, que es más común y mucho más fácil de usar, pero no tan detallado y preciso, es a través de métodos empíricos, que consisten en usar mediciones de casos generales y hacerlas extensivas al caso por analizar.

Por ejemplo, muchos investigadores han tomado meticulosamente, mediciones de los flujos de viento alrededor de barreras sólidas, barreras de árboles y edificios; esta información puede ser válida para otros espacios en situaciones similares.

A pesar de las limitaciones, por no ser exactamente las mismas condiciones del modelo experimental que las de nuestro modelo, debiéndose hacer muchas suposiciones y correcciones, creemos que, es uno de los métodos más prácticos.

La velocidad y dirección del viento cambian a lo largo del día y del año. Generalmente sopla con mayor intensidad durante la tarde, que durante el resto del día. La dirección dominante se puede ilustrar con la rosa de los vientos u otro método gráfico, que nos muestre las tendencias según la época del año. Por ejemplo en latitudes altas, el viento tiende a proceder del norte en invierno y está mejor distribuido el resto del año.

Esta información puede obtenerse en el observatorio meteorológico más cercano, la cual será útil cuando se diseñen espacios en zonas con poca densidad de construcción, o campo abierto, donde generalmente se localizan los observatorios.

En ambientes urbanos, con una alta densidad edificada, y espacios proporcionalmente pequeños, localizados entre edificios, esta información nos servirá solo como referencia y para períodos amplios de tiempo.

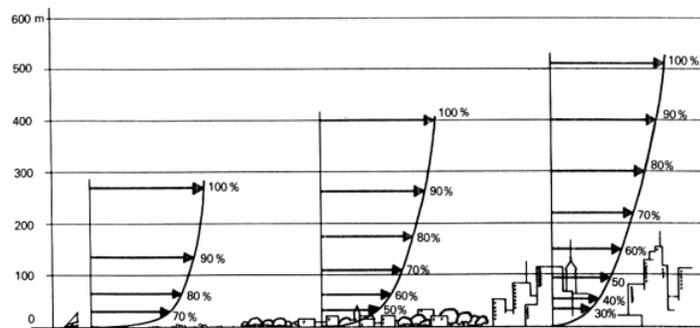


Figura 5.3 Perfiles de velocidades de viento en función de las características de urbanización.

Grado	Tipo	Velocidad m/s	Efectos sobre las personas	Efectos en edificios y vegetación
0	Calma	0 - 0,5	Ninguno.	El humo asciende verticalmente, la superficie del agua está tranquila.
1	Brisa muy suave	0,6 - 1,5	Movimiento apenas percibido debido al enfriamiento.	La dirección del viento la muestra el humo pero nimlas veletas
2	Brisa leve	1,6 - 3,3	Se siente el viento en la cara.	Mirmullo de las hojas.
3	Brisa suave	3,4 - 5,4	El cabello y la ropa se mueven, empieza la incomodidad.	Se mueven las hojas y ramitasde los árboles, estensión de banderas y rizos en el agua.
4	Brisa moderada	5,5 - 7,9	El cabello se desarregla, medinamente incómodo	Se levantan polvo y papeles, las ramas de los árboles se mueven.
5	Vento fuerte	8,0 - 10,7	La fuerza del viento se siente incómodamente sobre el cuerpo.	Los árboles con follaje empiezan a inclinarse, olas con cresta blanca.
6	Vento muy fuerte	10,8 - 13,8	Se escucha el viento, el cabello se extiende, es difícil caminar.	Las hojas se desprenden, la arena o nieve vuela, las ramas más grandes se mueven.
7	Vendaval	13,9 - 17,1	Caminar contra el viento equivale a subir una cuesta de 1/7.	Todos los árboles se encuentran en movimiento.
8	Ventarrón	17,2 - 20,7	Caminar contra el viento equivale a subir una cuesta de 1/5.	Las ramas grandes se doblan y las pequeñas se rompen.
9	Ventarrón fuerte	20,8 - 24,4	Las ráfagas empujan, equivale a subir una cuesta de 1/4.	Las estructuras ligeras se dañan, las tejas se mueven.
10	Borrasca	24,5 - 28,4	El viento hace casi imposible moverse, equivale a subir una cuesta de 1/3.	Las estructuras están considerablemente dañadas y los árboles partidos o arrancados de cuajo.
11	Borrasca fuerte	28,5 - 29,0	Hombres y animales arrastrados o elevados.	Edificios destruidos y bosques enteros arrancados.
12	Huracán	más de 29,0	Destrucción total.	Destrucción total.

Nota: estas velocidades son las medidas a 10m de altura.

Tabla 5.2 Escala de Beaufort para estimar la velocidad del viento. Tomado de (2).

La densidad, la continuidad y la orientación de la trama urbana, en la que está inmerso el espacio que estemos analizando, influirá sensiblemente en los datos provenientes de los observatorios.

Lo más recomendable, es hacer observaciones directamente en el sitio, tomando nota de las direcciones y velocidades, a diferentes horas y épocas del año. También es conveniente hablar con los habitantes del lugar y observar la vegetación existente, por ejemplo, en zonas con vientos intensos, los árboles y arbustos tienden a crecer inclinados por la acción del viento.

Una herramienta útil para medir el viento, es la escala de Beaufort, es una escala relativa, según la cual, a las sensaciones y apreciaciones del observador, se les asigna un grado dentro de ésta, que corresponde a una velocidad en m/s (ver tabla 5.2).

Toda la información que podamos recopilar es válida para localizar elementos que controlen el viento. Aunque no sea posible diseñar para todas las condiciones de viento, al menos lo haremos para la mayoría de ellas.

Según Robinette (3), existen cuatro acciones que los elementos vegetales, pueden ejercer sobre el viento para controlarlo:

1. *Obstrucción*. Bloquea el flujo de aire en una zona.
2. *Deflexión*. Desvía el viento y disminuye su velocidad.
3. *Filtración*. Reduce la velocidad del viento al pasar por una barrera permeable.
4. *Encauzamiento*. Cambia la dirección del viento, conduciéndolo hacia una zona donde se requiera ventilación.

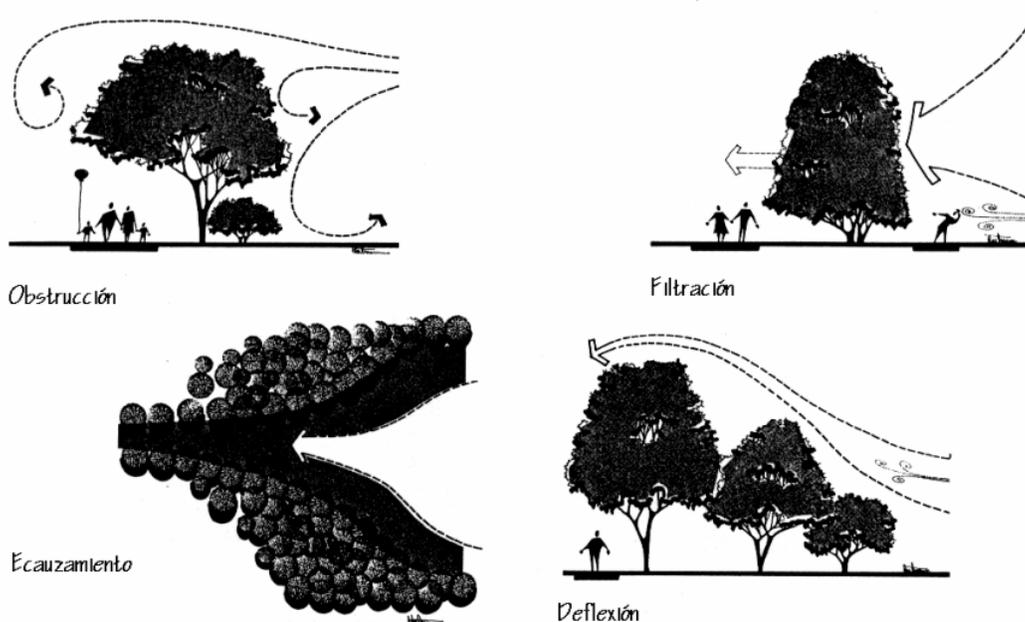


Figura 5.4 Acciones de la vegetación sobre el viento (Robinette *op. cit.*).

Cualquiera que sea la acción que se decida emprender, el elemento básico será una barrera compuesta por árboles o arbustos, tanto unos como otros tienen un efecto similar en el viento, lo único que cambia es la escala.

Cuando se decide poner una barrera se deben de tomar en cuenta las siguientes características:

1. *Altura de la barrera.* A mayor altura mayor es la protección. Generalmente, la sombra de viento se extiende hasta 20 o 25 veces la altura de la barrera y se obtiene la mayor reducción de la velocidad a una distancia de 5 veces la altura de esta.
2. *Anchura de la barrera.* Si se incrementa el ancho y densidad de una barrera, hasta formar incluso un grupo de árboles, disminuye efectivamente la velocidad del viento y la protección dentro de la arboleda.

En el interior de grandes zonas arboladas, la velocidad del viento puede reducirse del 50 al 90%, siendo el centro el área más protegida, aunque esto depende también de la densidad y la penetrabilidad de ésta.

Al aumentar la anchura, la sombra de viento a sotavento también disminuye, lo que significa menor protección fuera del conjunto.

Por el contrario, la sombra de viento es mayor si la barrera está constituida tan sólo por una o dos líneas de árboles.

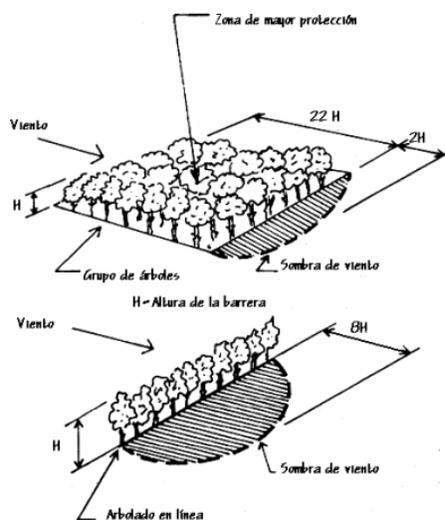
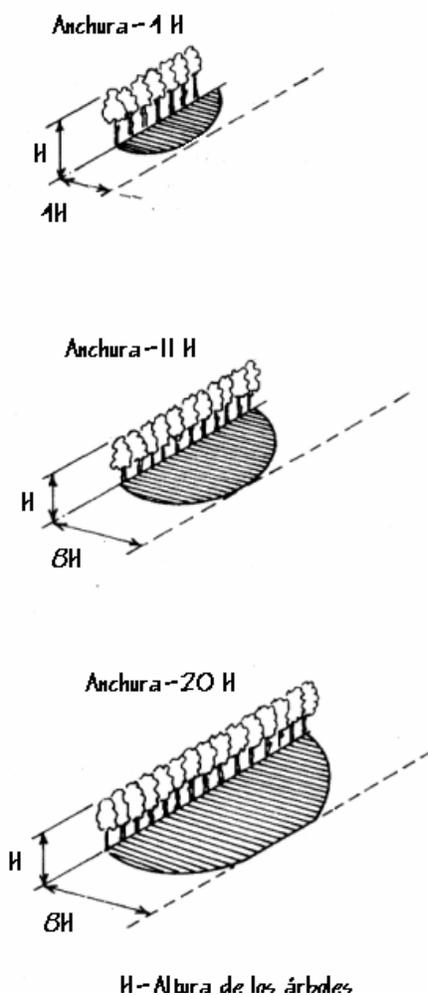


Figura 5.5 Efecto de la anchura de la barrera (4).

3. *Longitud de la barrera.* Al incrementar la longitud de una hilera de árboles, se incrementará la anchura de la sombra de viento, pero hasta cierto límite, por lo general más allá de un ancho mayor de 11 veces la altura ( $H$ ), la sombra no se incrementa, permanece entre 8 y 9  $H$ .

Figura 5.6 Efecto de la longitud de la barrera.<sup>5</sup>

4. *Penetrabilidad*. La penetrabilidad junto con la altura de una barrera, son factores determinantes en la reducción y distribución del flujo alrededor de la misma. Barreras con baja penetrabilidad, reducen dramáticamente la velocidad del viento, pero éste se recupera a una distancia muy corta, además de crear turbulencias. Una con mayor penetrabilidad, reduce menos la velocidad, sin embargo al crear menos turbulencias, su efecto se extiende considerablemente más que en el caso anterior.

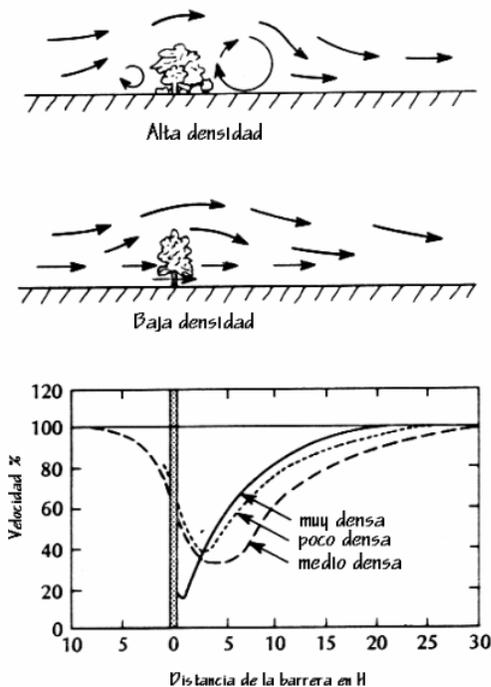


Figura 5.7 Efecto de un rompevientos en función de su penetrabilidad (W. Nægely 1946, citado en 6).

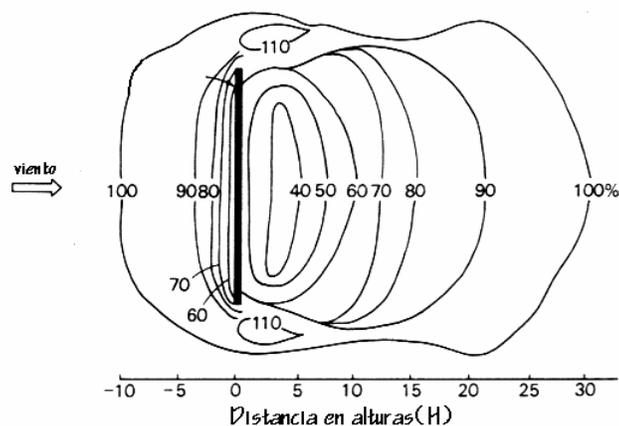


Figura 5.8 Distribución de la velocidad del viento alrededor de una barrera de densidad media. La velocidad está expresada como un porcentaje de la misma en campo abierto (7).

5. *Forma.* La forma de la barrera tanto en planta como en alzado, influyen en el comportamiento del flujo de aire. Formas con aristas cerradas o poco uniformes, provocan más turbulencias que perfiles de curvatura suave.

En experiencias realizadas en un túnel de viento de la Universidad de Wisconsin en 1964 (8), se usaron modelos de árboles hechos de lana de acero, los perfiles se obtuvieron con el humo de un cigarrillo.

Los resultados muestran la influencia de la forma en las turbulencias que se crean alrededor de distintas barreras vegetales (figura 5.9).

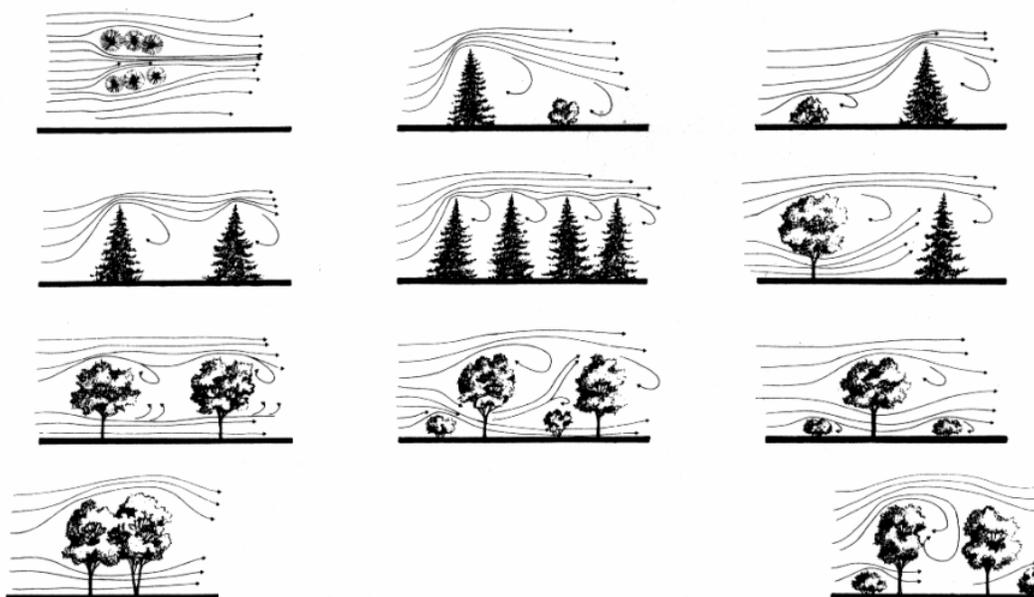


Figura 5.9 influencia de la forma de la barrera.

**Elementos vegetales.** Como se ya ha mencionado, los elementos que se usen, formarán siempre algún tipo de barrera.

Por su forma característica, el elemento más usado para este fin, será el arbolado, ya sea en línea o en grupo.

En algunos casos una pérgola con inclinación pronunciada o vertical, podría usarse para proteger zonas pequeñas.

Las coberturas vegetales, también son eficientes cuando se trata de aislar la piel exterior de los edificios de pérdidas térmicas por convección y radiación, así como de ganancias por la incidencia de la radiación solar.

En las calles el control del viento es muy limitado, ya que, cuando no es turbulento, el viento fluye paralelo al sentido de la misma.

Sus aplicaciones serán a una escala muy reducida, por ejemplo protegiendo la entrada de edificios, o la terraza de algún restaurante.

En paseos peatonales muy anchos, podrían establecerse una serie de barreras, formando "nichos", donde la gente pudiese permanecer algún tiempo.

El mejor control del viento se puede lograr en las plazas, ya que es posible ubicar los elementos vegetales con mayor libertad. Los puntos críticos son las desembocaduras de las calles que llegan a la plaza.

**Características de la vegetación.** Las más interesantes para el control del viento son:

- *Forma y disposición del follaje.* Para barreras de gran altura se recomiendan árboles que tengan el follaje uniforme y distribuido a lo largo del tronco. Para barreras más bajas, los arbustos son mejores. También pueden configurarse barreras mixtas, que incorporen árboles y arbustos, para tener cubierta toda la altura de la misma.
- *Estrés por viento.* Las especies utilizadas, deberán ser resistentes al viento, para que conserven su follaje y no sufran deformaciones excesivas.
- *Exposición solar.* En este tipo de aplicación la especie o especies elegidas, deben resistir ya sea el sol o la sombra, ya que su ubicación no estará asociada a la posición del sol.
- *Tiempo de crecimiento.* Deberá considerarse la implantación de árboles o arbustos lo más maduros posible, ya que debido a la acción mecánica del viento, ejemplares muy jóvenes, pueden sufrir malformaciones o incluso morir, antes de llegar a su tamaño funcional.
- *Carácter del follaje.* En climas con inviernos fríos, las perennifolias son las más útiles, ya que conservan su follaje en la estación fría, sin embargo se debe cuidar su ubicación para evitar la proyección de sombras indeseables. Las caducifolias, sólo funcionan en verano, cuando tienen el 100% de su follaje. Cabe decir que solamente las ramas pueden llegar a reducir el 10 % del viento o más.
- *Penetrabilidad.* Este parámetro consiste en la capacidad de una especie, para reducir el viento, de acuerdo con la densidad de su follaje. Aunque es un parámetro clave para la elección de especies a la hora de configurar una barrera, no se han

encontrado datos a este respecto, reportados en la literatura,. Solo como un punto de referencia, podríamos tomar la transmisividad solar del follaje para saber si una especie es más o menos densa, pero no para usar ese dato en los cálculos.

### **5.3.3 CONTROL DE LA TEMPERATURA Y LA HUMEDAD.**

Mucho se ha escrito sobre las posibilidades de usar la vegetación para disminuir la temperatura ambiente, aprovechando el efecto de la evapotranspiración, esto es cierto, pero solo en parte.

Efectivamente el aire atrapado el follaje de las plantas puede llegar a enfriarse debido a la evaporación directa del agua del suelo y a la transpiración de las plantas, siempre y cuando la humedad relativa del aire sea lo suficientemente baja y nunca se enfriará más allá de la temperatura de bulbo húmedo. Pero normalmente este efecto se disipa rápidamente debido a la acción mezcladora del viento.

Sin embargo hay situaciones en las que este sistema puede resultar efectivo, por ejemplo, en jardines rodeados de muros impenetrables por el viento, localizados en una depresión o rodeados de edificios, entonces el aire fresco quedaría atrapado entre el suelo, el follaje y los límites verticales, teniendo así una temperatura menor que en las zonas edificadas sin vegetación. Pero esta es una situación ideal que pocas veces se da.

Otro aspecto en tomar en cuenta es la escala, el efecto que producen 1, 10 o 100 árboles, puede ser poco significativo, pero cuando hablamos de grandes parques urbanos, corredores verdes, ciudades jardín, etc., es decir emplazamientos donde el área construida con respecto a las zonas verdes, está más equilibrada, sí que habrá un menor efecto de isla de calor, comparado con una ciudad densamente construida.

Esa baja de temperaturas, no es atribuible solo a la vegetación ; aunque su efecto sea apreciable, habrá otros factores como el calor generado por el tráfico o la actividad industrial y doméstica, que disminuyen proporcionalmente a la densidad urbana..

De cualquier manera la vegetación es una herramienta valiosa para el control de la temperatura del aire, a escala microclimática, en espacios exteriores, aunque no como protagonista principal. Su función será sobre todo, la de ayudar a otros sistemas de climatización.

Algunas de las acciones que se pueden implementar serían :

- *Pantallas sombreadoras.* Para evitar que las demás superficies se calienten y transfieran su calor por convección al aire.
- *Cielo raso frío.* Al calentarse menos que los materiales constructivos por la acción del sol, no emite tanta radiación de onda larga.
- *Protección contra el viento.* La vegetación puede usarse como barrera para proteger de la acción del viento, espacios que estén siendo acondicionados por otros medios.
- *Superficies frescas.* Las coberturas superficiales, se mantienen más frías que los pavimentos hechos de materiales pétreos, además retienen el agua de la irrigación. Esto es importante cuando se utiliza un sistema de conductos enterrados.

Como ya hemos visto las acciones que al vegetación ejerce directamente sobre la temperatura del aire son limitadas, encaminadas más que a enfriar el aire, a evitar que este se caliente, pero existen otros sistemas que pueden ayudar a mantener una temperatura ambiente más o menos aceptable.

Generalmente estos sistemas utilizan sistemas mecánicos, como ventiladores o bombas de agua para lograr su cometido. A continuación describiremos algunos de ellos, pero solo de manera breve, ya que no forman parte de los objetivos de este trabajo.

Desde un punto de vista termodinámico, estos sistemas enfrían el aire de dos formas:

1. *Enfriamiento sensible*, el aire se enfría sin la adición de humedad, normalmente por el contacto con una superficie más fría.
2. *Enfriamiento latente*, también llamado enfriamiento evaporativo, en este caso el aire se enfría cediendo calor para la evaporación de agua que está en contacto directo con el mismo, como consecuencia aumenta su humedad absoluta.

A la primera categoría pertenecería el sistema denominado de conductos enterrados, que como su nombre lo indica consiste en una serie de tuberías de PVC, metálicas, fibrocemento, etc., enterradas a cierta profundidad, por las que se hace circular aire mediante de un ventilador.

El sistema aprovecha la diferencia de temperaturas del terreno, que existe a cierta profundidad. Los conductos también pueden estar sumergidos en lechos de grava irrigados o estanques poco profundos. La vegetación puede ayudar a mantener fresca la superficie, lo que haría más eficiente el sistema.

El segundo tipo de sistemas es más numeroso, como básicamente se trata de poner agua en contacto con el aire, es posible utilizar una gran cantidad de elementos habituales en los espacios urbanos, por ejemplo fuentes en sus distintas formas: cortinas de agua, cascadas, pulverizadores o simplemente una lámina de agua con surtidores.

La irrigación intermitente de superficies, horizontales o inclinadas, de tal manera que queden cubiertas por una lámina de agua delgada, resulta eficiente para mantener fresca la superficie y hacer que el viento entre en contacto con el agua.

Existen métodos más sofisticados, como la utilización de micronizadores, que pueden integrarse en pérgolas, grupos o barreras de árboles, inclusive en elementos arquitectónicos como torres de viento con flujo de aire forzado o natural.

La inclusión de unidades tradicionales para enfriamiento de aire, puede ser válido si se trata de un espacio suficientemente confinado, pero la relación entre la energía suministrada para su funcionamiento y el resultado obtenido puede no resultar costeable.

Todos los sistemas mencionados anteriormente y algunos más, los describen en detalle J. López de Asiain (9) y J. J. Guerra M. et al. (10) de la Universidad de Sevilla, a partir de experiencias realizadas en la Expo'92 de Sevilla.

## 5.4 CONFORT CLIMÁTICO EN ESPACIOS EXTERIORES.

Uno de los principales objetivos de controlar el microclima de los espacios exteriores, es crear un ambiente confortable para las personas que utilizan ese espacio. La manera más usual de evaluarlo es mediante los llamados “índices de confort”; existe una amplia bibliografía sobre el tema, autores como Victor Olgyay (11), Baruch Givoni (12) o P.O. Fanger(13), son los pioneros, muchos de trabajos posteriores, están fundamentados en alguno de estos tres autores.

El modelo que aquí se presenta está basado en los trabajos de H. Mayer (14), J. E. Burt (15) y R. D. Brown y T. J. Gillespie (16), además del modelo de Fanger.

Las condiciones de confort entre un espacio interior y uno exterior, son muy diferentes, en los exteriores no se pretende alcanzar una sensación de bienestar equiparable a la obtenida en recintos interiores climatizados, esto se debe en parte a la variabilidad del clima exterior, con lo cual los parámetros para estimarlo son de órdenes de magnitud diferentes. Debido a esto, puede darse el caso que condiciones agradables en el exterior, sean inaceptables dentro de un edificio, por lo que su evaluación deberá hacerse con una óptica diferente.

### 5.4.1 ESTIMACIÓN DEL CONFORT EN ESPACIOS EXTERIORES.

El confort de una persona en un espacio exterior se puede estimar cuantitativamente, mediante su balance energético.

La ecuación básica es:

$$\text{Balance} = M + R_{\text{abs}} - \text{Conv} - \text{Evap} - R_{\text{Temit}}$$

donde:

M = calor metabólico liberado por la persona

R<sub>abs</sub> = radiación solar y terrestre absorbida

Conv = calor sensible perdido o ganado por convección

Evap = calor perdido por evaporación

R<sub>Temit</sub> = radiación terrestre emitida (onda larga)

Cuando el balance está alrededor de cero, se puede esperar que la persona esté térmicamente confortable. Si es un valor positivo alto ( $>150 \text{ W/m}^2$ ), entonces la persona estará recibiendo más radiación de la que pierde, por lo que se sobrecalentará y tendrá calor. Por el contrario si el balance es un número negativo bajo ( $<-150 \text{ W/m}^2$ ), la persona tendrá frío.

Todos los componentes del balance serán descritos mediante ecuaciones en las siguientes secciones, de tal manera que utilizando un lenguaje de programación sencillo o una hoja de cálculo, se pueda obtener el balance.

### PRODUCCIÓN DE CALOR METABÓLICO - $M$ .

El total del calor metabólico generado por una persona ( $M^*$ ) es utilizado por su cuerpo de dos formas : 1) una pequeña parte ( $f$ ) es liberado durante la respiración por evaporación, y 2) el resto ( $M$ ) es conducido fuera del cuerpo, a través de la piel y finalmente se pierde por convección, radiación y evaporación. Para describir estas pérdidas se usa:

$$f = 0.150 - (0.0173 \cdot e) - (0.0014 \cdot T_a)$$

$$e = 0.6108 \cdot \exp [(17.269 \cdot T_a)/(T_a + 273.3)]$$

donde  $e$  es la presión de vapor de saturación del aire y  $T_a$  es la temperatura del aire en  $^{\circ}\text{C}$ .

$$M = (1 - f) \cdot M^*$$

Los valores de  $M^*$  están en función del actividad. Algunos valores típicos se pueden ver en la tabla 5.3.

ACTIVIDAD	$M^*$ ( $\text{W/m}^2$ )
Durmiendo	50
Descanzando	60
Sentado/de pie	90
Trabajando en una mesa o conduciendo	95
De pie, trabajo ligero	120
Caminando lentamente (4km/h)	180
Caminando moderadamente (5.5 km/h)	250
Actividad intensa intermitente	600

Tabla 5.3 Calor metabólico generado por algunas actividades al aire libre.

### ABSORCIÓN DE RADIACIÓN SOLAR Y TERRESTRE - *R<sub>abs</sub>*.

El valor de **R<sub>abs</sub>** se puede estimar haciendo un balance de la energía radiante que llega a la persona, a partir de los datos de radiación solar y de las propiedades radiantes de los objetos, superficies y elementos vegetales, que existen el sitio. Este procedimiento se detallará en el apartado 5.5.

### PERDIDAS O GANANCIAS DE CALOR POR CONVECCIÓN - *Conv.*

El flujo de calor del cuerpo de una persona hacia el ambiente, debe pasar a través de la piel, de la ropa y finalmente de la capa límite de aire que lo rodea. la ecuación que describe este flujo es:

$$\text{Conv} = 1200 \cdot (T_c - T_a) / (r_t + r_c + r_a)$$

donde **T<sub>c</sub>** es la temperatura corporal (°C) de la persona, **r<sub>t</sub>** es la resistencia térmica corporal, **r<sub>c</sub>** es la resistencia de la ropa y **r<sub>a</sub>** es la resistencia de la capa límite alrededor del cuerpo. Estos valores se pueden obtener mediante:

$$T_c = 36.5 + (0.0043 \cdot M)$$

y

$$r_t = (-0.1 \cdot M^*) + 65$$

$$r_a = 0.17 \cdot (Re^n \cdot Pr^{0.33} \cdot k)$$

$$r_c = r_{co} \cdot [1 - (0.5 \cdot P^{0.4} \cdot W^{0.5})] \quad \text{cuando } W > 0.7 \text{ m/s}$$

$$r_c = r_{co} \quad \text{cuando } W < 0.7 \text{ m/s}$$

donde

**r<sub>co</sub>** = aislamiento de la ropa

**P** = permeabilidad al aire de la ropa

**Re** = número de Reynolds =  $W \cdot D / \nu = 11333 \cdot W$  en este caso

**Pr** = número de Prandtl  $\cong 0.71$

**D** = diámetro de la persona (m)

**W** = velocidad del viento (m/s)

**ν** = viscosidad cinemática

**k** = difusividad térmica del aire = 0.0301

Para valores de  $r_{co}$  y  $P$  de algunos conjuntos de ropa, ver tabla 5.4.

Ropa	$r_{co}$	$P$
Camiseta, pantalones cortos, calcetines, zapatillas deportivas	50	175
Polo, pantalones largos, calcetines, zapatos o botas	75	150
Polo, pantalones largos, calcetines, zapatos, anorak	100	100
Camisa m. larga, pantalones largos, calcetines, zapatos, anorak	125	65
Camisa m. larga, pantalones largos, calcetines, zapatos, suéter	175	125
Camisa m. larga, pantalones largos, calcetines, zapatos, suéter, anorak	250	50

Tabla 5.4 Valores de permeabilidad y aislamiento de algunos conjuntos usuales de ropa.

### RADIACIÓN TERRESTRE EMITIDA - $TR_{emit}$ .

La radiación terrestre emitida por una persona puede estimarse por:

$$TR_{emit} = 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (T_s + 273)^4$$

donde  $T_s$  es la temperatura superficial de la persona y puede encontrarse con la siguiente ecuación:

$$(T_s - T_a)/r_a = (T_c - T_a)/(r_t + r_c + r_a)$$

### PÉRDIDAS DE CALOR POR EVAPORACIÓN - $Evap$ .

Las pérdidas por evaporación, suceden por la respiración y la transpiración. Las pérdidas por respiración ya están incluidas en  $M$ .

La transpiración podemos dividirla en pérdidas “insensibles” ( $E_i$ ) a través de la piel y “sensibles” ( $E_s$ ) por la evaporación del sudor sobre la piel. Para obtenerlas, se pueden usar las siguientes ecuaciones:

$$E_s = 0.42 \cdot (M - 58)$$

y

$$E_i = 5.24 \cdot 10^6 \cdot (q_s - q_a)/(r_{cv} + r_{av} + r_{tv})$$

donde el subíndice  $v$  indica la resistencia al vapor de agua,  $q_s$  y  $q_a$  son la humedad específica de saturación con  $T_s$  y  $T_a$  respectivamente, y pueden determinarse, usando la temperatura correspondiente en la siguiente ecuación:

$$q = 0.6108 \cdot \{\exp[(17.269 \cdot T)/(T + 237.3)]\}$$

De manera similar a la temperatura superficial, podemos obtener la temperatura de la piel ( $T_k$ ):

$$(T_k - T_a)/(r_a + r_c) = (T_c - T_a)/(r_t + r_c + r_a)$$

Usaremos valores de  $7.7 \cdot 10^{-3}$  para  $r_{tv}$  y de  $0.92 \cdot r_a$  para  $r_{av}$ , y asumiremos que  $r_{cv}=r_c$ . La evaporación total queda como sigue:

$$\text{Evap} = E_i + E_s$$

Hay situaciones que la humedad en el aire es tan alta, que no permite que el sudor se evapore lo suficientemente rápido como para asegurar el confort de la persona, entonces se utiliza la evaporación máxima  $E_m$  que se calcula como sigue:

$$E_m = 5.24 \cdot 10^6 \cdot (q_s - q_a)/(r_{cv} + r_{av})$$

En el cálculo del balance, se utiliza el valor más bajo entre **Evap** y  $E_m$ .

El balance obtenido de las ecuaciones, está en  $W/m^2$ , en la tabla 5.5 puede verse su interpretación como nivel de confort.

Balance ( $W/m^2$ )	Interpretación
Balance < -150	Preferible mucho más calor
-150 < Balance < -50	Preferible más calor
-50 < Balance < 50	Confortable
50 < Balance < 150	Preferible más fresco
150 < Balance	Preferible mucho más fresco

Tabla 5.5 Interpretación del balance energético de una persona como sensación de confort.

## 5.5 ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN RECIBIDA POR UNA PERSONA EN ESPACIOS EXTERIORES.

Para estimarla, se han usado modelos que describen por separado el balance de la radiación solar y el de la terrestre.

El total de radiación recibida por una persona en cualquier ambiente,  $R_{abs}$ , consta de dos componentes: a) el total de radiación solar absorbida,  $K_{abs}$ , más b) el total de radiación terrestre absorbida,  $L_{abs}$ , es decir:

$$R_{abs} = K_{abs} + L_{abs}$$

Se ha considerado el modelo de una persona, como un cilindro vertical, con una esfera de influencia. El hemisferio superior de la esfera está dominado por la bóveda celeste y los objetos ubicados arriba del nivel del suelo, mientras que el hemisferio inferior está dominado por la superficie del suelo y los objetos que están sobre ésta.

### MODELO PARA LA RADIACIÓN SOLAR.

La cantidad de radiación solar absorbida por una persona, se puede estimar sumando todas las fuentes de las que recibe radiación la persona, incluyendo: a) radiación solar directa transmitida a través del follaje de la vegetación u otros objetos,  $T$ , b) radiación solar difusa, no reflejada,  $D$ , c) radiación difusa reflejada por la vegetación y otros objetos en el espacio,  $S$ , y d) radiación reflejada por el suelo  $R$ . La suma de todas estas entradas se multiplicará por  $(1 - A)$ , donde  $A$  = albedo de la persona:

$$K_{abs} = (T + D + S + R) \cdot (1 - A)$$

El valor típico del albedo para personas de raza blanca, es de 0.35 y para la raza negra 0.18. Sin embargo la absorción de radiación depende más, del albedo de la ropa, que de la piel de la persona. Para este modelo se consideró un albedo de 0.37, tal y como lo sugieren diversos autores.

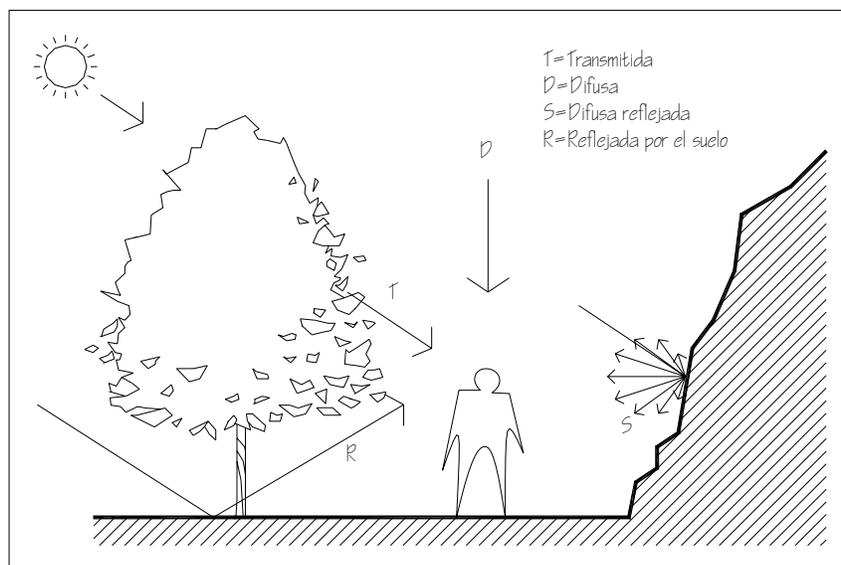


Figura 5.11 Vías de radiación solar hacia la persona, consideradas en el modelo.

Cada uno de los componentes de  $K_{abs}$ , puede estimarse mediante otras ecuaciones:

- a. Debajo del follaje de un árbol con transmisividad  $t$ , la radiación solar directa recibida por una persona  $T$ , se define mediante la siguiente ecuación:

$$T = \left\{ \frac{(K - K_d)}{\tan e} \right\} \cdot t$$

donde:

$K$  = radiación solar global medida sobre el plano horizontal

$K_d$  = Radiación solar difusa, aprox. 10% de  $K$  en un día claro

$e$  = altura solar

$t$  = transmisividad solar de la vegetación u objetos ubicados entre el sol y la persona,  $t = 100$  sin obstrucciones,  $t = 0$  para objetos sólidos opacos, p.e. edificios.

- b. La componente difusa de la radiación,  $D$ , que llega a la persona, se estima (en condiciones de cielo despejado) multiplicando la cantidad de radiación difusa disponible  $K_d$ , por la proporción de la bóveda celeste sin obstrucciones de árboles u otros objetos, es decir el factor de cielo visto, **SVF** (*sky view factor*, en Inglés).

$$D = K_d \cdot SVF$$

Para un sitio sin obstrucciones en el horizonte  $SVF = 1$ .

Para una calle “infinitamente larga” en ambas direcciones, se puede calcular de acuerdo con el método desarrollado por T. R. Oke (17). El  $SVF$  se relaciona directamente con la proporción de la altura de los límites de la calle,  $H_1$  y  $H_2$ , entre su anchura,  $d$ . Para obtener el  $SVF$  de un punto situado al centro de una calle como la de la figura 5.12, lo primero será asumir que la calle es infinitamente larga, entonces el factor de vista de cada fachada ( $SVF_f$ ) es:

$$SVF_f = (1 - \cos \theta_f)/2$$

donde  $\theta = \tan^{-1} (H_f / 0.5 d)$ . Entonces el factor de vista del cielo de toda la calle es:

$$SVF = 1 - (SVF_{f1} + SVF_{f2})$$

Para calles con sección simétrica es mucho más simple :  $SVF = \cos \theta$ . Oke también da algunos valores aproximados para este tipo de calles :

$H/d$	0	0.25	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0
$\theta$	0°	27°	45°	63°	76°	81°	83°
$SVF$	1.00	0.89	0.71	0.45	0.24	0.16	0.12

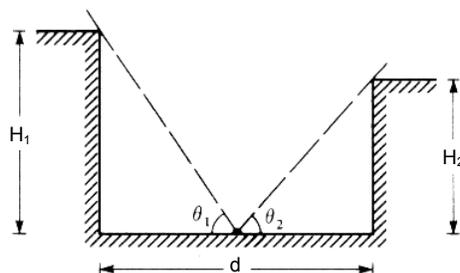


Figura 5.12 Configuración geométrica de una calle asimétrica flanqueada por los límites 1 y 2.

- c. Una parte de la radiación difusa,  $S$ , es reflejada desde los objetos ubicados en el hemisferio celeste sobre la persona. Ésta se puede estimar, multiplicando la porción de cielo obstruida por estos objetos ( $1 - SVF$ ), por la radiación difusa disponible,  $K_d$ , después multiplicamos este valor por el albedo de los objetos  $A_o$ , quedando como sigue:

$$S = [K_d \cdot (1 - SVF)] \cdot A_o$$

- d. La radiación solar reflejada desde el suelo sobre la persona,  $R$ , multiplicando la radiación solar global  $K$  por la transmisividad  $t$  de los objetos que estén entre el sol y

el punto que refleje la radiación sobre la persona, este valor se multiplica por el albedo de la superficie del suelo,  $A_G$ :

$$R = K \cdot t \cdot A_G$$

Los valores de  $t$  varían de 0.15 para una picea a 0.75 para un sauce. El albedo del suelo se puede tomar como 0.09 para suelos oscuros.

### MODELO PARA LA RADIACIÓN TERRESTRE.

La radiación terrestre absorbida por una persona,  $L_{abs}$ , se puede modelar de manera similar a la usada para la radiación solar; esto es, tomando a la persona como un cilindro, ubicado dentro de una esfera, pero con la misma influencia de cualquier parte de ésta.

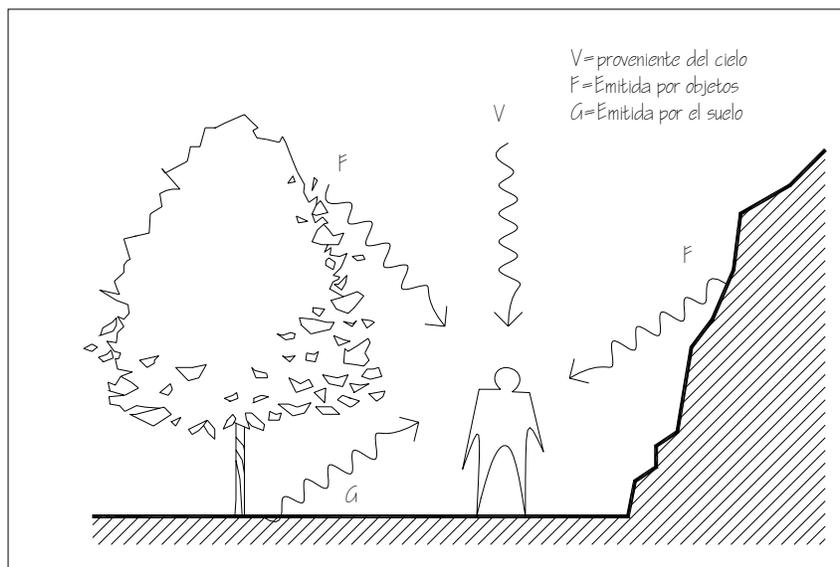


Figura 5.13 Vías consideradas en el modelo de radiación terrestre recibida por la persona.

La radiación terrestre recibida del hemisferio de la esfera que ve hacia el cielo, es la suma de la radiación del cielo,  $V$ , más la de los objetos ubicados arriba el horizonte,  $F$ . La radiación recibida del hemisferio que ve hacia el suelo, es simplemente la que emite la superficie del suelo,  $G$ . la suma resultante es multiplicada por la capacidad de la persona para absorberla,  $(1 - A)$ , que generalmente se toma como  $A = 0.37$ .

$$L_{abs} = \{[0.5 \cdot (V + F)] + (0.5 \cdot G)\} \cdot (1 - A)$$

El factor 0.5 se refiere a cada hemisferio.

Los componentes de esta ecuación se calculan de la manera siguiente:

- a. El cielo emite radiación, **L**, que es recibida por la persona **V**, de acuerdo con la proporción del cielo que es visible, o sea el **SVF**:

$$V = L \cdot SVF$$

El valor de **L**, se puede estimar con una ecuación empírica, que se basa en la temperatura del aire, **T<sub>a</sub>**, en Kelvin,:

$$L = [1.2 \cdot (5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot T_a^4] - 171$$

- b. La radiación recibida desde los objetos en el hemisferio del cielo, **F**, se estima con base en la temperatura de cada objeto **T<sub>o</sub>**:

$$F = [E_o \cdot (5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot T_o^4] \cdot (1 - SVF)$$

Cuando se consideran árboles, su temperatura se toma igual a la del ambiente.

- c. Finalmente se calcula la radiación proveniente del suelo que recibe la persona, **G**, de acuerdo con la temperatura del suelo **T<sub>g</sub>**:

$$G = [E_G \cdot (5.67 \cdot 10^{-8}) \cdot T_g^4]$$

**E** es la emitancia de la superficie según el subíndice correspondiente, para la mayoría de las superficies urbanas, elementos constructivos y vegetación, se puede considerar que **E = 0.98**.

## 5.6 ESTIMACIÓN DEL VIENTO EN ESPACIOS EXTERIORES.

Los datos de viento que se pueden obtener de las estaciones meteorológicas, generalmente están medidos en lugares despejados, como aeropuertos, y lo usual es que se midan a una altura de 10 m del suelo, por lo tanto la velocidad del viento a 1.5 m del suelo y dentro de la trama urbana será mucho menor que la proporcionada por los observatorios.

Como una aproximación, se puede usar el modelo empírico desarrollado por Heisler (18), el cual se basa en mediciones hechas en zonas urbanas, con diferente densidad de construcción y arbolado (área construida + área cubierta por vegetación / área total considerada), comparadas con las obtenidas en una estación meteorológica situada en un aeropuerto cercano. El estudio se hizo tanto en verano como en invierno, cuando las caducifolias, habían perdido sus hojas.

La reducción promedio para verano está dada por la siguiente ecuación :

$$W = W_0 (0.292 + 0.728 e^{-0.042 C})$$

donde:

$W$  = velocidad del viento en el sitio (m/s)

$W_0$  = velocidad de referencia

$C$  = Densidad total de la trama urbana (árboles + edificios)

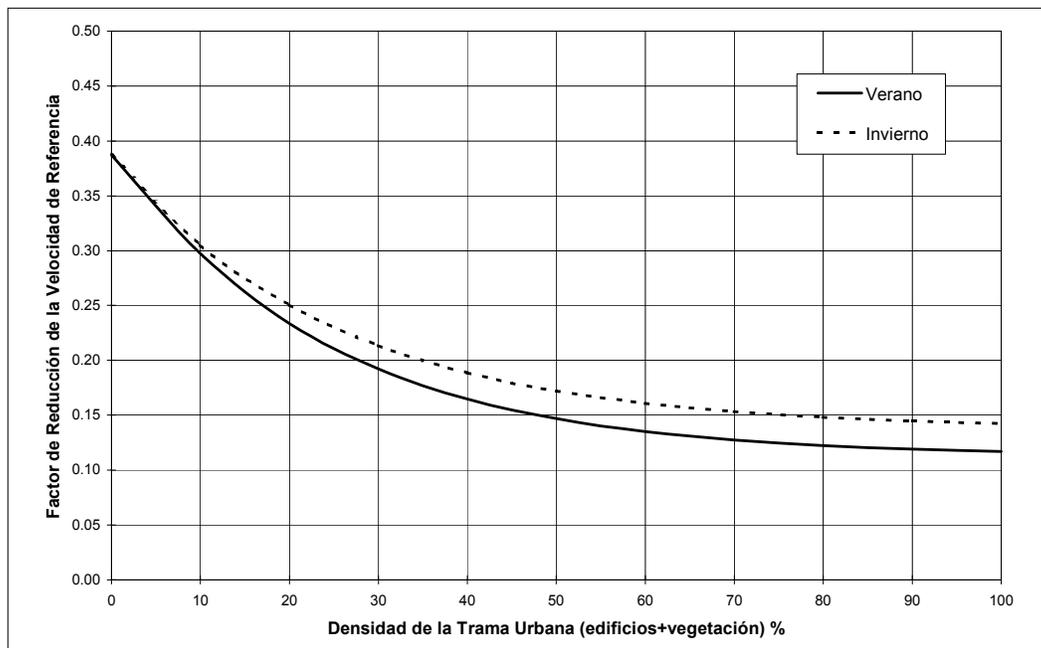
La reducción promedio para invierno con vegetación sin hojas, está dada por la siguiente ecuación :

$$W = W_0(0.356 + 0.644 e^{-0.039 C})$$

Para obtener la velocidad a una altura de 1.5 m sobre el nivel del suelo habrá que aplicar la siguiente corrección:

$$W_Z = W \cdot 8.94 \cdot (Z / 800)^{0.5}$$

donde  $Z$  = altura sobre el suelo (m),  $0 < Z < 10$  m.



Gráfica 5.1 Factor de disminución del viento según la densidad de la trama urbana (edificios + árboles) a 1.5 m de altura.

Una vez calculado el viento a nivel de la persona, si queremos saber el efecto que tendría una barrera de árboles sobre su velocidad, la manera más fácil de calcularlo, como ya se había mencionado, es a través de gráficas como las de las figuras 5.7 y 5.8., por ejemplo, si la velocidad calculada antes de pasar la barrera es de 3 m/s, y nuestro sujeto está ubicado en un área marcada con el 50% del viento total, entonces valor resultante será de 1.5 m/s.

## 5.7 RESUMEN DEL CAPÍTULO.

La mejor forma de saber en que grado podemos aprovechar la vegetación, como una herramienta para mejorar las condiciones microclimáticas, es haciendo un balance de la energía que entra y la que sale del sistema urbano y como se distribuye entre sus diversos componentes.

Un microclima estable, se consigue solamente cuando los receptores (consumidores) y los emisores (proveedores) de energía están balanceados. El balance se puede lograr manipulando la distribución de energía entre los distintos consumidores.

En principio, es posible aumentar el consumo de algunos elementos, restringiendo la vías de energía hacia otros componentes del sistema. Si algunos de éstos están más/menos restringidos, entonces mayor/menor energía fluirá hacia el resto de los consumidores.

En este capítulo se presentan pautas de diseño, que están encaminadas, a saber detectar y en su caso reconducir, los flujos de energía dentro del espacio microclimático, con el propósito de que los objetivos finales del diseño de un sistema, sean estas personas o edificios, puedan emitir o recibir la cantidad de energía adecuada a sus necesidades.

Las acciones microclimáticas de los elementos vegetales, se abocan sobre todo al control de la radiación, del viento, de la temperatura ambiente y de la humedad del aire.

Para su mejor control, se ha separado la radiación en dos tipos: la proveniente del sol (solar) y la emitida por todos los objetos y superficies presentes en el espacio urbano (terrestre).

El **control de la radiación solar**, ya sea directa, difusa o reflejada, se logra mediante las siguientes acciones:

- Incorporación de pantallas de sombra, verticales y horizontales, según la dirección de los rayos.
- Utilización de cubiertas hechas con materiales constructivos (lona, madera, hormigón, etc.) en conjunto con elementos vegetales.

- Incorporar coberturas vegetales superficiales ya sea como elementos de sombra o antirreflejantes, en muros, y suelos.
- Obstruir las reflexiones, ubicando elementos verticales de baja altura, como setos.

Configuración espacial de los elementos vegetales:

- Alturas solares  $< 30^\circ$ , elementos que formen barreras verticales.
- Alturas solares  $> 30^\circ$ , elementos que formen barreras horizontales.
- La separación entre árboles se determinará según las dimensiones, forma y densidad del follaje.
- Para barreras verticales se seleccionarán árboles o arbustos, con follaje uniforme distribuido a lo largo del tronco.
- Para barreras horizontales, el follaje debe estar en la parte superior, la forma de éste no es tan importante, siempre y cuando el conjunto constituya una capa más o menos homogénea.
- Cuando se utilicen pérgolas, se puede disminuir su transmitancia utilizando dos o más capas de follaje, colocando una especie resistente al sol en la parte superior y especies de sombra en las capas inferiores.
- Las especies caducifolias se utilizarán en climas donde se requiera protección en verano y soleamiento en invierno.
- Las especies perennifolias, se utilizarán en climas o situaciones que necesiten protección en cualquier época.
- Cuando se requiere que una superficie reciba el sol en invierno, por ejemplo la fachada de una casa, conviene usar especies caducifolias.
- En superficies transitables, es recomendable combinar superficies vegetales con materiales pétreos o pavimentos, hay que cuidar la proporción entre unos y otros y hacer un promedio de los albedos.

El **control de la radiación terrestre**, se basa en el principio de que todos los cuerpos emiten radiación de acuerdo con su temperatura, por lo que la mayoría de las estrategias estarán encaminadas a controlar las temperaturas superficiales del sistema:

- *Control del flujo de radiación solar hacia la superficie a tratar.* Dependiendo de los requerimientos del sistema, puede ser necesario que una superficie se caliente, permitiendo el soleamiento, o mantenerla fresca, colocando elementos de sombra.
- *Implantación de coberturas vegetales.* Éstas mantienen su temperatura cercana a la ambiente aún bajo un sol intenso.
- *Irrigación.* Con humedad ambiental baja, una superficie irrigada se mantiene fresca.
- *Albedos y almacenamiento térmico.* Éstas características de los materiales, definen su capacidad para absorber y almacenar energía solar, que posteriormente será emitida al sistema en forma de radiación de onda larga.
- *Combinación de elementos vegetales y materiales sólidos.* Con la utilización en conjunto de estos elementos, se pueden desarrollar sistemas para enfriamiento de superficies, ya sea por evaporación o conducción.

**Control del viento.** El viento es otro de los componentes del microclima que afecta a personas y edificios y que puede ser modificado significativamente por vegetación y barreras sólidas.

Es extremadamente variable, tanto en su dirección como en su velocidad. Esto se debe principalmente a las turbulencias, que están en función de la velocidad y la rugosidad del terreno.

La mayoría de los objetos en el paisaje urbano, afectan al viento; algunos reducirán su velocidad o lo redireccionarán y otros podrían incrementarla. El viento también está influido por la orientación y la ubicación relativa del sitio.

Existen cuatro acciones que los elementos vegetales, pueden ejercer sobre el viento para controlarlo:

1. *Obstrucción.* Bloquea el flujo de aire en una zona.
2. *Deflexión.* Desvía el viento y disminuye su velocidad.
3. *Filtración.* Reduce la velocidad del viento al pasar por una barrera permeable.
4. *Encauzamiento.* Cambia la dirección del viento, conduciéndolo hacia una zona donde se requiera ventilación.

Como ya se había mencionado, los elementos que se usen, formarán siempre algún tipo de barrera.

Por su forma característica, el elemento más usado para este fin, será el arbolado, ya sea en línea o en grupo.

En algunos casos una pérgola con inclinación pronunciada o vertical, podría usarse para proteger zonas pequeñas.

Las cobertura vegetales, también son eficientes cuando se trata de aislar la piel exterior de los edificios de pérdidas térmicas por convección y radiación y de ganancias por la incidencia de la radiación solar.

En calles el control del viento es muy limitado, ya que el viento cuando no es turbulento, fluye paralelo al tránsito de la misma.

Por lo tanto sus aplicaciones serán a una escala muy reducida, por ejemplo protegiendo la entrada de edificios, o la terraza de algún restaurante.

En paseos peatonales muy anchos, podrían establecerse una serie de barreras, formando "nichos", donde la gente pudiese permanecer algún tiempo.

El mejor control del viento se puede lograr en las plazas, ya que es posible ubicar los elementos vegetales con mayor libertad. Los puntos críticos son las desembocaduras de las calles que llegan a la plaza.

Las características de la vegetación más interesantes para el control del viento son:

- *Forma y disposición del follaje.* Para barreras de gran altura se recomiendan árboles que tengan el follaje uniforme y distribuido a lo largo del tronco. Para barreras más bajas, los arbustos son mejores. También pueden configurarse barreras mixtas, que incorporen árboles y arbustos, para tener cubierta toda la altura de la misma.
- *Stress por viento.* Las especies utilizadas, deberán ser resistentes al viento, de tal manera que no pierdan su follaje y no sufran deformaciones excesivas.

- *Exposición solar.* En este tipo de aplicación, la especie o especies elegidas deben resistir ya sea el sol o la sombra, ya que su ubicación no estará asociada a la posición del sol.
- *Tiempo de crecimiento.* Deberá considerarse la implantación de árboles o arbustos lo más maduros posible, ya que ejemplares muy jóvenes, pueden sufrir malformaciones incluso morir, antes de llegar a su tamaño funcional.
- *Carácter del follaje.* En climas con inviernos fríos, las perennifolias son las más útiles, ya que conservan su follaje en la estación fría, sin embargo se debe cuidar su ubicación para evitar la proyección de sombras indeseables. Hay que notar que solo las ramas de las caducifolias, llegan a reducir el viento hasta 10%.
- *Penetrabilidad.* Este parámetro consiste en la capacidad de una especie, para reducir el viento, de acuerdo con la densidad de su follaje. Aunque es un parámetro clave para la elección de especies a la hora de configurar una barrera, no se han encontrado datos reportados en la literatura, datos a este respecto.

**Control de la temperatura y la humedad.** La temperatura y la humedad de aire, son los factores microclimáticos, que menos afecta la vegetación, esto se debe en parte a que los efectos que se puedan llegar a producir por evapotranspiración, se dispersan rápidamente por la acción del viento, salvo que el espacio en cuestión esté lo suficientemente confinado.

La escala también influye en este aspecto, el efecto de 1, 10 o 100 árboles, será casi imperceptible, sin embargo en un gran parque urbano o una “ciudad jardín”, los efectos de la isla de calor, serán menos graves que el una zona densamente construida.

De cualquier manera la vegetación es una herramienta valiosa para el control de la temperatura del aire a escala microclimática, aunque no como protagonista principal. Su función será sobre todo, la de ayudar a otros sistemas de climatización.

Algunas de las acciones que se pueden implementar serían :

- *Pantallas sombreadoras.* Para evitar que las demás superficies se calienten y transfieran su calor al aire por convección.
- *Cielo raso frío.* Al calentarse menos que los materiales constructivos por la acción del sol, no emite tanta radiación de onda larga.

- *Protección contra el viento.* La vegetación puede usarse como barrera para proteger de la acción del viento en espacios que estén siendo acondicionados por otros medios.
- *Superficies frescas.* Las coberturas superficiales, pueden mantenerse más frías que los pavimentos hechos de materiales pétreos, además retiene el agua de la irrigación. Esto es importante cuando se utiliza un sistema de conductos enterrados.

Para el control de temperatura y humedad, existen sistemas alternativos, que generalmente utilizan elementos mecánicos como ventiladores, bombas de agua, etc.

Desde un punto de vista termodinámico, estos sistemas enfrían el aire de dos formas:

1. *Enfriamiento sensible.* El aire se enfría sin la adición de humedad, generalmente por contacto con una superficie más fría.
2. *Enfriamiento latente.* También llamado enfriamiento evaporativo, en este caso la temperatura de aire baja, al ceder calor para la evaporación de agua que está en contacto directo con él, como consecuencia aumenta su humedad absoluta.

**Confort ambiental en espacios exteriores.** Las condiciones de confort entre un espacio interior y uno exterior, son muy diferentes; en los exteriores no se pretende alcanzar una sensación de bienestar equiparable a la obtenida en recintos interiores climatizados, esto se debe en parte a la variabilidad del clima exterior, con lo cual los parámetros para estimarlo son de órdenes de magnitud diferentes. Debido a esto, puede darse el caso que condiciones agradables en el exterior, sean inaceptables dentro de un edificio, por lo que su evaluación deberá hacerse con una óptica diferente.

El confort de una persona en un espacio exterior se puede estimar cuantitativamente, mediante su balance energético.

La ecuación básica es: **Balance = M + Rabs - Conv - Evap - RTemit**

donde : **M** es el calor metabólico liberado por la persona, **Rabs** es la radiación solar y terrestre absorbida, **Conv** es el calor sensible perdido o ganado por convección, **Evap** es el calor perdido por evaporación y **RTemit** es la radiación terrestre emitida (onda larga).

Cuando el balance está alrededor de cero, se puede esperar que la persona esté térmicamente confortable. Si es un valor positivo alto, entonces la persona estará recibiendo más radiación de la que pierde, por lo que se sobre calentará y por lo tanto tendrá calor. Por el contrario si el balance es un número negativo bajo, la persona tendrá frío.

Todos los componentes del balance se han descrito mediante ecuaciones en las secciones correspondientes, de tal manera que utilizando un lenguaje de programación sencillo o una hoja de cálculo, se pueda obtener el balance.

**La estimación de la radiación absorbida por una persona**, es uno de los elementos más importantes cuando se quiere evaluar el nivel de confort ambiental alcanzado en un espacio exterior. Para estimarla se han usado modelos que describen por separado el balance de la radiación solar y de la terrestre.

El total de radiación recibida por una persona en cualquier ambiente,  $R_{abs}$ , consta de dos componentes: a) el total de radiación solar absorbida,  $K_{abs}$ , más b) el total de radiación terrestre absorbida,  $L_{abs}$ , es decir:  $R_{abs} = K_{abs} + L_{abs}$

Se ha considerado el modelo de una persona, como un cilindro vertical, con una esfera de influencia. El hemisferio superior está dominado por la bóveda celeste y los objetos ubicados arriba del nivel del suelo, mientras que el hemisferio inferior esta dominado por la superficie del suelo y los objetos que están sobre éste. También se han descrito las ecuaciones necesarias para estimarla cuantitativamente.

**Estimación del viento en espacios exteriores urbanos.** Mientras que la radiación puede ser representada con bastante precisión mediante ecuaciones y modelos matemáticos, el viento sigue sin poder ser descrito adecuadamente de esta forma.

Básicamente existen tres métodos para entender el viento dentro de un espacio urbano :

El primero es a través de modelos a escala en túneles de viento o canales de agua. Las condiciones son simuladas con la mayor precisión posible, aplicando factores de escala adecuados. Este método nos da la oportunidad de hacer modificaciones en

nuestro espacio y ver directamente los efectos sobre el viento, sin embargo se requiere de equipo que no siempre es accesible a todos.

Un segundo método sería a través de simulaciones por ordenador. Durante los últimos años, se ha puesto mucho empeño en el desarrollo estos métodos, también llamados CFD (computational fluid dynamics), para la predicción de flujos de aire dentro y fuera de edificios. Los resultados son esperanzadores, pero en su estado actual, los CFD son más una herramienta de investigación que una ayuda en el diseño de edificios y espacios exteriores.

El tercer método, que es más común y mucho más fácil de usar, pero no tan detallado y preciso, es a través de métodos empíricos, que consisten en usar mediciones de casos generales y hacerlas extensivas al caso por analizar.

En la sección 5.6, se han descrito algunos modelos empíricos, que servirán como herramienta, para tener una aproximación del viento que se puede esperar en un sitio específico, a partir de los datos meteorológicos.

## 5.8 BIBLIOGRAFÍA.

- Arnfield, A. J., Grimmond, C. S. B. "**An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling**", Energy and Buildings, no. 27, 1998, pag. 61-68.
- Flerchinger, G. N., Hanson, C. L., Wight, J. R. "**Modeling evapotranspiration and surface energy budgets across a watershed**" Water Resources Research, Vol. 32, no. 8, pags. 2539-2548. agosto, 1996.
- Geiger, R. "**The climate near the ground**", Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1965.
- Ji, J. "**A climate-vegetation interaction model : simulating physical and biological processes at the surface**", Journal of Biogeography, no. 22, 1995,445-451.
- Llorents, P. "**Agua y bosque. Los problemas de la reforestación**" Investigación y Ciencia, julio, 1997.
- Lowry, W. P. "**Atmospheric ecology for designers and planners**", Peavine Publications, McMiniville,Oregon, 1988.
- Muneer, T. "**Solar radiation and daylight models for energy efficient design of buildings**", Butterworth-Heinemann, Boston, 1997.
- Kjelgaard, J. F., Stockle, C. O. "**Accuracy of canopy temperature energy balance for determining daily evapotranspiration**" Irrigation Science, no. 16, 1996, 149-157, Springer-Verlag, 1996.
- Sailor, D. J. "**Simulated urban climate response to modifications in surface albedo and vegetative cover**", Journal of Applied Meteorology, Vol. 34, julio, 1995, pag. 1694-1704.
- Wilmers, F. "**Green for melioration of urban climate**", Energy and Buildings, no. 11, 1988, Pag. 289-299.

## 5.9 REFERENCIAS.

- 1 Olgyay, V. “**Design With Climate**”, Princeton University Press, New Jersey, 1963.
- 2 García Chavez, J.R. Fuentes Freixenet, V. “**Viento y Arquitectura**”, Editorial Trillas, México, D.F, 1995.
- 3 Robinette, G. O. “**Landscape Planning for Energy Conservation**”, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1983.
- 4 Chavez, J. R., op.cit.
- 5 Chavez, J. R., op.cit.
- 6 Oke, T. R. “**Boundaru Layer Climates**”, 2ª edición, Routledge, London, 1990.
- 7 Oke, T. R., 1990, op. cit.
- 8 Robinette, op. cit.
- 9 López de Asiain, J. “**Espacios abiertos en la Expo 92**”, Colección Textos de Arquitectura, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, Sevilla, 1997.
- 10 Guerra Macho, J.J. Álvarez Domínguez, S., Molina Félix, J. L., Velázquez Vila, R. “**Guía Básica para el Acondicionamiento Climático de Espacios Abiertos**” Editorial CIEMAT, Madrid, 1994.
- 11 Olgyay, V. 1963, op. cit..
- 12 Givoni, B. “**Man Climate and Architecture**”, Applied Science Publishers, Londres, 1976.
- 13 Fanger, P. O., “**Thermal Comfort**”, McGraw-Hill Book Co., New York, 1972.
- 14 Mayer, H., Höpfe, P. “**Thermal Comfort o Man in Different Urban Enviroments**” Theoretical and Applied Climatology, no.38, Srpinge-Verlag, 1987.

- 15 Burt, J. E., O'Rourke, P. A., Terjung, W. H. "**The Relative Influence of Urban Climates on Outdoor Human Energy Budgets and Skin Temperature, I. Modeling Considerations**" International Journal of Biometeorology, vol. 26, no. 1, 1982.
- 16 Brown, R. D., Gillespie, T. J. "**Microclimatic Landscape Design**", John Wiley and Sons, Inc., New York, 1995.
- 17 Oke, T. R. "**Street design and Urban Canopy Layer Climate**", Energy and Buildings, no. 11. 1988, pp.103-113.
- 18 Heisler, G. M. "**Mean windspeed below building height in residential neighborhoods with different tree density**", ASRAE Transactions, 1990.