



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE TECHOS  
VERDES COMO AGENTES AHORRADORES DE  
ENERGÍA EN MÉXICO**

**PROPUESTA DE T E S I S**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO MECÁNICO**

P R E S E N T A:

TONATIUH BARAHONA SÁNCHEZ

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. JOSÉ LUIS FERNÁNDEZ ZAYAS

*Ciudad Universitaria, México D.F, marzo de 2011*





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# **TABLA DE CONTENIDO**

## **1 Introducción**

## **2 Antecedentes**

**2.1 ¿Qué es un Techo Verde?**

**2.2 Elementos de un Techo Verde**

**2.3 Tipología de los Techos Verdes**

**2.3.1 Techos Verdes Intensivos**

**2.3.2 Techos verdes Extensivos**

**2.4 ¿Dónde se pueden instalar?**

**2.5 ¿Cuál es el costo?**

**2.6 Paredes Verdes**

## **3 Análisis Térmico de un Techo Verde**

**3.1 Introducción**

**3.2 Conceptos básicos**

**3.2.1 Conducción**

**3.2.2 Convección**

**3.2.3 Resistencia Térmica**

**3.3 Modelado**

## **4 Viabilidad del Techo Verde en México**

**4.1 Casos de Estudio**

**4.2 Resultados**

## **5 Conclusiones**

## **6 Bibliografía**

## 1. INTRODUCCIÓN

Los techos y paredes verdes (living roofs and walls) pueden mejorar la biodiversidad, reducir el riesgo de inundación (por medio de la retención de agua de lluvia), mejorar el desempeño térmico de una casa o edificio, y atenuar así los costos asociados a energía eléctrica, ayudar a contrarrestar el Efecto de Isla de Calor Urbana (Urban Heat Island Effect), apoyar al desarrollo sustentable y mejorar la apariencia de la ciudad.



*Musée du quai Branly, Paris.*

El objetivo principal de este trabajo es proveer un argumento científico sencillo, mediante un análisis de transferencia de calor, que demuestre que la implementación de techos verdes mejora el desempeño térmico de una edificación provocando en consecuencia un ahorro energético.

Otra meta importante es proponer que los techos verdes se consideren como parte integral de un edificio, logrando maximizar el uso que se le podría dar a los techos y azoteas de la ciudad de México, zonas que por lo general se encuentran subutilizadas.



*Cannon Street Station, Londres.*

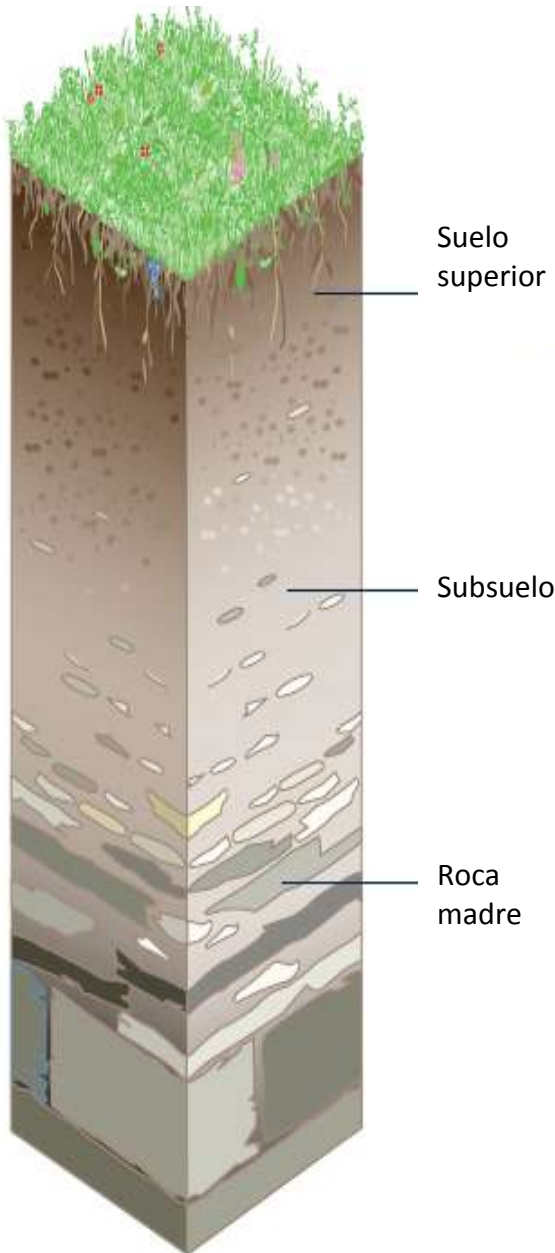
Utilizar este tipo de tecnología permitiría abrir espacios que acerquen a la naturaleza a la vida cotidiana, contribuyendo de manera tangible a la protección y mejora del medio ambiente dentro del contexto urbano. Esto sin mencionar el impacto que tendrían los techos verdes en la cultura mexicana hacia la conservación del medio ambiente y el desarrollo sustentable, y el gran beneficio estético que estos son capaces de alcanzar.

## 2. ANTECEDENTES

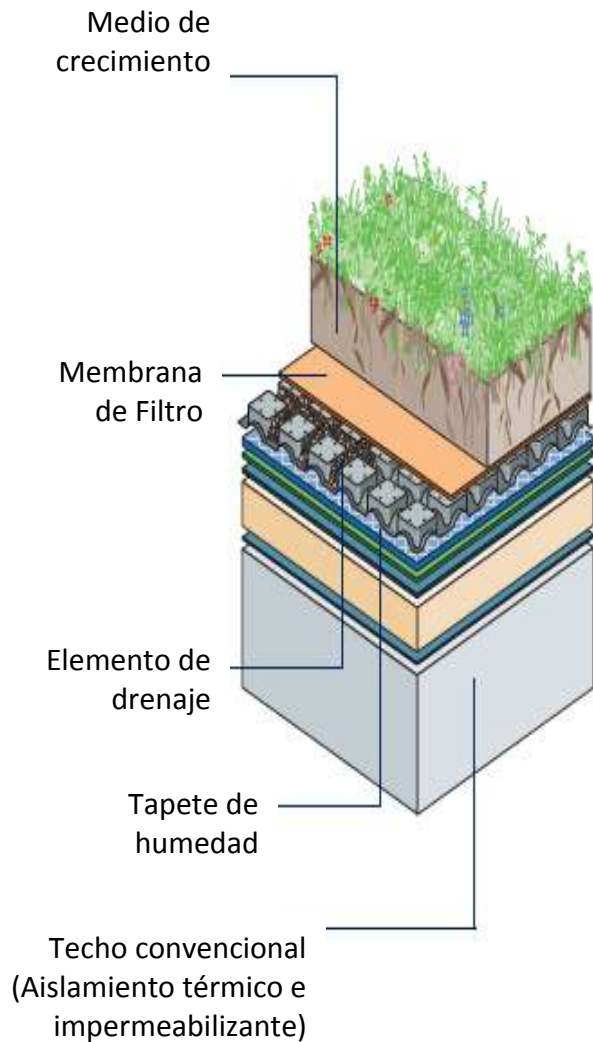
### 2.1 ¿QUÉ ES UN TECHO VERDE?

Es un tipo de techo diseñado para recrear las condiciones naturales de los substratos del suelo. Esto permite albergar y sostener distintos tipos de vegetación, desde arbustos, céspedes y plantas pequeñas, hasta árboles de tamaño mediano.

#### **Estructura de Suelo Típica**

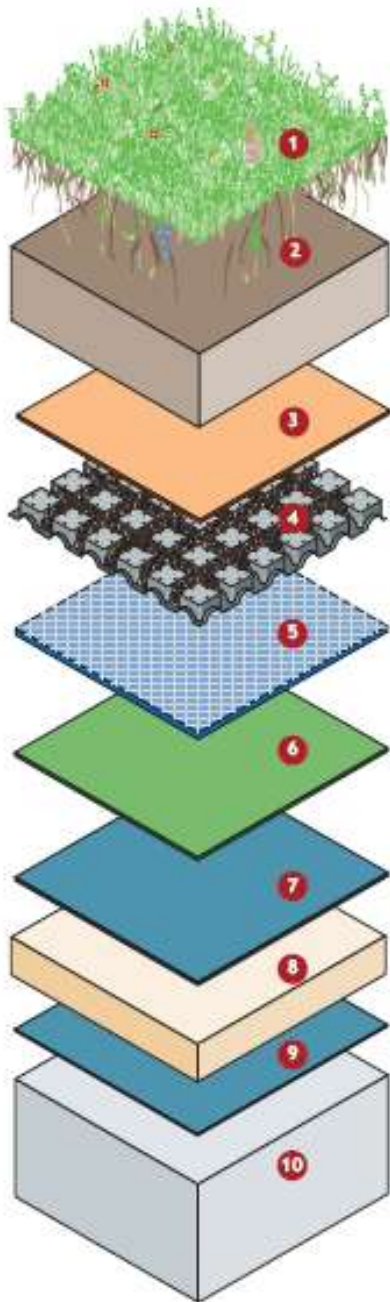


#### **Estructura Estratigráfica de un Techo Verde**





## 2.2 ELEMENTOS DE UN TECHO VERDE



1. **Vegetación.** Los techos verdes extensivos incluyen principalmente plantas resistentes a la sequía y del género *Sedum*. Los techos intensivos pueden albergar una amplia gama de plantas y arbustos.
2. **Medio de Crecimiento o Sustrato.** Debe tener una estructura balanceada y peso ligeros. Los valores de pH, nutrientes, porosidad y permeabilidad deben ser adecuados. El tipo y espesor del sustrato determinará el crecimiento de la planta así como la carga estructural impuesta sobre el techo.
3. **Filtro.** Su función es evitar que las partículas del sustrato pasen a la capa de drenaje.
4. **Capa de Drenaje.** Retiene el agua de lluvia en los perfiles diseñados (*troughs*), inclusive en superficies inclinadas. El exceso de agua es drenado a través de los canales situados entre los perfiles. Agujeros colocados estratégicamente proveen el flujo de aire necesario para que la humedad se transmita hacia el sustrato.
5. **Tapete de Humedad.** Hecho de un material que no se degrada, sirve para retener la humedad y nutrientes y para proteger la capa anti-raíz y la membrana impermeabilizante.
6. **Capa Anti-Raíz.** Impide que las raíces dañen la membrana impermeabilizante.
7. **Membrana Impermeabilizante.** Se recomienda el uso de membranas especialmente manufacturadas para este tipo de techos.
8. **Aislante Térmico.** Situado por debajo de la membrana impermeabilizante para formar una construcción tipo *warm roof*.
9. **Capa de Control de Vapor.** Situada entre el nivel estructural del techo y el aislante térmico para evitar la condensación.
10. **Nivel estructural del Techo.** Debe ser diseñado para soportar el peso del techo verde y cualquier carga viva.

## 2.3 TIPOLOGÍA DE LOS TECHOS VERDES

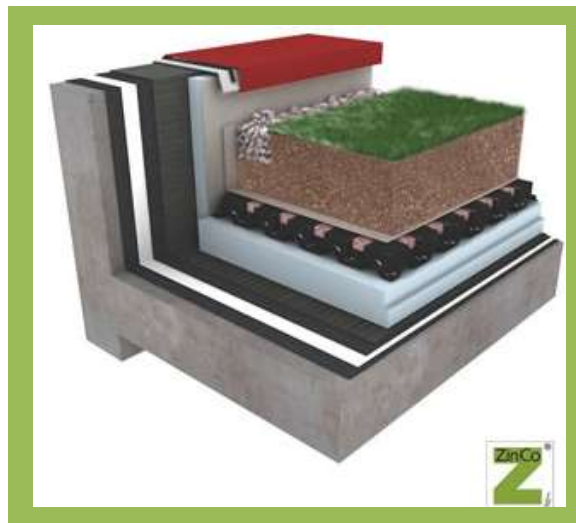
La siguiente clasificación se basa principalmente en la construcción y el uso que se le da a los techos verdes así como en los beneficios hacia el individuo y la sociedad. Esta clasificación se divide en techos verdes intensivos y extensivos.

### **2.3.1 Techos Verdes Intensivos**

Este tipo de techos está diseñado para amenizar y normalmente son accesibles para usos recreativos. En ocasiones se refieren a ellos como *roof gardens*.

Por lo general los techos verdes intensivos comprenden una vegetación exuberante y son sembrados sobre un substrato profundo y rico en nutrientes.

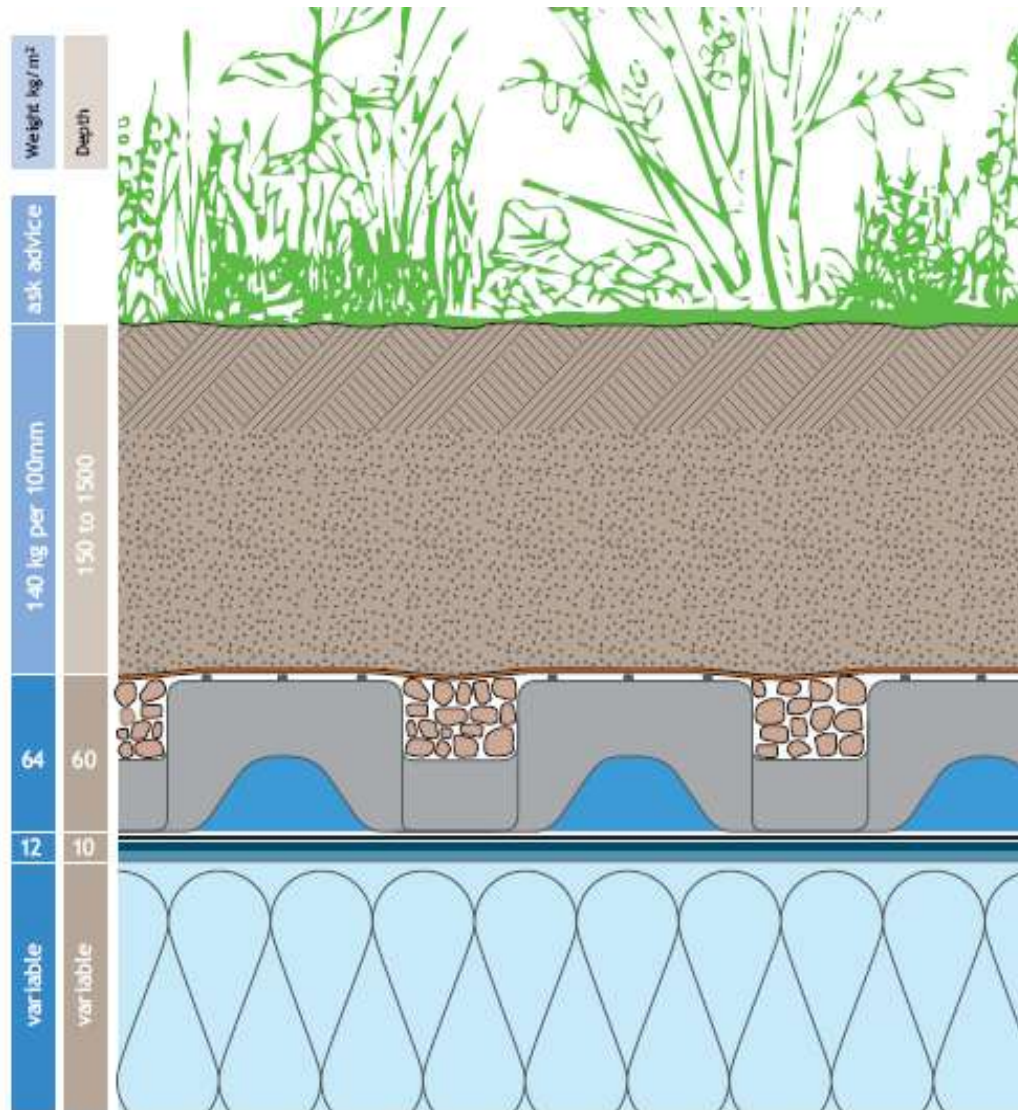
Por el tipo de vegetación que albergan estos techos es necesario un mantenimiento regular, así como el riego y aplicación de fertilizante.



Debido al tipo de vegetación usada y la combinación de propiedades de crecimiento y drenaje del substrato, el peso de un sistema de techo verde intensivo puede ser considerable. Generalmente se requiere un refuerzo sustancial a una estructura de techo existente o la inclusión de soporte estructural adicional.

En la figura que se muestra a continuación se puede apreciar la estructura convencional de los techos verdes intensivos, así como el peso y profundidad de las capas que lo constituyen.





*Fig. 1 Estructura convencional de un techo verde intensivo.*

### 2.3.2 Techos Verdes Extensivos.

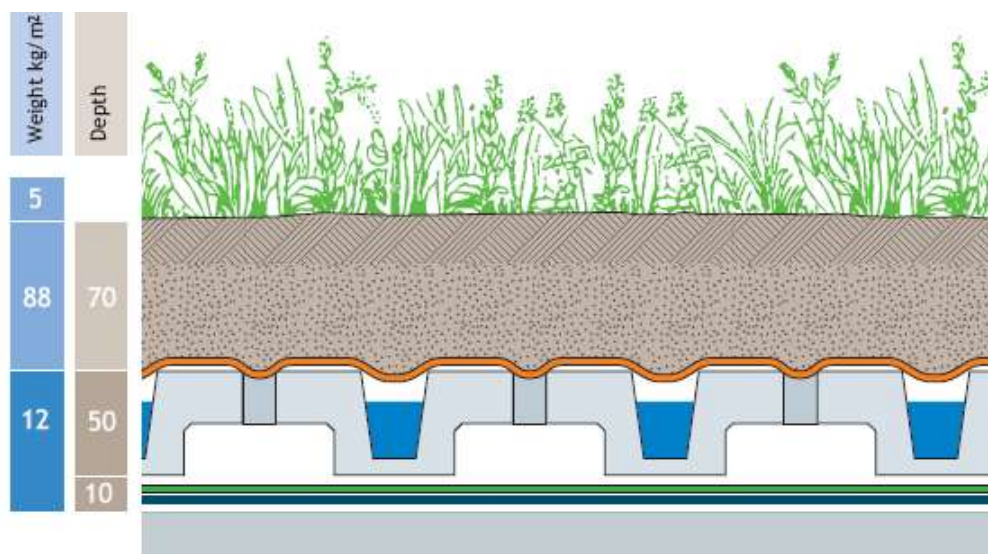
Los techos verdes extensivos proveen generalmente una mayor biodiversidad que los techos verdes intensivos, pero son considerados menos apropiados para amenizar y dar beneficios recreativos. En la mayoría de los casos son plantados con, o colonizados por, musgos, flores silvestres y



pastos capaces de sobrevivir en sustratos bajos en nutrientes y poco profundos. Reciben mantenimiento mínimo y no necesitan irrigación o fertilizantes. Usualmente son más baratos de instalar que los techos verdes intensivos y es menos costoso mantenerlos.

Los dos principales tipos de techos verdes extensivos son:

- Los sistemas tipo tapete – tienen suelos poco profundos, típicamente entre 20-40 mm, están previamente sembrados para proporcionar cobertura instantánea del 100% y generalmente consisten de especies del género *Sedum* (plantas adaptadas a la sequía debido a su capacidad para retener agua). El suelo poco profundo de este tipo de sistemas retiene menos agua de lluvia y ofrece ventajas limitadas para la biodiversidad.
- Los sistemas están basados en sustratos – se encuentran entre los 75mm y 150mm de profundidad y están constituidos por un medio poroso. Se pueden plantar especies del tipo *Sedum* y flores silvestres. Este sistema puede albergar una mayor cantidad de especies, retener mucha mayor cantidad de agua de lluvia y tener mejores propiedades de evapotranspiración. Una desventaja potencial es que son más pesados que los sistemas tipo tapete y les toma tiempo cubrir de vegetación el 100% de la superficie.



**Fig. 2** Estructura convencional de un techo verde extensivo.

Los techos verdes extensivos son apropiados para techos de altos niveles en los nuevos desarrollos o para la modernización (*retrofitting*) de edificios existentes.

## 2.4 ¿DÓNDE SE PUEDEN INSTALAR?

Se pueden instalar techos verdes casi en cualquier superficie de entrepiso o azotea, ya sea plana o inclinada; sin embargo es muy importante que se haga una revisión de la estructura para asegurarse que el techo pueda resistir el peso de las diferentes capas, sustrato (medio de crecimiento) y vegetación que un techo verde implica. Las cargas estructurales promedio para los tres tipos de techo verde se muestran en la siguiente tabla.

Tipo de Techo	Carga
Extensivo (tapete sedum)	60 - 90 Kg/m <sup>2</sup>
Extensivo (sustrato)	80 - 150 Kg/m <sup>2</sup>
Intensivo	200 - 500 Kg/m <sup>2</sup>

Dentro del orden jurídico, las normas de diseño y construcción indican que la carga mínima que debe resistir un techo convencional es de 200 – 500 Kg/m<sup>2</sup>, dependiendo del tipo de ocupación. Por ejemplo, para una ocupación residencial, escuela o de oficina la carga mínima es de 200 Kg/m<sup>2</sup>.

Como se puede apreciar la sobrecarga que representan los techos verdes extensivos se encuentra dentro de un rango aceptable y seguro. Los de tipo intensivo requerirán un refuerzo estructural adicional si se desean implementar sobre edificaciones ya existentes. Estos valores de carga mínima dejan en claro que adoptar un techo verde es un proyecto viable que no necesariamente requiere de una inversión adicional para reforzar la estructura ya existente.

## 2.5 ¿CUÁL ES EL COSTO?

### Costos indicativos para Techos Verdes

Tapete Sedum	\$700-800/m <sup>2</sup>
Tapete Sedum con capa de drenaje y filtro	\$900-1300/m <sup>2</sup>
Tapete Sedum con filtro y capa de drenaje, capa de control de vapor y capa de aislamiento	\$1600-2300/m <sup>2</sup>
Medio de crecimiento de 250 mm de espesor con capa de drenaje, membranas antiraíz y capa aislante	\$1700-2000/m <sup>2</sup>
Medio de crecimiento de 600 mm (intensivo) de espesor con capa de drenaje, membranas antiraíz y capa aislante	\$2800-3200/m <sup>2</sup>

## 2.6 ¿QUÉ ES UNA PARED VERDE?



*Paradise Park, Londres.*

Las paredes verdes son aquellas que están cubiertas por vegetación. Usualmente comprenden plantas trepadoras de algún tipo, y están diseñadas para soportar dicha vegetación. De una manera más reciente, las paredes verdes se construyen para proveer estructura adicional en la que es posible plantar vegetación. Dependiendo de las especies utilizadas en las paredes verdes estas pueden proporcionar beneficios

ambientales en la forma de biodiversidad, aislamiento térmico y atenuación de ruido.

El beneficio ambiental y económico de los techos y paredes verdes es difícil de ignorar. Un ejemplo del desarrollo e implementación de estas soluciones de bioingeniería son los proyectos y las políticas que están siendo adoptados en la ciudad de Londres. La

Autoridad Gubernamental de Londres (GLA) estima que los edificios cubren una superficie de 24,000 hectáreas o 16% de la ciudad de Londres<sup>1</sup>. Cálculos aproximados del potencial para techos verdes en cuatro áreas del centro de Londres sugieren que de una superficie de 10 millones de m<sup>2</sup>, 3.2 millones de m<sup>2</sup> tienen el potencial para implementar estos tipo de techumbres. Esto representaría un ahorro potencial de 19,200 MWh por año, que equivale a dejar de emitir 8,256 toneladas de CO<sub>2</sub>, y una capacidad para almacenar agua de lluvia de 80,000 m<sup>3</sup>, cantidad necesaria para llenar aproximadamente 35 albercas olímpicas. Existen muchas variables que puedan alterar estos cálculos de una forma u otra, pero no hay duda de que la contribución de los techos y paredes verdes a este respecto sería abrumadoramente positiva y sustancial.

En los capítulos siguientes se explicarán de manera más detallada las características de los beneficios más importantes.

---

<sup>1</sup> Mayor of London, *Connecting with London's nature – the Mayor's Draft Biodiversity Strategy*. Greater London Authority 2001.



## **3. ANÁLISIS TÉRMICO**

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

Como se mencionó con anterioridad, el objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo un análisis térmico de los techos verdes con el fin de demostrar que este tipo de tecnología provee un ahorro energético sobre las edificaciones en las que se implemente.

Para hacer el análisis térmico es necesario revisar conceptos básicos de transferencia de calor y revisar las condiciones de modelado.

Este análisis está conformado por dos partes. La primera es el modelado de todas las capas de los techos verdes como una red de resistencias térmicas. La segunda es un análisis breve de las variables a tomar en cuenta en el balance energético de los techos verdes, con especial atención en la capa de vegetación, y el impacto que estas variables tienen sobre el desempeño térmico de estos techos.

El análisis aquí propuesto es sencillo y no tan profundo como podría hacerse. Consiste, en esencia, en una recopilación de distintos trabajos hechos con anterioridad alrededor de este tema y disponibles para quien desee profundizar en este asunto.

### **3.2 CONCEPTOS BÁSICOS**

El calor es la forma de energía que se puede transferir de un sistema a otro como resultado de la diferencia de temperatura. Un análisis termodinámico se interesa en la cantidad de transferencia de calor conforme un sistema pasa por un proceso, de un estado de equilibrio a otro. La transferencia de calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir de tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren una diferencia de

temperatura. A continuación se hará una descripción del modo de transferencia de calor que más interesa dentro del tema de los techos verdes.

### 3.2.1 Conducción.

La conducción es la transferencia de energía obtenida por las interacciones entre partículas adyacentes de una sustancia. La conducción puede tener lugar en los sólidos líquidos o gases. Por ejemplo, si calentáramos una placa de metal y después de unos momentos se pusiera esta sobre una mesa, llegaría el momento en que la placa y la mesa alcanzarían el equilibrio térmico como resultado de la transferencia de calor por conducción, de la placa hacia la mesa, a través del grosor del material del que este hecha la placa.

La rapidez o razón de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica de este, su espesor y el material del que está hecho, así como la diferencia de temperatura a través de él.

Considere una conducción de estado estacionario de calor a través de una capa plana grande de espesor  $\Delta x = L$  y área  $A$ , como se muestra en la figura. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la capa es  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor a través de una capa plana,  $\dot{Q}$ , es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y el área de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor de la capa, es decir,

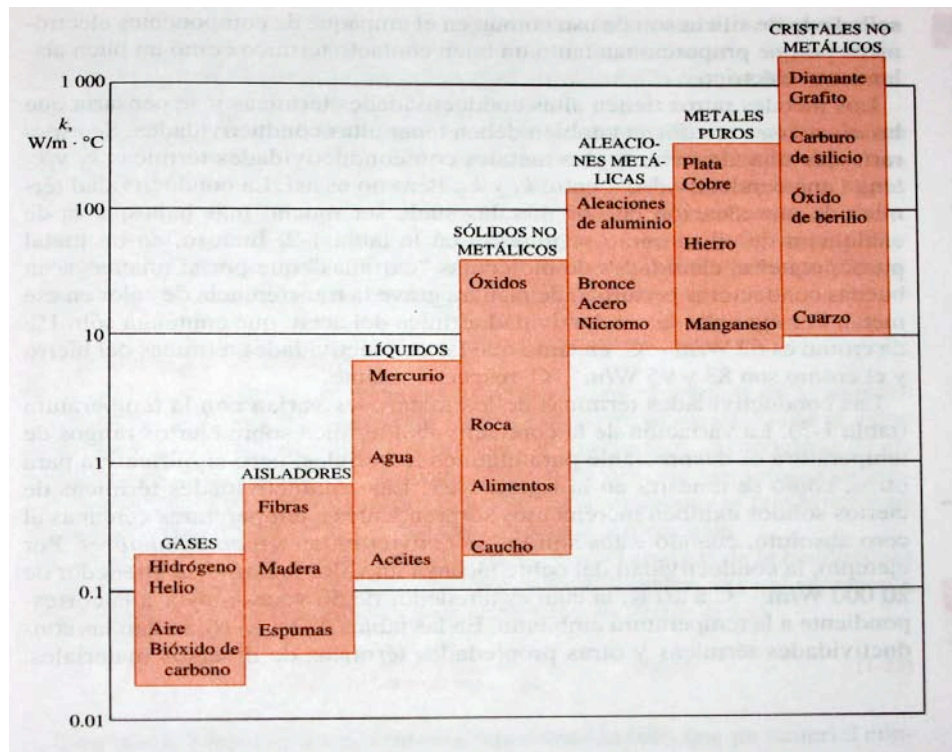
$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} [\text{W}]$$

En el caso límite de  $\Delta x \rightarrow 0$ , la ecuación que acaba de expresarse se reduce a la forma diferencial

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} [\text{W}]$$

la cual se llama Ley de Fourier de la conducción de calor.

En donde la constante de proporcionalidad  $k$  es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor de calor y un valor bajo indica que es un material aislante o mal conductor de calor. En la siguiente figura se muestra la clasificación de distintos materiales en función de su conductividad térmica.



**Fig. 3.** Rango de la conductividad térmica de distintos materiales a temperatura ambiente.

Debido a que los techos verdes están sujetos a las condiciones ambientales del lugar donde se encuentran es prudente también revisar el concepto de transferencia de calor por convención ya que la velocidad del viento y temperatura del aire son factores a tomar en cuenta.

### 3.2.2 Convección.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacentes que estén en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección.

A pesar de la complejidad de la convección, la rapidez de transferencia de calor por esta forma es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa de forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) [W]$$

en donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en  $[W/m^2C]$ ,  $A_s$  es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie.

El coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de toda las variables que influyen sobre la convección.

### 3.2.3 Resistencia térmica

La ley de Fourier de la conducción de calor para una pared plana de espesor  $L$  se puede expresar como

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} [W]$$

Al integrar la ecuación anterior

$$\int_{x=0}^L \dot{Q} dx = -kA \int_{T=T_1}^{T_2} dT$$

Se obtiene

$$\dot{Q} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \text{ [W]}$$

Que también es posible reacomodar para la conducción a través de una pared plana como

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{pared}}} \text{ [W]}; \text{ donde } R_{\text{pared}} = \frac{L}{kA} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

Es la resistencia térmica de la pared en contra de la conducción de calor o, simplemente, la resistencia a la conducción.

Se puede hacer lo mismo para obtener la resistencia térmica a la convección partiendo de la ley de enfriamiento de Newton,

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \text{ [W]}$$

Obteniendo así

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{\text{conv}}} \text{ [W]}$$

donde

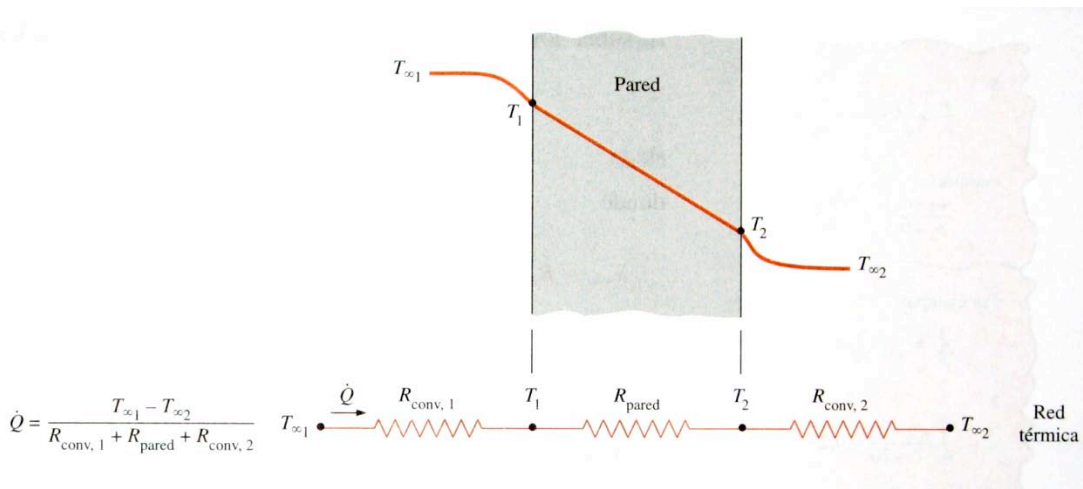
$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA_s} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

Es la resistencia a la convección.

Estas dos resistencias permiten modelar una buena parte de la transferencia de calor a través de los techos verdes mediante una red de resistencias térmicas. Como se vio en la introducción, los techos verdes están constituidos por distintas capas de materiales. Desde el suelo o medio de crecimiento y la vegetación, hasta las capas anti-raíz y de impermeabilizado.

A continuación se muestra, en la figura 4, cómo sería el modelado de una red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared plana sujeta a convección por ambos lados.

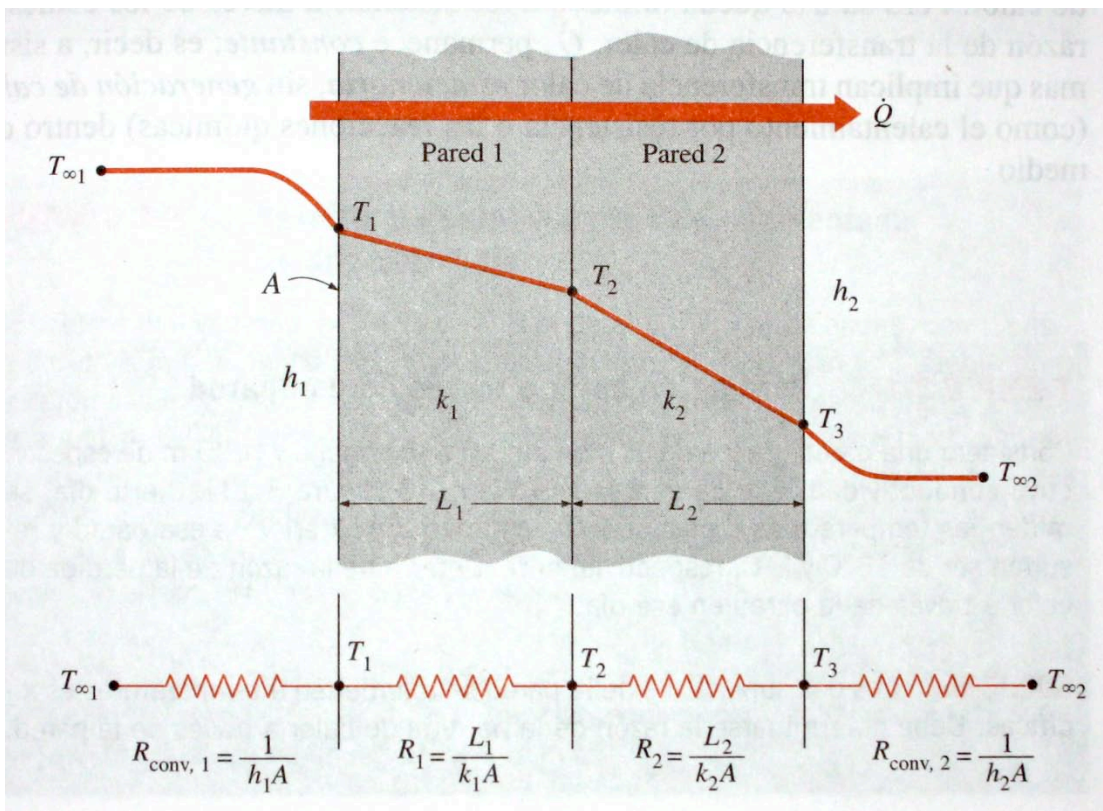




**Fig. 4.** Red de resistencias térmicas y su analogía eléctrica.

Como

se muestra a continuación en la figura 5 se puede aplicar el concepto de resistencia térmica a más de una capa.



**Fig. 5.** Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de una pared plana de dos capas sujeta a convección por ambos lados.

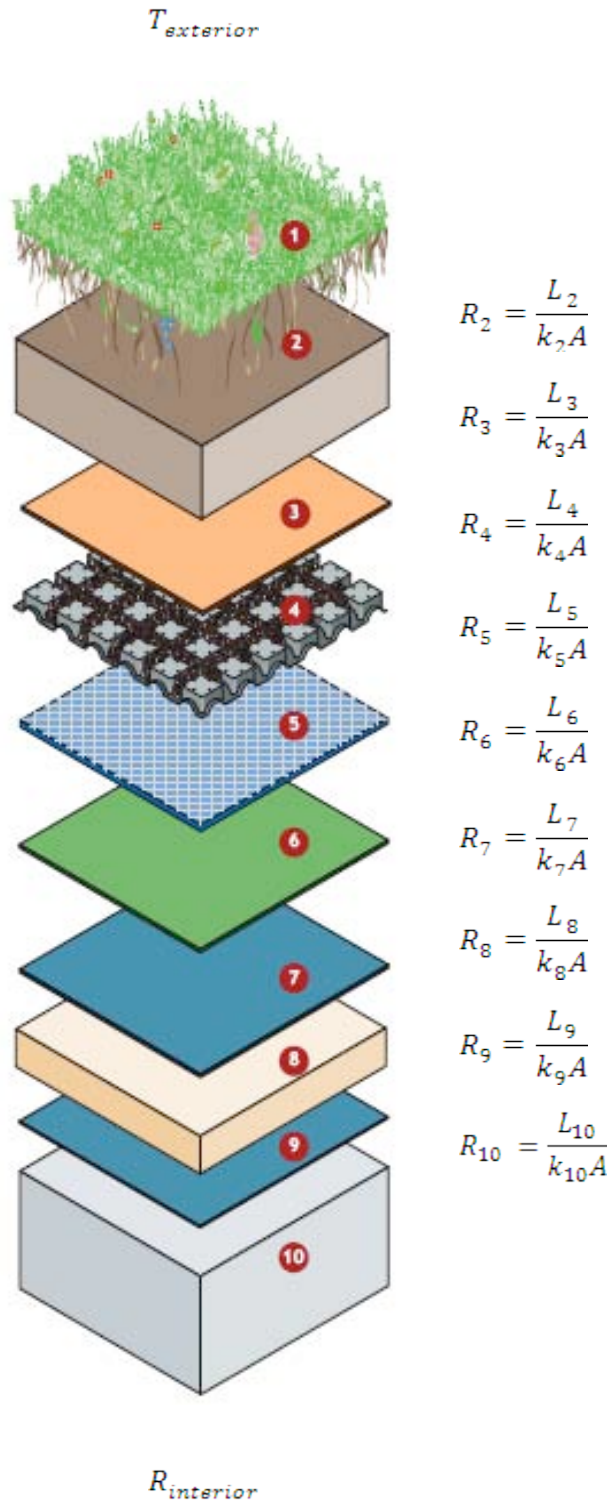
### 3.3 Modelado

Aplicaremos ahora todo lo que hemos visto para dar forma a un modelo sencillo que nos explique la trayectoria del flujo de calor a través de un techo verde.

Es importante mencionar que gran parte del ahorro energético que proveen los techos verdes se debe a que sus distintos componentes desempeñan el papel de resistencias térmicas. Esta función es la de mayor impacto y por lo tanto es a la que más atención se le debe dedicar durante el modelado.

Se expondrá, asimismo, las ecuaciones que modelan la transferencia de calor en la capa de vegetación. Dichas ecuaciones son la base del motor de cálculo que utiliza el software de simulación que se implementó en la última parte de este trabajo. El software de simulación se sirvió para proyectar distintos escenarios y oportunidades en donde pudieran utilizarse las azoteas verdes en México.

Para modelar lo que sucede en el suelo y los efectos sobre la transferencia de calor por conducción, cada capa del techo verde será modelada como una resistencia térmica. Esto expresado en un esquema quedaría de la siguiente manera:



**Fig. 6.** Red de resistencias térmicas para la transferencia de calor a través de un techo verde.

Podemos ahora expresar el flujo de calor a través de estas capas de la siguiente manera

$$\dot{Q} = \frac{T_{ext} - T_{int}}{R_{total}} [W]$$

Donde  $R_{total}$  es la suma de todas las resistencias térmicas.

Como se puede apreciar en el esquema, el calor encontrará dificultades para fluir de un extremo a otro debido a la cantidad de materiales que conforman un techo verde. Además estos materiales tienen bajas conductividades térmicas lo que provocará que el paso del calor sea aún más lento.

Para este modelado no tomé en cuenta la resistencia a la convección en la parte exterior ni la transferencia de calor en la primera capa del techo verde porque, como se verá más adelante, lo que sucede a nivel del follaje o vegetación es regido principalmente por la radiación solar.

Podemos concluir entonces que la dificultad con la que el calor puede fluir del medio ambiente al interior de una edificación se debe en gran parte a la resistencia que este encuentre a su paso. Una manera de expresar esta dificultad es a través del coeficiente de transferencia de calor.

Este coeficiente es el recíproco de la resistencia total  $U = \frac{1}{R_{total}}$  y puede variar dependiendo del tipo de armado del techo verde, donde el factor más influyente es la profundidad del sustrato. Mientras más profunda sea la capa del sustrato mayor será la resistencia térmica y más pequeño será el coeficiente de transferencia de calor.

Como se mencionó, se expondrán las ecuaciones que rigen la transferencia de calor en la capa de vegetación. Se empezará con una introducción sencilla al trabajo desarrollado por D. J. Sailor titulado *A green roof model for building energy simulation programs* (Sailor, 2008). El modelo matemático propuesto en este trabajo es el motor de cálculo sobre el cual opera un software de simulación que se utilizó para la parte final de esta tesis.

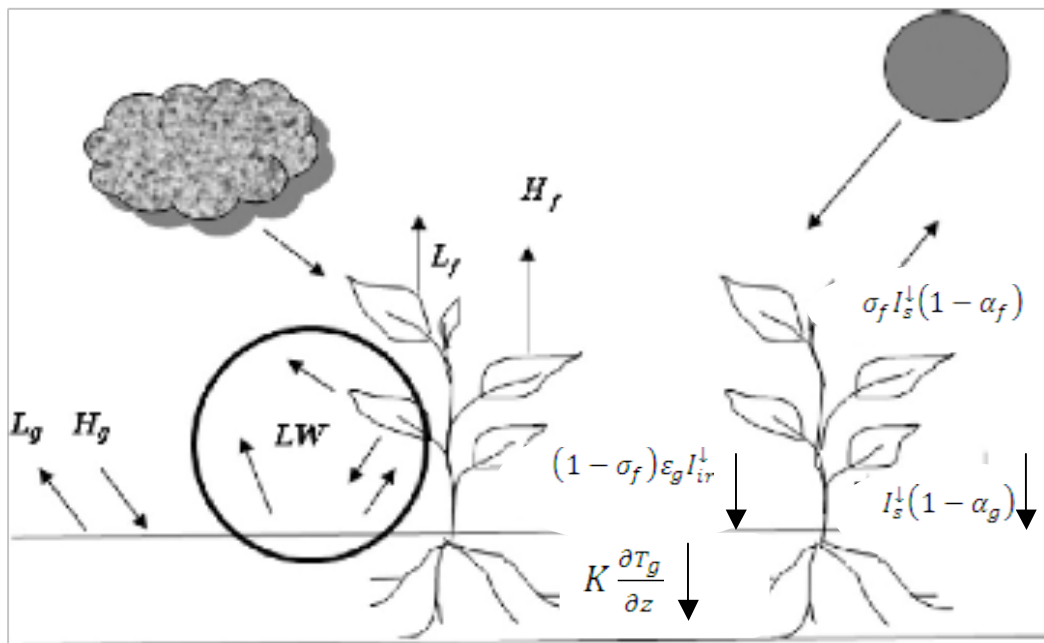
Este modelado toma en consideración el intercambio que se lleva a cabo por radiación de onda larga y onda corta bajo la cobertura o sombra que crean las plantas; Los efectos de esta cobertura en la transferencia de calor por convección; evapotranspiración del suelo y vegetación; y finalmente, conducción y almacenamiento de calor en la capa del suelo (por suelo entiéndase todas las capas que conforman un techo verde a excepción de la capa de vegetación).

Las características más importantes de la capa de vegetación desde el punto de vista de los impactos en la transferencia de calor a través del techo son: altura, índice de área de hoja (leaf area index o LAI), fracción de cobertura, albedo y resistencia de estoma.

El índice de área de hoja (LAI) es una representación del área de cobertura de las hojas en forma plana. Si en promedio la superficie de una parcela de techo se encuentra debajo de dos hojas el correspondiente LAI es 2. Los valores de este índice para techos verdes varían dependiendo del tipo de planta, sin embargo oscilan en el rango de 0.5 – 5.0. La fracción de cobertura esta relacionada con el índice de área de

hoja, pero es distinto de este. Específicamente representa la fracción de la superficie del techo que se encuentra directamente cubierta por una o más hojas. Es importante ya que dicta el rol de las características de radiación del sustrato en el balance energético de la superficie. El albedo es la reflectividad de la superficie. Finalmente, la resistencia de estoma es un parámetro biofísico que gobierna la tasa en la que la planta puede transpirar humedad a través de su estoma para condiciones ambientales dadas.

Como en un techo convencional, el balance energético de un techo verde esta gobernado por la radiación solar. Este balance energético se divide en flujo de calor sensible (convección) y latente (evaporación) de las superficies del suelo y las plantas, y la conducción de calor hacia el sustrato y radiación de onda larga de las superficies del suelo y hojas. Este balance se puede apreciar en la figura 7.



**Fig. 7.** Esquema del balance energético para un techo verde

Donde:  $L$  es el flujo latente de calor y  $H$  el flujo de calor sensible en  $[W/m^2]$ ;  $I_s$  es la radiación entrante de onda corta e  $I_{ir}$  es la radiación entrante de onda larga en



[W/m<sup>2</sup>]; y  $LW$  es la radiación de onda larga bajo la cobertura o sombra de la vegetación.

$\sigma_f$  es la fracción de cobertura;  $\alpha$  representa el albedo;  $T_g$  es la temperatura del suelo; y  $\varepsilon_g$  la emisividad de la superficie del suelo.

Los subíndices  $f$  y  $g$  se refieren a las capas de follaje (foliage layer) y suelo (ground layer) respectivamente.

Como lo indican los subíndices, el balance energético se divide en dos partes. Una para la capa del follaje o vegetación y otra para la capa del suelo.

Para la capa de vegetación el balance energético queda de la siguiente manera,

$$F_f = \sigma_f [I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f$$

Además de la transferencia de calor por convección y flujo de calor sensible, esta ecuación toma en cuenta la radiación de onda corta y larga absorbida por la vegetación, incluyendo los efectos por reflexiones múltiples.

Para el suelo el balance energético queda como,

$$F_g = (1 - \sigma_f) [I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g T_g^4] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z}$$

En donde, para ambas ecuaciones  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

Los términos de flujo de calor sensible y latente ( $H$  y  $L$ ) de ambas ecuaciones así como la solución del balance de energía es complicado ya que contiene términos no lineales y no se explicaran en este trabajo.

Como se puede apreciar, el trabajo innovador de Sailor (2008) permite establecer un modelo matemático que integra en su análisis la resistencia al flujo del calor que la capa de la vegetación implica. La inclusión de la radiación solar como factor

determinante (sino es que fuerza impulsora) en este análisis invita a pensar que con un debido esfuerzo matemático y experimental podría llegar a formularse un equivalente a una resistencia térmica por radiación (para techos verdes) que permita relacionar los efectos de la radiación solar y vegetación directamente con las dos resistencias térmicas clásicas (conducción y convección). Esto permitiría una simplificación en los cálculos de transferencia de calor haciendo que la adopción de este tipo de tecnología verde se diera en menor tiempo.

La aplicación del concepto de resistencia térmica al modelado de los techos verdes es importantísima porque ofrece muchas ventajas y facilita la cuantificación de los beneficios que estos techos ofrecen. Inclusive el modelo matemático propuesto por D. J. Sailor se puede ver desde esa perspectiva, facilitando aún más el cálculo de los beneficios en el rubro de ahorro energético.

Los efectos de otras variables, como el tipo de vegetación utilizado, contribuyen también al ahorro energético pero en menor medida.

El aumento o disminución en el grosor de las capas que conforman un techo verde y por ende el aumento o disminución de la resistencia térmica total es nuestra variable de mayor interés.

## 4. VIABILIDAD DEL TECHO VERDE EN MÉXICO

### 4.1 CASOS DE ESTUDIO

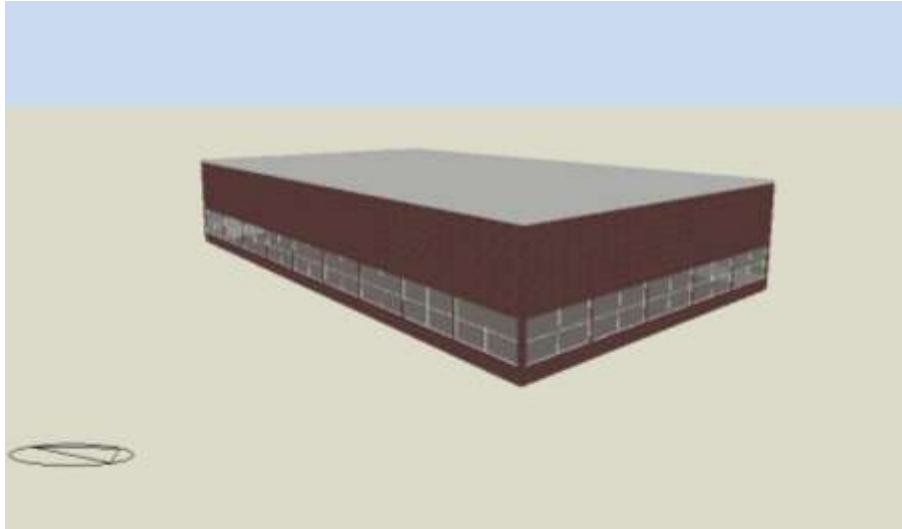
En este último capítulo se revisarán una serie de casos que involucran a los techos verdes como agentes de ahorro energético y se analizará su desempeño, con el objetivo de obtener resultados que permitan determinar que tan viable sería incorporar esta tecnología verde, de manera más entusiasta, en México.

Para hacer esto lo que se hizo fue diseñar un edificio convencional y someterlo a distintas condiciones ambientales con y sin el uso de los techos verdes. Las simulaciones que se llevaron a cabo fueron en periodos de un año con el objetivo de poder contar con la mayor cantidad de información posible, así como con resultados representativos para las distintas estaciones del año.

Se quiso encontrar en este modelado algún tipo de circunstancia en donde se pudiera explotar al máximo los beneficios térmicos que brindan los techos verdes. Esto llevó a pensar en los supermercados porque son edificaciones que cuentan con una gran superficie para la instalación de techos verdes y una demanda energética importante para mantener una temperatura de confort hacia el interior.

A continuación se muestran dos imágenes del modelo en 3D.





Este modelo se elaboró utilizando *Energy Plus* y *Design Builder*, que son plataformas especializadas en la simulación del desempeño energético de edificaciones. Se escogieron estas plataformas porque tienen la capacidad de modelar el consumo de energía, en intervalos de hasta 15 minutos, de un edificio sujeto a las distintas especificaciones de construcción, climáticas y tipo de uso. Estas plataformas de simulación permiten calcular y obtener información confiable, ya que utiliza bases de datos climatológicas de instituciones como la NASA, sobre el desempeño energético del modelo propuesto.

El modelo cuenta con una superficie de  $1250 \text{ m}^2$  y utiliza un sistema de aire acondicionado del tipo volumen constante *DX* (*direct expansion*). El tipo de actividad es de supermercado con una ocupación de 5 personas/ $100 \text{ m}^2$ . El techo verde utilizado es semi-extensivo con una profundidad de sustrato de 150 mm, una conductividad térmica de  $0.3 \text{ [W/m}\cdot\text{K]}$  y un calor específico de  $1000 \text{ [J/kg}\cdot\text{K]}$ . La temperatura de confort se estableció en  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se consideró, para el edificio de control, una techumbre sin aislamiento, lo más parecido a una losa estándar. La incorporación de los techos verdes se simuló como si se hubieran instalado sobre un edificio existente. En otras palabras, se colocaron sobre el techo diseñado para el edificio de control.

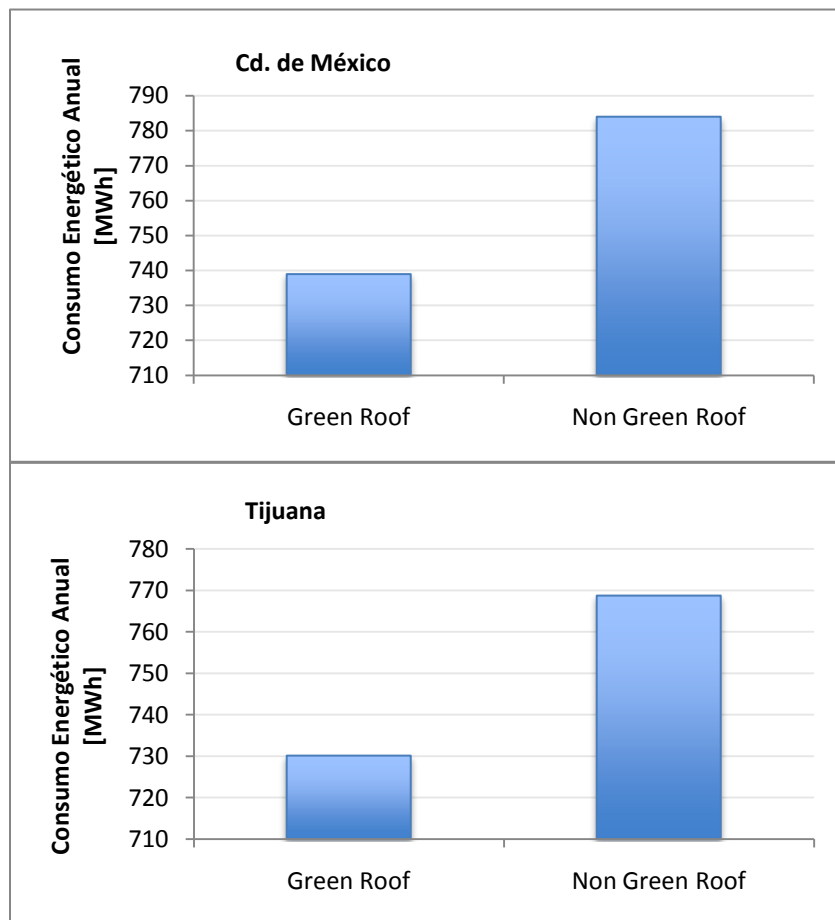
Además se consideraron 3 lugares con condiciones climáticas diferentes con el objetivo de observar el desempeño de las techos verdes y poder concluir si existe algún tipo de clima

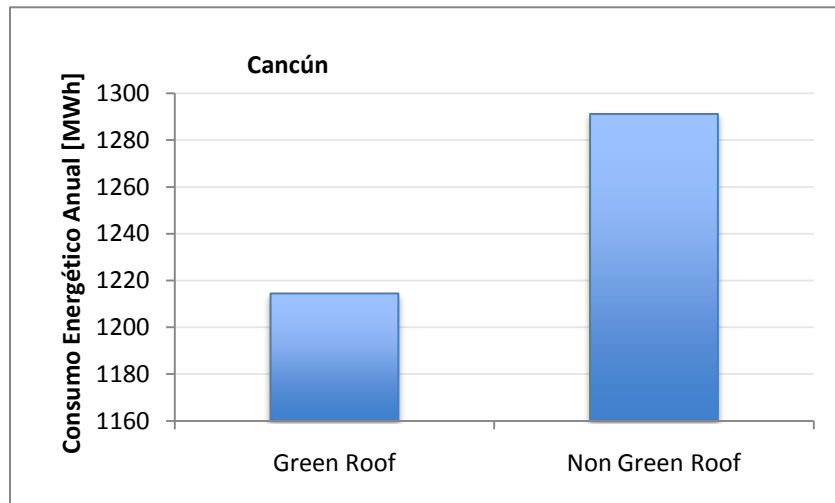
que favorezca la incorporación de dicha tecnología. Los lugares fueron La ciudad de México, Tijuana y Cancún.

#### 4.2 RESULTADOS.

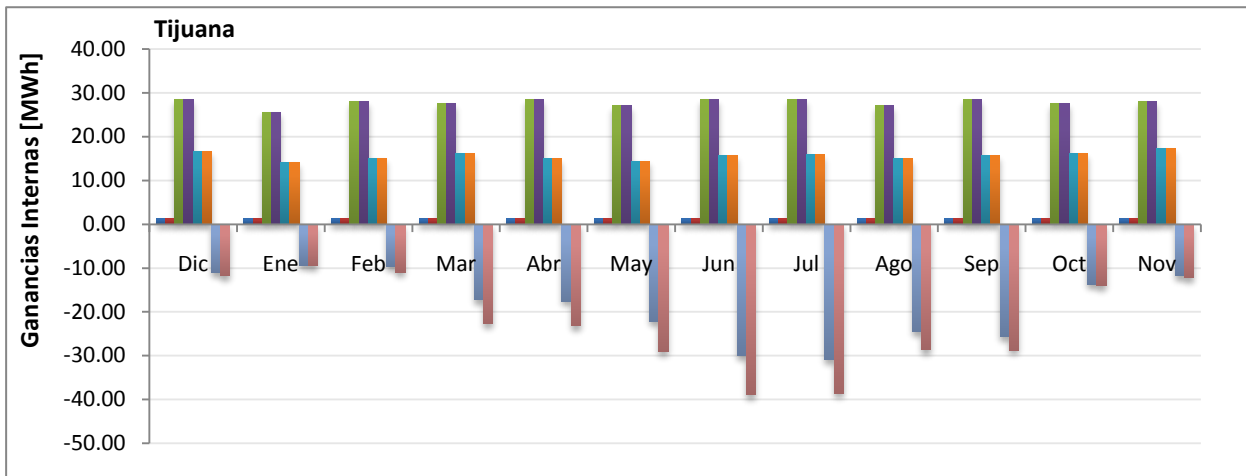
Los datos más relevantes para el presente trabajo tienen que ver con la demanda energética del edificio para satisfacer sus necesidades operativas y de confort. Esa información nos permite calcular el ahorro energético obtenido por la implementación de los techos verdes en cada caso.

En la ciudad de México se obtuvo una diferencia en el consumo eléctrico de 45,000 KWh, que representa un ahorro de 17%. En Tijuana fue del orden de 39600 KWh, esto significa un ahorro del 15.6 %. Finalmente en Cancún el ahorro alcanzó a ser de 76700 KWh, es decir, un 10%.

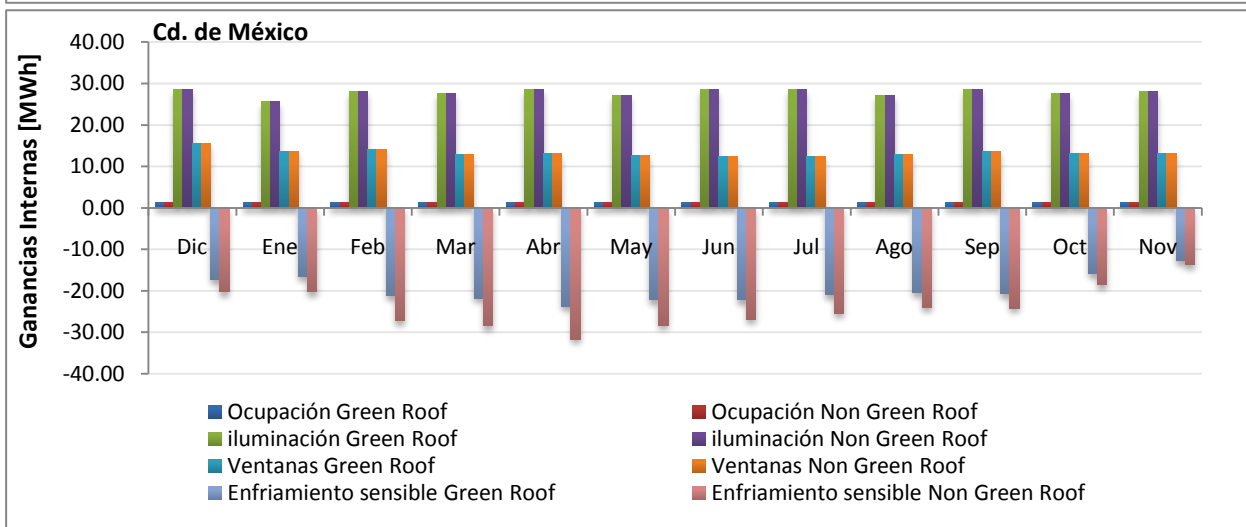
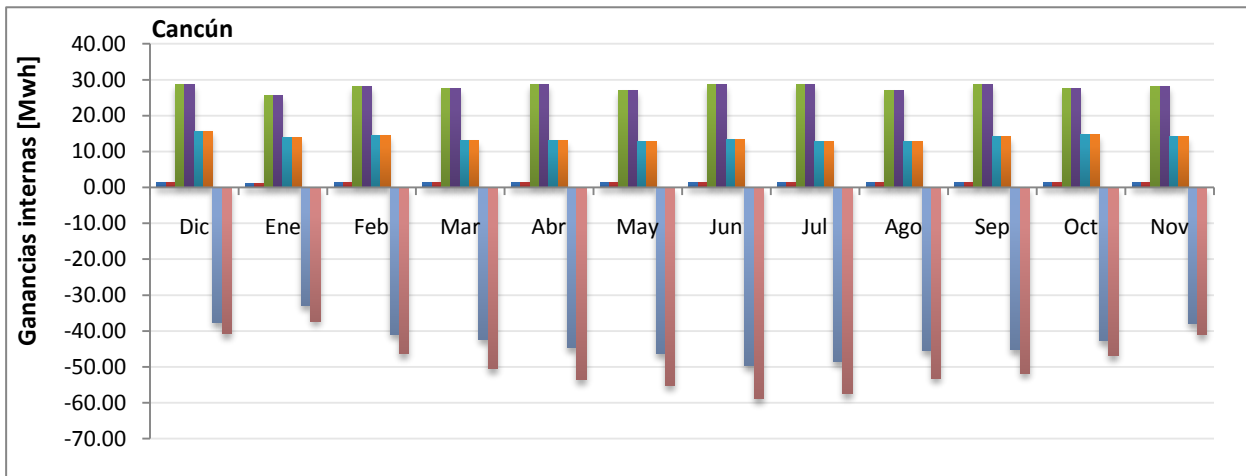




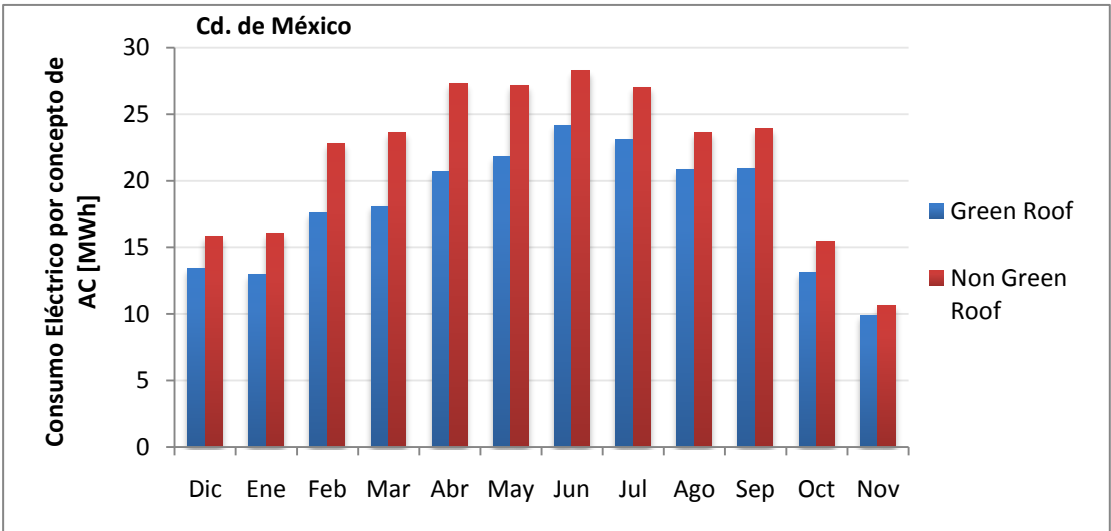
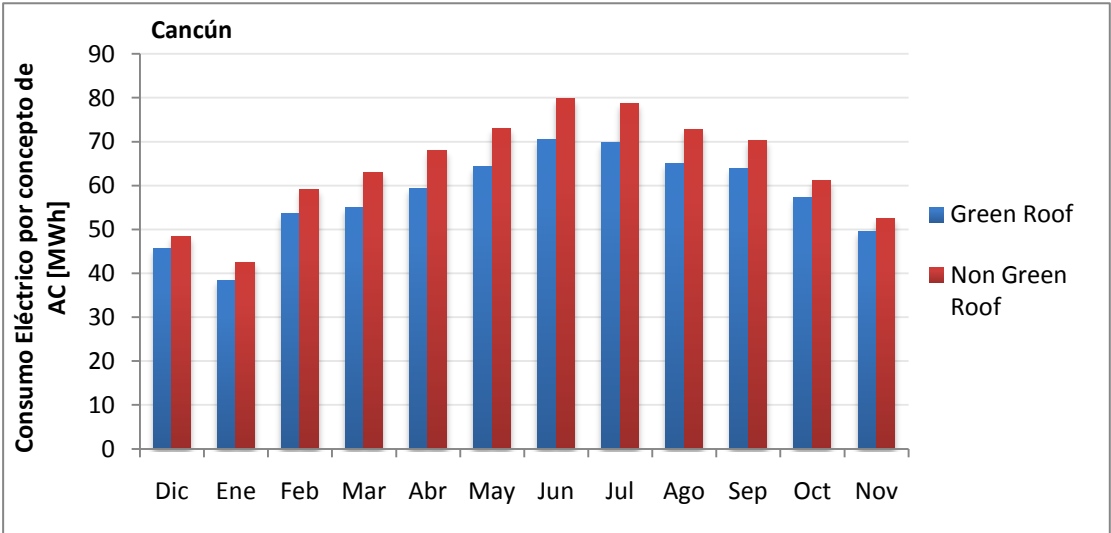
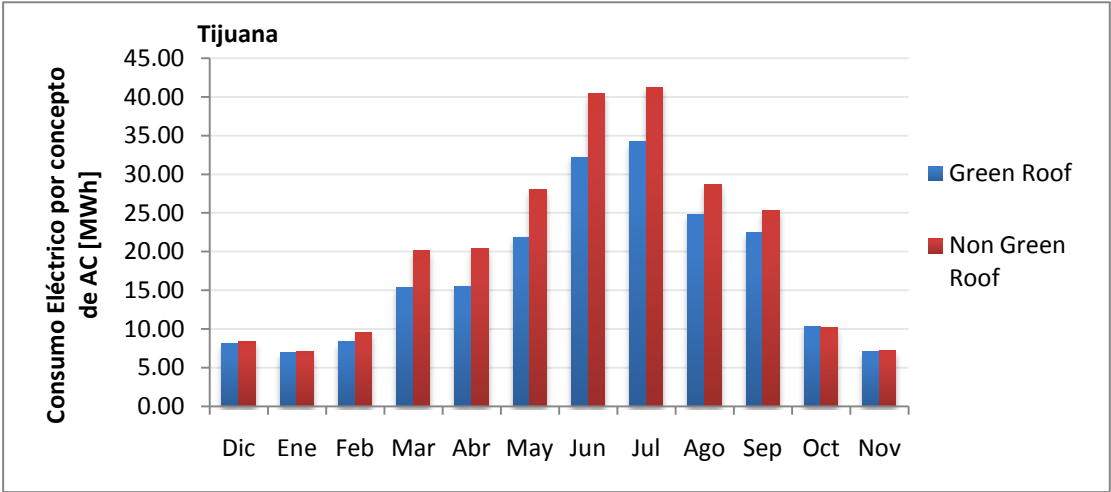
Con la información generada por las simulaciones también fue posible hacer una comparación de las ganancias internas de nuestro sistema, es decir, el edificio. Como se muestra a continuación, puede verse que la única variable que presenta una reducción para las tres ciudades es el enfriamiento sensible. Esto sólo confirma que, efectivamente, los techos verdes desempeñan el rol de aislantes térmicos. De esta manera se comprueba la propuesta de percibir al techo verde como una muy buena resistencia térmica dentro del rubro de los recubrimientos para edificios.







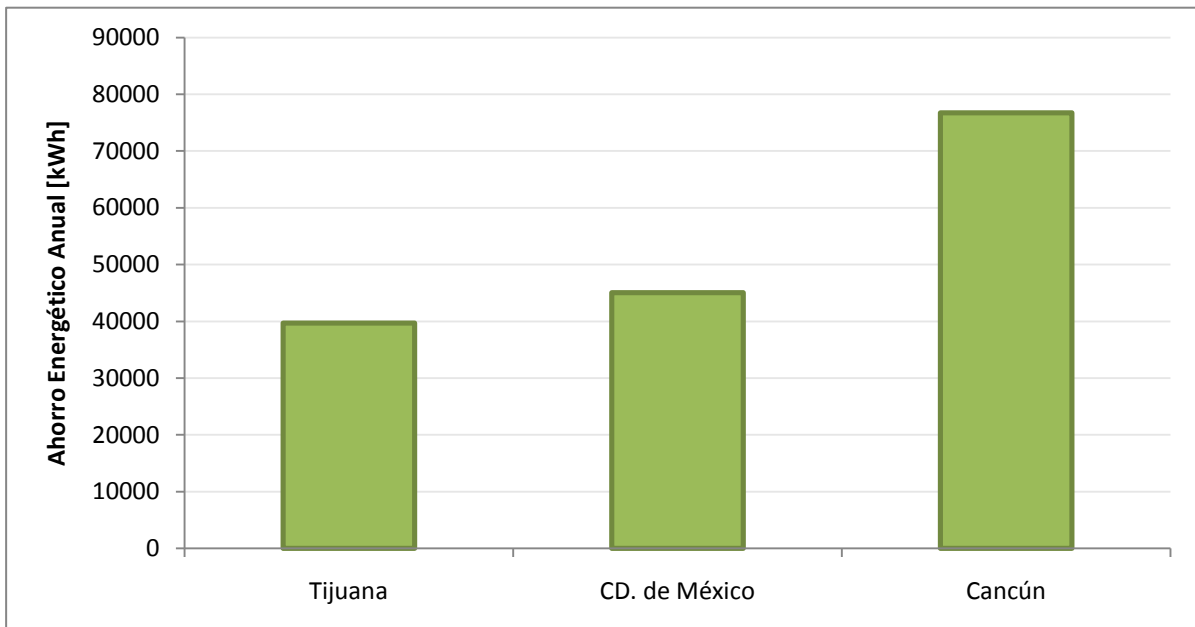
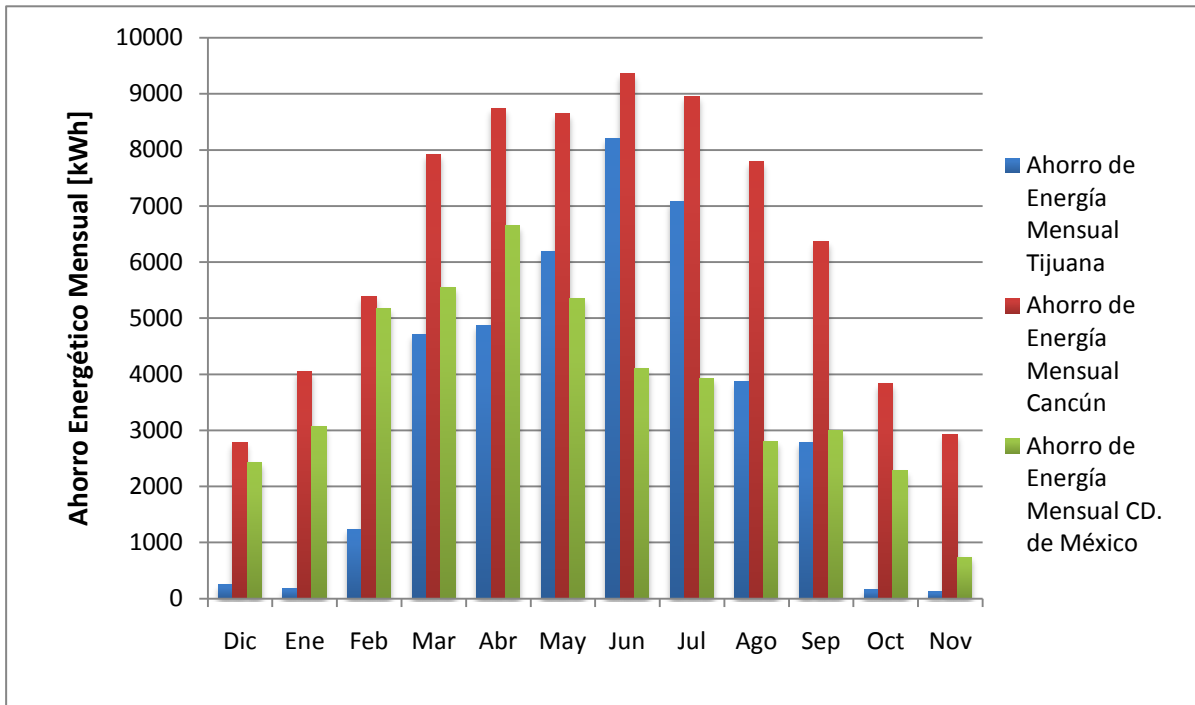
Basándose en el hecho de que el enfriamiento sensible es el único factor variable hacia adentro del edificio y sabiendo que los techos verdes actúan como resistencia térmica se puede decir con absoluta certeza que la utilización de estos techos reducirá el consumo eléctrico de las unidades de aire acondicionado.



Como se puede observar para los tres casos existe una reducción clara en el consumo eléctrico de las unidades de aire acondicionado. Esto se debe en definitiva a que el edificio

encuentra un mejor aislamiento térmico en los techos verdes que en su recubrimiento estándar.

Con toda esta información se pudo hacer un análisis comparativo entre los tres distintos escenarios.



Como se puede observar en el desglose mensual, el mayor ahorro se presenta entre los meses de abril y agosto, es decir, en las estaciones de primavera y verano. Para el caso de Tijuana y la Cd. de México los techos verdes no son tan efectivos durante los meses de invierno. Esto quiere decir que para las épocas frías los beneficios de las azoteas verdes se ven disminuidos. Es importante mencionar que esto sucede en zonas donde los inviernos no son tan extremos, como es el caso de nuestro país. En lugares donde los inviernos son más fríos, como sería el caso de E.U., Canadá y la mayoría de los países europeos, los techos verdes desempeñan, en las épocas frías, un buen método para ahorrar combustible para calefacción.

También es importante hacer notar que, a pesar de que los tres casos presentan un porcentaje de ahorro similar respecto al edificio de control (entre 10% y 15%), el ahorro mayor (76700 kWh) se da para el escenario del sureste mexicano, Cancún. Esto invita a pensar que para esa zona del país los techos verdes pueden convertirse en proyectos con un retorno de inversión atractivo.

## 5. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se puede confirmar que, en efecto, los techos verdes pueden ser percibidos y funcionan como una resistencia térmica. En consecuencia, la implementación de dichos techos acarrea consigo un beneficio que cada vez es más importante y tomado en cuenta en proyectos de construcción, el desempeño energético. De manera muy clara, para los tres diferentes lugares (Cd. de México, Cancún y Tijuana), se encontró una reducción en el consumo energético entre un 10% y 15%.

También pudo hacerse un análisis comparativo entre los tres distintos lugares para los cuales se realizaron las simulaciones. Se puede observar, basándose en los resultados obtenidos para Cancún, que los climas tropicales son zonas atractivas para la instalación de los techos verdes porque ofrecen un alcance mayor de ahorro en el rubro del consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado. Esto se debe a la reducción de las cargas de enfriamiento para dichos sistemas. Otro beneficio es que el tipo de clima del sureste de México es generoso y permite el desarrollo abundante de toda clase de vegetación, haciendo aún más fácil adoptar este tipo de techumbres.

Como complemento a este trabajo se consideró necesario hacer un práctico análisis económico con el objetivo de evaluar la viabilidad del proyecto presentado en estas páginas y de manera secundaria, poder obtener una perspectiva que permita identificar las oportunidades de crecimiento dentro de los marcos político-económicos y de manufactura para que los techos y paredes verdes se puedan adoptar a un ritmo más acelerado.

LUGAR	Ahorro Energético Anual [kWh]	Costo de la energía (baja tensión) [\$/kWh]	Beneficio Anual Neto [\$/año]
Cd. de México	45000.00	\$2.377	\$106,965.00
Tijuana	39600.00	\$2.377	\$94,129.20
Cancún	76700.00	\$2.377	\$182,315.90

RESUMEN DEL CÁLCULO DE ANÁLISIS ECONÓMICO DE PRIMER NIVEL						
	Cd. de México		Tijuana		Cancún	
Vida Útil (VU)	50	años	50	años	50	años
Tasa de descuento (td)	0.12	%	0.12	%	0.12	%
Factor de Valor Presente	8.30		8.30		8.30	
Valor Neto de Inversión	3,462,500	pesos	3,462,500	pesos	3,462,500	pesos
Beneficio Anual Neto	106,965	pesos	94,129	pesos	182,316	pesos
Tiempo de Retorno Simple (pay-back)	32.37	años	36.78	años	18.99	años
Tasa de Retorno de Inversión (ROI)	1.1	%	0.7	%	3.3	%
Valor Actualizado de los Beneficios (RNO)	888,291	pesos	781,696	pesos	1,514,042	pesos
Relación Beneficio/Costo (RBC)	0.26		0.23		0.44	

El valor neto de inversión se calculó utilizando un costo aproximado de \$2770/m<sup>2</sup> instalado de techo verde. Este costo fue el más adecuado bajo las a las condiciones de diseño de nuestra techumbre.

Quiero hacer énfasis en que este análisis es sólo una primera aproximación y sus resultados habría que tomarlos con un grano de sal, es decir, pueden tener un margen de error importante. Sin embargo sí presentan indicios interesantes. El primero que resalta es que de los tres lugares, la ciudad de Cancún es la más atractiva para implementar techos verdes. Cancún presenta el tiempo de retorno simple más bajo, en otras palabras, es el caso en el que se recupera la inversión más rápido, aproximadamente en 19 años. Los siguientes 31 años de vida útil generarían una ganancia.

A pesar de que los otros dos casos no se ven tan alentadores es importante resaltar que la inversión en la instalación de una azotea verde se paga sola. Al final de la vida útil del techo verde, éste se habrá pagado a sí mismo.

Esto deja pensar que aún cuando los costos son elevados en la actualidad, invertir en este tipo de tecnología garantiza un retorno de la inversión. Sin mencionar que se gozarían de muchos otros beneficios como el atenuamiento del efecto de isla de calor urbana, reducción de la descarga de agua de lluvia al drenaje de la zona, disminución del ruido exterior y los beneficios estéticos que trae consigo la naturaleza.

La mas clara oportunidad para incrementar la utilización e implementación de las azoteas verdes es la reducción de costos de manufactura e instalación. Esto permitiría un tiempo



de retorno de inversión más rápido, convirtiendo a proyectos de *retrofitting* en inversiones atractivas capaces de generar una ganancia importante después de un determinado tiempo.

La competencia en el mercado (generando una reducción en los costos) y políticas que patrocinen total o parcialmente este tipo de proyectos son maneras reales y tangibles mediante las cuales se puede contribuir al crecimiento de la cultura de los techos verdes.

Es importante mencionar que este trabajo es sólo una de las muchas oportunidades de investigación dentro del tema de las azoteas verdes. Los parámetros utilizados para las simulaciones se mantuvieron fijos a excepción de los lugares. En un trabajo futuro podría buscarse variar los parámetros de un techo verde, como profundidad y conductividad térmica del sustrato o índice de área de hoja, con el objetivo de encontrar una configuración de techo verde que maximice los beneficios.

En conclusión, todo el trabajo realizado permite asegurar que los techos verdes tienen un efecto térmico positivo en el desempeño energético de edificios cuya superficie es considerable, como la de un supermercado.

También se propuso visualizar al techo verde como una resistencia térmica, con el objetivo de facilitar y explicar el porqué es que son elementos que llevan a un mejor desempeño energético en edificaciones, dejando en claro el rol protagónico que pueden tener como aislantes dentro del rubro de los recubrimientos para edificios.

## **6. BIBLIOGRAFÍA**

- Mayor of London, *Connecting with London's nature – the Mayor's Draft Biodiversity Strategy*. Greater London Authority 2001.
- D. J. Sailor, *A green roof model for building energy simulations programs*, Department of Mechanical and Materials Engineering, Portland State University, Portland, OR, E.U., 2008.
- Alar Teemus, Ülo Mander, *Temperature regime of planted roofs compared with conventional roofing Systems*, Department of Geography, Institute of Ecology and Earth Sciences, University of Tartu, Estonia.
- <http://www.building.co.uk/data/sustainability-green-roofs/3069718.article>
- <http://www.cfe.gob.mx/negocio/conocetarifa/Paginas/Tarifas.aspx>
- <http://www.alumascwaterproofing.co.uk/green-roofing.aspx?id=1&sub=0&sect=4>
- <http://www.alumascwaterproofing.co.uk/system-components.aspx?&sub=0&id=1&sect=6>
- Yunus A. Çengel, *Transferencia de Calor y Masa. Un enfoque práctico*, Mc Graw Hill, 3ª Edición, Mexico, pp 17-26, 133-137.
- [www.elsevier.com/locate/enbuild](http://www.elsevier.com/locate/enbuild)
- <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Estatal/DISTRITO%20FEDERAL/Normas/DFNORM14.pdf>
- [http://www.crid.or.cr/cd/CD\\_Asentamientos\\_Humanos/pdf/spa/doc13829/doc13829-1a.pdf](http://www.crid.or.cr/cd/CD_Asentamientos_Humanos/pdf/spa/doc13829/doc13829-1a.pdf)
- <http://www.designbuilder.co.uk/>
- <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>
- [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather\\_data.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/cfm/weather_data.cfm)