



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO Y COMPORTAMIENTO
HIDROLÓGICO EN EDIFICIOS URBANOS CON TECHOS VERDES
PARA REGIONES SEMIÁRIDAS**

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

(RECURSOS HÍDRICOS Y AMBIENTAL)

PRESENTA:

ING. MYRNA LORENA PÉREZ GONZÁLEZ

DIRIGIDA POR:

DR. EUSEBIO JR. VENTURA RAMOS

C.U. SANTIAGO DE QUERÉTARO, QRO., AGOSTO 2010



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias
(Recursos Hídricos y Ambiental)



**EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO Y COMPORTAMIENTO
HIDROLÓGICO EN EDIFICIOS URBANOS CON TECHOS VERDES PARA
REGIONES SEMIÁRIDAS**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias

Presenta:

Ing. Myrna Lorena Pérez González

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

Presidente

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar

Secretario

Dr. Luis Hernández Sandoval

Vocal

Dr. Aldo Iván Ramírez Orozco

Suplente

Dr. Enrique Rico García

Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruíz

Director de la Facultad

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval

Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Agosto, 2010
México

RESUMEN

La creciente urbanización ha transformado y alterado el medio ambiente y los ecosistemas. Los techos verdes son una forma sostenible para devolver parte de la esencia única de la naturaleza. El objetivo de este estudio fue implementar y evaluar los techos verdes como una alternativa sostenible para regular la temperatura dentro de un edificio en la zona urbana de Querétaro, así como evaluar el efecto en el escurrimiento generado por las ecoestructuras. El experimento se realizó en las aulas de posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) en los 20°35'27" de latitud Norte y 100°24'47" de altitud oeste. El edificio experimental se dividió en seis partes tres de ellas cubiertas por un pasto *Pennisetum Clandestinum* (Kikuyo) sobre una capa de 10 cm de suelo Vertisol. Un techo sin cubierta vegetal entre dos de los techos verdes se utilizó como control contiguo y otro control, en condiciones similares, fue colocado en un edificio anexo sin techo verde. Para evaluar el confort térmico interno, la temperatura del aire se registró cada 10 minutos desde abril 2009 hasta abril 2010 utilizando un sensor WatchDog marca Spectrum. Para apreciar la respuesta hidrológica de los techos verdes se evaluó la precipitación y el volumen de escurrimiento durante el periodo de lluvias y se determinaron los hidrogramas para eventos específicos. Los resultados térmicos demostraron que los techos verdes son una alternativa eficaz para regular la temperatura y lograr confort disminuyéndola temperatura interna con respecto al control en aproximadamente 6°C en temporada cálida y aumentándola alrededor de 2°C en temporada fría. El estudio hidrológico demostró que los techos verdes retrasaron el tiempo de inicio y volumen de escurrimiento al aumentar la infiltración y almacenamiento de las aguas pluviales. Los datos mostraron una reducción de la esorrentía media del 85% y un retraso del tiempo de escurrimiento de 10 a 15 minutos. Con base en estos resultados, se ha demostrado que los techos verdes son una buena estrategia ambiental para lograr un mejor confort térmico y reducir los escurrimientos generados en edificios de regiones urbanas semiáridas.

(Palabras claves: Techos verdes, confort térmico, comportamiento hidrológico, precipitación, escurrimiento, infiltración, regiones semiáridas, México).

SUMMARY

The growing urbanization has transformed the environment and altered the ecosystems. Green roofs are a sustainable way to get back part of nature unique essence. The aim of this study was to implement and evaluate green roofs as a sustainable alternative to regulate the temperature inside a building in the urban area of Queretaro, and to assess the effect of the runoff generated by the eco-structures. The experiment was done in the graduate classrooms of the Engineering Faculty of the Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) at the 20°35'27" north latitude and 100°24'47" west altitude. The experimental building was divided into six parts three of them covered by a *Pennisetum Clandestinum* grass (Kikuyu grass) over a 10 cm layer of Vertisol soil. A roof without vegetation between two of the green roofs was used as control and another control, in similar conditions, was placed in an annex building without green roof. To evaluate the internal thermal comfort, air temperature was recorded every 10 minutes from April 2009 to April 2010 using a WatchDog sensor from the Spectrum Company. To assess the hydrological response of green roofs the rainfall volume and runoff were evaluated during the rainy season and the hydrographs for specific events were determined. The thermal results showed that green roofs are an effective alternative to regulate temperature and bring comfort by reducing the internal temperature in about 6 °C for warm season and increasing it in about 2 °C for cold season with respect to the control. The hydrological study showed that the green roofs delayed the starting time and runoff volume by increasing rainwater infiltration and storage. Data showed an average runoff reduction of 85% and runoff time lag of 10 to 15 min. Based on these results, it has been shown that green roofs are a good environmental strategy to achieve a better thermal comfort and reduce the runoff generated by buildings in semiarid urban regions.

(Keywords: Green roofs, thermal comfort, hydrological response, precipitation, runoff, infiltration, semi-arid regions, Mexico).

A MIS PAPÁS MYRNA Y ROGER
A MI ABUELITA LUISA Y MI TÍA ELENA
A MIS TÍOS GINA Y MICHAEL THOMPSON
A MI HERMANO ROGER
A MI NOVIO ARTURO
A TODOS MIS MAESTROS
A MI ALMA MATER

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas aquellas personas que hicieron posible la culminación de este proyecto.

A Dios que me dio la luz y las capacidades para renacer a una vida llena de éxitos y bendiciones.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A cada uno de los integrantes de mi familia que me ayudaron a alcanzar esta nueva meta con su gran amor, comprensión y paciencia.

A mi asesor y director de tesis Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos que vio en mi madera de investigadora, que me dio todo el apoyo y los recursos necesarios para realizar este estudio.

Al M. en C. José Arturo Aguado M. por su amor, paciencia y ayuda invaluable para mi desarrollo académico y en especial de esta investigación.

A mis maestros que me guiaron, alentaron e inspiraron para reunir el conocimiento necesario para alcanzar mi meta.

A mis compañeros y amigos por su compañía y apoyo, por su colaboración y por los momentos inolvidables que vivimos en estos dos años.

ÍNDICE

Resumen	i
Summary	ii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de Figuras	viii
Índice de Tablas	ix
Índice de Gráficos	x
I. Introducción	1
1.1. Importancia del Estudio	1
1.2. Antecedentes	4
1.3. Justificación	7
1.4. Objetivos e Hipótesis	9
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	9
1.4.2. <i>Objetivos particulares</i>	9
1.4.3. <i>Hipótesis general</i>	9
II. Revisión de literatura	10
2.1. Beneficios Ambientales y Sociales de los Techos Verdes	14
2.2. Efecto Térmico de los Techos verdes	15
2.2.1. Balance de energía para edificaciones	18
2.2.2. Régimen térmico de sistemas multicapa	19
2.2.3. Confort térmico	21
2.3. Hidrología de los techos Verdes	22
2.3.1. Balance hídrico	23
2.3.1.1. <i>Teoría de la intercepción</i>	24
2.3.1.2. <i>Teoría del almacenamiento</i>	26
2.3.1.3. <i>Teoría de la permeabilidad y flujo en suelos finos saturados</i>	26
2.3.1.4. <i>Teoría del escurrimiento superficial</i>	29

III. Metodología	31
3.1. Localización y Descripción del Sitio Experimental	31
3.2. Descripción del Sistema Techo Verde	32
3.2.1. <i>Tratamientos</i>	33
3.2.1.1. <i>Impermeabilizante Asfáltico</i>	34
3.2.1.2. <i>Loseta</i>	34
3.2.1.3. <i>Membrana</i>	34
3.2.1.4. <i>Control contiguo</i>	34
3.2.1.5. <i>Control externo</i>	34
3.2.2. Suelo	35
3.2.3. Vegetación	36
3.2.3.1. <i>El estado de la vegetación</i>	37
3.3. Acondicionamiento Estructural de los Tratamientos	37
3.4. Implementación de los Sistemas Impermeables	40
3.4.1. Impermeabilizante asfáltico	40
3.4.2. Loseta	41
3.4.3. Membrana	42
3.4.4. Control contiguo y control externo	42
3.5. Instrumentación	43
3.5.1. Instrumentación para la Evaluación del Confort Térmico	43
3.5.2. Instrumentación para la Evaluación del Comportamiento Hidrológico	44
IV. Resultados y discusión	46
4.1. Resultados Térmicos	46
4.1.1. Estadísticas anuales del comportamiento y confort térmico	46
4.1.1.1. <i>Temperaturas máximas</i>	47
4.1.1.2. <i>Temperaturas mínimas</i>	48
4.1.1.3. <i>Temperaturas medias</i>	50
4.1.2. Estadístico estacional del comportamiento y confort térmico	51
4.1.3. Comportamiento térmico promedio diario mensual	53
4.1.3.1. <i>Abril 2009</i>	53

4.1.3.2. <i>Mayo 2009</i>	55
4.1.3.3. <i>Junio 2009</i>	57
4.1.3.4. <i>Julio 2009</i>	59
4.1.3.5. <i>Agosto 2009</i>	61
4.1.3.6. <i>Septiembre 2009</i>	63
4.1.3.7. <i>Octubre 2009</i>	65
4.1.3.8. <i>Noviembre 2009</i>	67
4.1.3.9. <i>Diciembre 2009</i>	69
4.1.3.10. <i>Enero 2010</i>	70
4.1.3.11. <i>Febrero 2010</i>	72
4.1.3.12. <i>Marzo 2010</i>	75
4.1.3.13. <i>Abril 2010</i>	77
4.1.3.14. <i>Resumen</i>	79
4.2. Resultados Hidrológicos	80
4.2.1. Escurrimientos totales de las tormentas	80
4.2.1.1. <i>Junio 2009</i>	80
4.2.1.2. <i>Julio 2009</i>	81
4.2.1.3. <i>Septiembre 2009</i>	81
4.2.1.4. <i>Octubre 2009</i>	82
4.2.1.5. <i>Febrero 2010</i>	83
4.2.2. Escurrimientos medidos durante las tormentas	83
4.2.2.1. <i>Evento del 31 de Agosto 2009</i>	84
4.2.2.2. <i>Evento del 09 de Septiembre 2009</i>	85
4.2.2.4. <i>Evento del 24 de Octubre 2009</i>	88
4.2.2.5. <i>Evento del 04 de Febrero 2010</i>	89
V. Conclusiones	91
Bibliografía	93
Anexos en CD	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Elementos de un techo verde (Sika, 2009)	10
2	Balance Hídrico (Strahler, 2006)	24
3	Diagrama del Escurrimiento (UNAM, 1996)	29
4	Sitio experimental, 20°35'27.41" Norte - 100°24'47.80" Oeste	31
5	Asignación de las áreas con techo verde y sus sistemas impermeables	32
6	Corte transversal del techo verde con loseta DEPFI-UAQ	33
7	Suelo de los techos verdes	36
8	Vegetación Techos Verdes UAQ, Pasto <i>Pennisetum Clandestinum</i>	36
9	Preparación de la losa para la instalación del sistema impermeable	38
10	Tubos de PVC de 3" para la salida del escurrimiento	38
11	Filtros de malla galvanizada	39
12	Tinacos de almacenamiento y medición del escurrimiento	39
13	Instalación del impermeabilizante asfáltico	41
14	Instalación de la loseta	41
15	Instalación de la membrana	42
16	Instalación de la superficie del control contiguo	43
17	Sensores Watchdog dentro de los salones monitoreados	43
18	Pluviómetro WatchDog modelo 120	44
19	Mediciones del agua escurrida	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Página
1	Dimensiones de las áreas a evaluar para la experimentación	33
2	Propiedades fisicoquímicas de la capa de suelo	35
3	Materiales para el acondicionamiento estructural	40
4	Estadístico anual de temperaturas medias máximas, mínimas y promedio	46
5	Estadístico estacional de temperaturas promedio	52
6	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, abril 2009	53
7	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, mayo 2009	55
8	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, junio 2009	57
9	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, julio 2009	59
10	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, agosto 2009	61
11	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, septiembre 2009	63
12	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, octubre 2009	65
13	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, noviembre 2009	67
14	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, diciembre 2009	69
15	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, enero 2010	71
16	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, febrero 2010	73
17	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, marzo 2010	75
18	Gradientes de calentamiento y enfriamiento, abril 2010	77
19	Escurrimiento por tratamiento, 31/08/2009	84
20	Escurrimiento por tratamiento, 09/08/2009	86
21	Escurrimiento por tratamiento, 10/09/2009	87
22	Escurrimiento por tratamiento, 24/10/2009	88
23	Escurrimiento por tratamiento, 04/02/2010	89

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico		Página
1	Resumen anual de temperatura interna máxima media y de confort térmico	48
2	Resumen anual de temperatura interna mínima media y de confort térmico	49
3	Resumen anual de temperatura interna promedio y de confort térmico	51
4	Resumen estacional de temperatura interna promedio y confort térmico	52
5	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, abril 2009	54
6	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, mayo 2009	56
7	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, junio 2009	58
8	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, julio 2009	60
9	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, agosto 2009	62
10	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, septiembre 2009	64
11	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, octubre 2009	66
12	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, noviembre 2009	68
13	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, diciembre 2009	70
14	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, enero 2010	72
15	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, febrero 2010	74
16	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, marzo 2010	76
17	Modelos del comportamiento térmico promedio diario, abril 2010	78
18	Lámina de escurrimiento, Junio 2009	80
19	Lámina de escurrimiento, Julio 2009	81
20	Lámina de escurrimiento, Septiembre 2009	82
21	Lámina de escurrimiento, Octubre 2009	82
22	Lámina de escurrimiento, Febrero 2010	83
23	Hidrograma de escurrimiento 31/08/2009	85
24	Hidrograma de escurrimiento 09/09/2009	86
25	Hidrograma de escurrimiento 10/09/2009	87
26	Hidrograma de escurrimiento 24/10/2009	89
27	Hidrograma de escurrimiento 04/02/2010	90

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Importancia del Estudio

El crecimiento desmedido de la población mundial, los escasos recursos naturales y la contaminación son problemas que se viven día con día y que amenazan el equilibrio entre de la raza humana y el resto de los seres vivos. Los recursos naturales para producir energía son sobreexplotados y se están agotando alarmantemente. En países industrializados o de primer mundo se consume excesiva energía para el calentamiento y enfriamiento de las edificaciones. Todo lo anterior está colaborando potencialmente al calentamiento global y al deterioro de los recursos naturales del planeta (ONU, 2009).

Para el año 2050 se espera que América Latina y Asia sean las regiones de mayor crecimiento poblacional del mundo. De igual manera, de 1970 a 2005 la población total de México se incrementó de 48.1 millones de habitantes a 103.3 millones. Aunque la tasa de crecimiento demográfico ha bajado del 3.5% al 1% en los mismos años, la creciente población de nuestro país sigue siendo notable. Querétaro es uno de los estados que tiene uno de los crecimientos poblacionales más acelerados en los últimos veinte años del país. La tasa de crecimiento media en el estado ha superado a la media nacional desde el periodo 1950-1960 al 2000-2005 (INEGI, 2010). Estas cifras nos permiten hacer un comparativo y es claro que el crecimiento poblacional del estado es preocupante. Para el año 2008 la población urbana de Querétaro de Arteaga fue de 1 214 337 habitantes y de éstos 725 077 se encontraban en el municipio homónimo (CONAPO, 2009).

Para satisfacer las necesidades de vivienda se edificaron zonas que en su mayoría eran de cultivo e incluso algunas de ellas eran reservas ecológicas. Hasta hace poco no se requería de construcciones mayores a cuatro niveles. El costo de los terrenos se ha incrementado y se puede inferir que esto se debe a una disminución de las áreas disponibles en la mancha urbana para ser fraccionada y en un aumento en la demanda de vivienda (Gobierno del Estado de Querétaro, 2009). La disminución de las áreas naturales podría ir de la mano del efecto urbano de Isla de Calor que aqueja a Querétaro. Muchos de

los fraccionamientos están hechos sin ninguna normativa ambiental. En ellos no se construyen suficientes plantas de tratamiento de aguas residuales ni drenes pluviales y las áreas verdes son escasas o nulas a pesar de las propuestas federales. Tampoco se toma en cuenta el desarrollo de viviendas energéticamente eficientes ni se diseñan con base al confort térmico adecuado para las mismas (Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos, 2009). Por tales razones el consumo de los recursos como los combustibles fósiles y la energía eléctrica causan daños colaterales como emisiones de carbono y otros contaminantes. Cabe mencionar los considerables gastos económicos innecesarios que generan a los habitantes todos estos factores.

Las cubiertas verdes tienen impactos positivos sobre el ambiente urbano: enfrían el aire y el suelo de una cubierta, mejoran la aislación térmica de los edificios (confort térmico) y capturan el agua de lluvia reduciendo las inundaciones. También reducen los niveles de contaminación, representan un hábitat para especies nativas o migratorias y pueden ayudar a mejorar la calidad de vida al evitar que la salud humana se vea afectada por los cambios marcados de temperatura y los altos niveles de contaminación.

Con base a los registros meteorológicos del Municipio de Queretaro (2009) las condiciones normales para el clima templado-semiseco de esta ciudad han ido cambiando hacia condiciones más extremas. Cada año podemos sentir veranos más intensos e inviernos más crudos. La temperatura media anual es de 18°C. Los meses más calurosos son mayo y junio; alcanzando temperaturas máximas de 36°C, en tanto que los más fríos son los meses de diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de -3°C.

En las grandes ciudades, las temperaturas tienden a ser mayores a las registradas en el área suburbana o rural circundante. El albedo de un techo de concreto es de 0.08, mientras que el de una azotea con pasto es de 0.25. El asfalto y el concreto son los materiales que predominan en las zonas urbanas y que no tienen buena reflectancia. Estos absorben e irradian más calor y contribuyen enormemente al efecto isla de Calor mientras que los techos verdes, son más reflectantes que los techos oscuros (Gobierno Estatal de Buenos Aires, 2007).

Todo el calor que se acumula en las losas de cemento se transfiere a los interiores causando así un aumento de la temperatura interna. En temporadas frías estos materiales absorben el calor interior liberándolo y con esto enfriando las habitaciones. Los techos verdes al regular los intercambios de calor al interior de las edificaciones permiten conservar temperaturas más agradables generando así un confort térmico que permite que las labores al interior de las edificaciones sean más eficientes. En el caso de regiones semiáridas los cambios de temperatura se aprecian fuertemente ya que las noches son muy frías y los días muy calientes. Además de modificar la conductividad térmica, las eco-estructuras enfría el aire. Las plantas en una cubierta verde absorben la humedad de la tierra y al evaporarla a través de sus hojas enfrían el aire que las rodea (Bliuc & Baran, 2006). Esto es muy útil en ciudades con vegetación muy escasa, como Querétaro.

El desarrollo urbano también trastorna el movimiento natural del agua, conocido como el Ciclo Hidrológico. El municipio de Querétaro se caracteriza por tener precipitaciones de corta duración pero intensas. De acuerdo con la Comisión Estatal del Agua Querétaro (2009), en el estado el promedio anual de la precipitación es de 555 mm. La lluvia, al no poderse infiltrar en el asfalto y el concreto, escurre y puede inundar la ciudad. En la actualidad, la red de drenaje de la Ciudad de Querétaro es deficiente y no existe infraestructura para la correcta captación y conducción de las aguas pluviales, razón por la cual un porcentaje importante de las tormentas causan anegamientos en diferentes sectores de la ciudad. Los techos verdes retienen el agua de lluvia, retrasan el escurrimiento y reducen su volumen. Las cubiertas verdes actúan además como filtros. Las plantas y la tierra capturan contaminantes atmosféricos y las partículas de metales pesados se unen a las moléculas de tierra (Roberts, 2008).

Este trabajo se enfoca en la evaluación del confort térmico de los techos verdes al interior de las edificaciones urbanas y el comportamiento hidrológico de los mismos. Se busca validar a través de la experimentación la pertinencia de estas eco-estructuras como forma de mejorar la vida urbana en regiones semiáridas de México mediante soluciones ecológicas.

1.2. Antecedentes

El crecimiento poblacional que se espera para el periodo 2000-2030 estará concentrado básicamente en las zonas urbanas del mundo. Se espera un 1.8% de incremento demográfico anual por lo que la población se duplicará en 38 años. Actualmente sólo el 2% de la superficie del planeta está cubierta por ciudades y aun así, las poblaciones en esta consumen el 75% de los recursos naturales (ONU, 2009). Las edificaciones son responsables de aproximadamente el 40% del consumo anual de energía. Esta energía es utilizada para proveer a la población de alumbrado, calefacción y ventilación entre otros. Los recursos naturales no renovables como el carbón, el petróleo y el gas natural que suministran energía al hombre se están agotando.

Radu y Dumitrescu (2006), hicieron un análisis ambiental para sensibilizar a los constructores sobre cómo la construcción de estructuras ecológicas en un pequeño país como Rumania, puede mejorar su calidad de vida y la de los países que lo rodean. Este país fue obligado a reducir las emisiones de CO₂ de acuerdo con los estatutos del Protocolo de Kyoto que entró en vigor en febrero de 2006. Ahora es un gran ejemplo de cómo los desarrollos sustentables y la disminución de la producción de gases invernadero pueden ser una gran aportación para revertir los efectos del Cambio Climático. Radu y Dumitrescu establecen que los ingenieros civiles deben construir edificaciones que sean de mayor eficiencia térmica, utilizando energías renovables, elementos estructurales y materiales innovadores que protejan al medio ambiente. Rumania se ha convertido en un gran promotor de las eco-estructuras y las azoteas verdes son ya parte de su cotidianidad.

Científicamente es difícil predecir la relación entre las concentraciones de los gases que generan el efecto invernadero y el calentamiento global. El sistema climático contiene muchos procesos que pueden cambiar a causa del calentamiento. Los procesos más críticos por su gran variabilidad son: la transferencia de calor y el ciclo hidrológico. Buenos Aires es una de las ciudades de Latinoamérica pioneras en la utilización de estrategias ecológicas para luchar contra el Cambio Climático. En el Plan de Acción de Buenos Aires 2030, los techos verdes son una de las propuestas ecológicas que se utilizan para luchar contra el efecto de Isla de Calor Urbana (Gobierno Estatal de Buenos Aires,

2007). Las estrategias propuestas, eco-estructuras, permitieron el descenso de la temperatura y de la demanda energética, la disminución de la contaminación atmosférica y de las emisiones de gases de efecto invernadero; además de permitir la captación y retención de agua de lluvia.

Se sabe que las zonas urbanas tienen temperaturas promedio mayores a las de sus alrededores. Watkinset *al.* (2006) midió los beneficios de aumentar la presencia de vegetación en la zona urbana de Londres. En su investigación concluye que el calor urbano incrementa el promedio de la temperatura pico, aumentando la demanda de aire acondicionado y calefacción. También que el confort de los habitantes depende principalmente de la temperatura del aire, la humedad relativa, la calidad del aire, la iluminación y el control del ruido. Al medir las temperaturas urbanas Watkinset *al.* afirmó que la reducción del albedo de la ciudad mediante eco-estructuras reduce el efecto de Isla de calor y el consumo anual de energía eléctrica ante el uso de aires acondicionados y calefacción.

Según Niachou *et al.* (2001) las ventajas de los techos verdes son tanto ecológicas como sociales, ya que protegen de la radiación solar, que es el factor principal en el enfriamiento pasivo, reducen la fluctuación térmica en la superficie externa del techo incrementando su capacidad térmica, contribuyen al enfriamiento de los espacios debajo del techo durante el verano e incrementan la duración del calor durante el invierno. El estudio de Niachou *et al.* se llevó a cabo en el verano de 2000 en un hotel situado en Loutraki cerca de la cuenca de Atenas. De éste se concluyó que las temperaturas más bajas se dan cuando la vegetación tiende a un verde más oscuro. El techo verde monitoreado moderó la temperatura del aire al interior del edificio reduciéndola en un promedio de 3°C. En los techos sin asotea verde se estimó una diferencia de transferencia de calor de entre 6 y 16 W/m² K y de los que sí contaban con la eco-estructura fue de casi 0.2W/m² K. De lo anterior se concluyó que al aislar las superficies con techos verdes se logra el efecto de la insolación.

La captación y la retención de agua de lluvia son otras más de las ventajas de la vegetación al disminuir el escurrimiento generado en las construcciones. La precipitación

puede ser aprovechada para el uso doméstico, agropecuario y ganadero pero generalmente se pierde al no tener una infraestructura adecuada para su colección. Los techos verdes, por su capacidad de almacenamiento de agua, pueden disminuir los problemas de inundaciones durante las tormentas. En la tesis de Aubrey y Hake (2004) se dice que los techos son parte del problema actual asociado al efecto urbano de Isla de Calor y el escurrimiento del agua de lluvia, pero también serían una solución si se les implementan eco-estructuras. En cuanto al comportamiento hidrológico los resultados sobre el porcentaje de escurrimiento expuestos por La American Society of Landscape Architects (ASLA) en un edificio en Washington D.C. se demuestra que los techos verdes en los meses de julio-noviembre redujeron el escurrimiento en un 77%.

Las azoteas verdes son una opción factible para el restablecimiento parcial de las condiciones ambientales que las urbes destruyeron. Son un método potencial para contrarrestar la destrucción de la naturaleza. En la investigación de Liu y Minor (2005) hecha en la ciudad de Toronto, en verano de 2002. Se analizaron techos verdes de tipo extensivo (100mm de espesor) en edificios en uso y se obtuvo que las azoteas verdes redujeron el flujo de calor hasta en un 90% en verano y en hasta 30% en invierno. La reducción de la temperatura interna fue en promedio de 4.5°C. En cuanto al volumen de escurrimiento, el promedio anual fue del 57%.

Se han realizado muchas otras investigaciones sobre techos verdes en Europa, Asia y Norte América. Éstas han resultado satisfactorias por lo que ya son una industria potencial para Latinoamérica. En estos estudios se han confirmado los beneficios de las azoteas verdes para conservar las condiciones de temperatura y presión atmosférica que caracterizan el clima del lugar y que mantiene el equilibrio de los ecosistemas. También para retener el agua de lluvia, retardar y disminuir el escurrimiento y con esto disminuir los conflictos por inundaciones. Por tales razones y algunas otras, se busca evaluar la eficiencia de estos en las zonas urbanas de México.

1.3. Justificación

Querétaro ocupa el octavo lugar por su densidad de población a nivel nacional con 137 hab/Km². El crecimiento del municipio homónimo se ha extendido 30 veces en los últimos 16 años, lo que ha generado la fusión urbana con los municipios de Corregidora, Huimilpan y El Marqués, cambiando así el medio ambiente de una gran parte del estado. Tan sólo Santiago de Querétaro y San Juan del Río concentran 45% del total de los habitantes del estado y dentro de estas ciudades existe un alto consumo de combustibles fósiles, electricidad y otras fuentes energéticas que contaminan y dañan a los ecosistemas (INEGI, 2010). El Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN, 2010) de la ciudad de Querétaro plantea la necesidad de brindar a esta urbe de más de 2000 km² y que para el 2005 contaba con 950 828 habitantes, las condiciones físicas adecuadas que permitan la sustentabilidad del lugar.

Es claro que el crecimiento de esta mancha urbana está superando las capacidades propias del medio ambiente por eso es importante buscar opciones ecológicas para contrarrestar los efectos secundarios generados por la civilización. Los problemas de un mal manejo de los recursos naturales y sus espacios han creado un desequilibrio ambiental. Al utilizar grandes cantidades de combustibles fósiles para crear energía, las concentraciones de los gases invernadero de Querétaro contribuyen al efecto urbano de isla de calor y al calentamiento global. Si se le suma a estos efectos la ausencia de vegetación que fue eliminada para posicionar las ciudades, se impide la purificación del aire y el enfriamiento del mismo a través de la evapotranspiración. Los techos verdes son una manera de reposicionar la vegetación y de disminuir las concentraciones de CO₂ dentro de la zona urbana de Querétaro.

En esta ciudad el crecimiento poblacional demanda satisfactores básicos dentro de los cuales se encuentra la vivienda. Ésta debería ser diseñada para proporcionar espacio y confort con materiales térmicos, económicos, ecológicos y sustentables pero no se hace sobre todo, en las viviendas de interés social que abundan en esta zona. Con el incremento de las temperaturas, Querétaro ha aumentado el uso de aires acondicionados y ventiladores que consumen grandes cantidades de energía eléctrica y que para su generación contaminan

de manera importante. Los techos verdes al proporcionar confort térmico reducen el consumo de tales energías. Adicionalmente a esto se puede conservar el calor interno de las edificaciones por las noches donde las temperaturas bajan considerablemente.

En la zona urbana de Querétaro, el cambio del uso de suelo ha modificado las condiciones de la superficie y su respuesta hidrológica: escurrimientos superficiales, encharcamientos e inundaciones y eventos pluviales extremos. La presencia de lluvias intensas que inundan la ciudad por su ineficiente sistema pluvial y el aumento de la capa impermeable son comunes. Los techos verdes aportan soluciones ante las inundaciones al captar y guardar volúmenes importantes de agua de lluvia y con esto impedir su escurrimiento o al menos retardarlo para dar tiempo a un paso más distribuido de la misma al sistema de alcantarillado.

No existen en esta ciudad estudios que cuantifiquen ni valoren la implementación de techos verdes como sistemas de regulación térmica ni de mitigación hidrológica. Sin embargo, tomando en cuenta los indicadores internacionales y los numerosos experimentos exitosos con estructuras verdes en relación al confort térmico y al efecto hídrico en países Europeos, Asiáticos y Norte Americanos parece factible obtener resultados positivos ante la implementación de un sistema así en climas semiáridos. Por lo anterior, experimentar techos verdes en el Bajío mexicano puede ser una medida sustentable para aminorar algunos de los problemas económicos, sociales y ambientales de este país.

1.4. Objetivos e Hipótesis

1.4.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la implementación de techos verdes en la temperatura interior de un edificio urbano y en el escurrimiento generado por estas estructuras como una alternativa para mejorar el confort térmico y contribuir a la reducción de la generación de escurrimientos en zonas urbanas semiáridas.

1.4.2. Objetivos particulares

- Evaluar el efecto de un techo verde en la dinámica de la temperatura interior de un edificio urbano en zonas semiáridas como un indicador del confort térmico.
- Evaluar el escurrimiento generado en un techo verde como indicador de la regulación hidrológica de estos sistemas en zonas urbanas semiáridas.

1.4.3. Hipótesis general

El establecimiento de techos verdes en un edificio urbano de una zona semiárida reduce la temperatura en el interior del edificio, disminuyendo la oscilación de la misma y aumentando el confort térmico. Adicionalmente, regula la respuesta hidrológica de estas cubiertas retardando el inicio del escurrimiento y reduciendo su volumen así como la magnitud y ocurrencia de las descargas pico.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

Un techo verde consiste en una construcción parcial o totalmente cubierta de vegetación. Existen principalmente de dos tipos de techos verdes: intensivos y extensivos. Su clasificación se define según la profundidad del medio de cultivo y del grado de mantenimiento requerido. Los techos intensivos tienen una capa de tierra de aproximadamente 30 centímetros de espesor, pueden albergar gran variedad de plantas, requieren de elementos estructurales muy fuertes para soportar el peso del eco-techo y necesitan mucho mantenimiento, por lo que son menos comunes. Los techos verdes extensivos sólo tienen entre 5 y 10 centímetros de espesor y exclusivamente pueden tener especies vegetales de raíces pequeñas y resistentes por lo que su diseño y mantenimiento es menos laborioso y costoso. Una característica importante es la pendiente de las azoteas, el declive reduce el riesgo de infiltración pero tienen mayores problemas para mantener húmeda del sustrato (Getter y Rowe, 2006).

En la Figura 1 se muestran los elementos más comunes de un techo verde. Estos pueden variar y llevar o no algunas de las capas que se muestran. Las tres capas principales son: la capa vegetal, la capa de suelo y la capa impermeable.



Figura 1. Elementos de un techo verde (Sika, 2009)

La selección de la capa vegetal se debe de hacer tomando en cuenta principalmente el clima de la región donde se establecerá el techo verde. Se recomienda

escoger la vegetación que mejor se adapte a las condiciones naturales del lugar. Optar por una planta requiere de conocer sus características principales. Una buena descripción deber contener: el nombre común, el nombre científico, longevidad (anual o perene), las estructuras reproductoras, estaciones de crecimiento, origen (nativa o introducida), lugar de colecta, su valor económico y las características de crecimiento y morfológicas (tallos y hojas, flores, inflorescencia y fruto) (González *et al.*, 2004). Las características de la vegetación y del sitio donde se planea establecer la estructura verde son esenciales para decidir su implementación en la estructura y con esto evaluar su factibilidad en el proyecto.

Al paso del tiempo pueden crecer plantas del tipo invasivas que pueden permanecer en la capa vegetal y permanecer allí si así se desea. La vegetación espontanea se define como el conjunto de vegetales que se instalan sobre el terreno desnudo o que sustituye a otras anteriormente existentes sin intervención directa del hombre. Este tipo de plantas, también llamada vegetación natural, puede cubrir hasta un 90% de la superficie según investigaciones (González *et al.*, 2004). La elección de suelo adecuado para una estructura verde depende de varios factores. El suelo es una capa dinámica en la que tienen lugar diversos procesos físicos, químicos y biológicos. Está formado de partículas minerales y orgánicas. Para seleccionar la capa de suelo adecuada para vegetación se debe de analizar su composición química y física (El ergonomista, 2006).

La infiltración de la humedad del sustrato a la losa es uno de los riesgos latentes al establecer una azotea verde. Por tal razón es de vital importancia adaptar la capa impermeable correctamente y evitar la ruptura o daño de la misma a toda costa. Si se obstruye el sistema de drenaje y se almacena del agua por largos periodos también se podría dar este fenómeno. Algunos fertilizantes y/o compostas pueden tener compuestos químicos inorgánicos u orgánicos que perjudican la membrana aislante por lo que se recomienda hacer la plantación de la vegetación en un sistema de bandejas separadas del techo formando bloques (Wark y Wark, 2003)

De acuerdo a las características de la vegetación a implementar y el suelo donde se hará la plantación se debe de elegir la capa impermeable óptima. Hay varios tipos de capas aislantes, las más comunes son: la pintura asfáltica, la loseta y la de poliuretano.

Cada sistema tiene sus contra indicaciones por lo que se debe ser cuidadoso con su selección. La pintura asfáltica o bituminosa es atacada por microorganismos y plantas y por lo tanto está sujeta a penetración y ruptura por raíces. La loseta al no estar unida correctamente pudiera también causar infiltraciones importantes en las juntas. La membrana es el mejor sistema aislante sin embargo su manejo debe de ser cuidadoso ya que se rompe fácilmente con golpes bruscos al hacer las labores de colocación y mantenimiento de la eco-estructura (Wark y Wark, 2003).

La implementación de vegetación sobre techos, paredes y otras estructuras es comúnmente utilizada como un elemento arquitectónico. La tecnología Techo Verde se utiliza en muchas partes del mundo, especialmente en Europa. Los Estados Unidos de América y Canadá también se han adentrado en el estudio de sus efectos y en varios de los estados de climas extremos ya existe la utilización de éstas (Connelly y Liu, 2005; Davis *et al.*, 2008). En especial los techos verdes se han evaluado exitosamente en construcciones en países de clima muy frío como Escandinavia, Suiza, Islandia y Alemania (Connelly y Liu, 2003; Lerum, 2003; Bass, 2007; Lanham, 2007; Roberts, 2008). También se han experimentado en países de clima cálido como Brasil, China y Japón (Vecchia *et al.*, 2001; Jian, *et al.*, 2006; Yu y Hien, 2006).

En China, un país con alta densidad de población y poco territorio, se construyen techos verdes para acrecentar las áreas de esparcimiento en las zonas urbanas. Los asiáticos ven a los techos verdes como elementos estructurales con beneficios más allá de los físicos y medibles (Hake, 2007). Según el departamento de horticultura de la universidad de Michigan en los EEUU los Techos verdes son un método potencial para contrarestar la destrucción del medio ambiente en una zona urbana. Las azoteas representan entre un 21% y 26% de las superficies. Al establecer estructuras vegetales se obtienen beneficios que van desde retener el agua de lluvia y retrasar el escurrimiento y disminuir su volumen hasta incrementar la membrana vegetal de las poblaciones obteniendo así los beneficios de su insolación y sombreado. Por otro lado, permiten la permanencia de la biodiversidad, mejoran la estética del paisaje y disminuyen el ruido y la contaminación en la ciudades. Se llegó a la conclusión de que los techos verdes pueden generar beneficios económicos al

funcionar como viveros y así tener otra buena razón para justificar su sustentabilidad (Getter y Rowe, 2006).

Una investigación hecha en Atenas sobre el confort térmico y la conductividad de los materiales propios de las azoteas demostró que la temperatura al interior de los edificios para los meses de verano oscilaban entre los 29 °C y 25 °C cuando había las ecoestructuras mientras que al no existir éstas la temperatura estaba entre los 31 y 24°C. En cuanto a la conductividad térmica, ésta siempre fue mayor para los G.R, que para la de los techos tradicionales (Niachou *et al.*, 2001). Según Palomo (1997), en una experimentación hecha en Francia se llegó a la conclusión de que los techos verdes no actúan como un dispositivo de enfriamiento si no como aislantes al reducir el flujo de calor a través del techo. También establece que los parámetros mínimos relevantes para modelar el balance de energía son: el índice de área foliar, la geometría del follaje, la densidad aparente del suelo, su espesor y su contenido de humedad.

En climas tropicales también se han hecho estudios del efecto de los techos verdes. A diferencia de las anteriores investigaciones, en Singapur se indagó sobre los efectos de estas estructuras externamente midiendo los efectos de la vegetación en el medio ambiente. Se registró una reducción de la temperatura a 30°C, salvo variaciones, a causa del tipo de vegetación, mientras más espesa la vegetación menor la temperatura. Este parámetro dependía del porcentaje de humedad del suelo, a mayor humedad menor temperatura. La altura a la cual se hacía la medición también modificaba las condiciones, mientras más se alejaba de la base vegetativa la temperatura se asimilaba más a la ambiente promedio en un rango de hasta 4.2 °C de diferencia entre una estructura verde y una tradicional de concreto (Wong *et al.*, 2002).

Se han hecho varios modelos para estudiar el potencial de confort térmico de las azoteas verdes. En India se obtuvo que los resultados del modelo hecho por Kumar y Kaushik (2004) fueron adecuados para simular la temperatura externa e interna del aire en edificaciones con cobertura vegetal con rangos de error entre los $\pm 3.3\%$ y $\pm 6.1\%$ respectivamente.

Ya existen investigaciones sobre techos verdes en México. En la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, la cual tiene un clima cálido-semi-húmedo se obtuvieron resultados muy favorables. Se experimentaron dos procesos constructivos para techos: Concreto Armado y Domotej (sistema de tabique artesanal de arcilla roja). Se encontró que pese al retraso y amortiguamiento térmico logrado con el sistema de techo Domotej de 3°C es conveniente reducir más su incidencia en la temperatura interior de la vivienda por lo que se propuso el Techo Verde-Domotej. El Techo Verde-Domotej, reduce la penetración de calor por el techo, y por consecuencia mejora el confort térmico de la vivienda (Castañeda-Nolasco y Vecchia, 2007).

En lo que respecta a los beneficios hidrológicos en Carolina del Norte EEUU se experimentaron techos verdes obteniendo que estos retuvieron hasta el 64% del total de la precipitación observada. El pico de la tormenta se redujo significativamente en más del 75%. Los estudios de calidad del agua demostraron que los techos verdes actúan como una fuente de nutrientes de N y P (Hathaway *et al.*, 2008). Según un documento publicado por el Consulado Nacional de Investigación de Canadá, la azotea verde que se experimentó por Liu (2003) retuvo 245mm de 450 mm de lluvia durante el periodo abril-septiembre 2002, lo que significa una reducción del 45%.

Por último, uno de los cuestionamientos ante la tecnología techo verde es su sustentabilidad. Un ejemplo de su factibilidad es el techo verde de la Universidad de Waterloo en Canadá. Se concluyó que los beneficios ecológicos y sociales sobrepasan los costos de la implementación del techo verde. El costo inicial no debe de ser determinante porque los beneficios de salud, estética y ambientales estarán presentes por muchas décadas (Dam *et al.*, 2000).

2.1. Beneficios Ambientales y Sociales de los Techos Verdes

Según el Consejo de Construcciones Verdes de los Estados Unidos de América (USGBC, 2010) ante los estándares del líder en energía y diseño ambiental (LEED), los techos verdes promueven el uso eficiente de la energía y el diseño de las edificaciones en armonía con el medio ambiente. Estos reducen la temperatura en la edificación mejorando

la productividad en las labores diarias y logrando un menor consumo y costo de energía eléctrica por refrigeración, calefacción y aire acondicionado. Al disminuir el consumo eléctrico, las edificaciones decrecen la necesidad de quemar combustibles para generar energía, con esto las emisiones de gases contaminantes y los gastos federales en petróleo ya que optimizan el aislamiento térmico de las edificaciones generando confort. La superficie de la cubierta no supera la temperatura ambiental (Zhang *et al.*,2006).

Las estructuras verdes crean nuevos ecosistemas. Integran las edificaciones al entorno natural, lo que aumenta su atractivo visual. Habilitan espacios no usados para actividades recreativas o bien para cultivo de hortalizas y flores, convirtiéndose en un espacio productivo. Los techos verdes tienen una vida más larga que los tradicionales ya que la vegetación crea una capa protectora. Moderan el efecto urbano de isla de calor al retener la humedad y soltarla al ambiente en forma paulatina evitando los cambios bruscos de temperatura y equilibrando sus puntos máximos a lo largo del día (Hake, 2004).

El espacio verde recuperado ayuda a purificar el aire reduciendo los niveles de CO₂. Permite sedimentar el polvo en suspensión y filtrar las partículas contaminantes durante las lluvias. Reduce el riesgo de inundaciones urbanas al absorber gran parte de la precipitación en las tormentas, retardar el escurrimiento y purificar en gran medida la lluvia ácida. Además de todo lo anterior producen aislamiento acústico (Getter y Rowe, 2006).

Las eco-estructuras mejoran el despeño, reducen el estrés y los malestares físicos y psicológicos. Crean ambientes más cómodos y relajantes por la presencia de la vegetación (Wong *et al.*,2003).

2.2. Efecto Térmico de los Techos Verdes

La implementación de una cantidad considerable de techos verdes en las zonas urbanas es una opción viable para prevenir la falta de confort térmico, el gasto excesivo de energía eléctrica, la reducción de las fluctuaciones térmicas en la construcción y el efecto de isla de calor (Liu y Minor, 2005). Una buena protección térmica puede reducir de manera considerable el impacto de la energía solar sobre todo en verano. Los eco-techos pueden ofrecer esta protección. De acuerdo a Niachou *et al.* (2001) las plantas tienen un

importante impacto sobre el clima. El follaje protege las edificaciones de la radiación solar, controla la temperatura y la humedad dentro de las construcciones, también protege a éstas de la erosión causada por el viento. Las plantas debido a sus funciones biológicas, como la fotosíntesis, respiración, transpiración y evaporación absorben, cantidades importantes de radiación solar.

Kumar y Kaushik (2005) desarrollaron un modelo que analiza con una precisión de $\pm 6.1\%$ las variaciones de la temperatura interna. Con los resultados se estudia la implementación de una cubierta térmica a un techo verde obteniendo un potencial de enfriamiento de 3.02Kwh por día para una IAF (índice de área foliar) de 4.5 para mantener una temperatura media de aire de la habitación de 25.7 °C. En el trabajo de Palomo- Del Barrio (1998) a través de un modelo matemático, se da una representación simplificada del comportamiento térmico dinámico en verano de los techos verdes, llegando a la conclusión de que éstos no actúan como dispositivos de enfriamiento, sino como aislantes mediante la reducción del flujo de calor a través del techo; considerando como los parámetros más importantes el IAF, la geométrica del follaje, la densidad aparente del suelo, su grosor, y su contenido de humedad.

El flujo de calor a través de las paredes y los techos raramente alcanza un estado de equilibrio por eso es importante ser precisos al calcular las cargas de calentamiento y enfriamiento para tomar en cuenta la capacidad de almacenamiento de la estructura (Stephenson, 1957). Mackey y Wright (1943) introducen el concepto periodic sol-air temperature (temperatura sol-aire periodica) que combina las transferencias convectivas y radiactivas que ocurren en superficies externas en una única temperatura equivalente. Dividen la distribución de temperatura en los edificios en tres partes: la temperatura del aire en el ambiente, el incremento equivalente de temperatura causado por la radiación incidente absorbida y la temperatura equivalente aumento/ descenso causado por el intercambio de la temperatura de radiación entre la superficie y sus alrededores.

El concepto green sol-air sigue vigente para predecir el flujo de calor a través de las edificaciones en muchos de los estatutos de construcción como el ETTV (del inglés Envelope Thermal Transfer Value) para el criterio de diseño (Chua y Chou, 2009). Con

concepto de Mackey y Wright en el trabajo Yu y Hien (2006) se establece un cálculo más simple para predecir los beneficios térmicos de las plantas alrededor de las construcciones al que se le conoce como Green sol-air temperature. Éste calcula el flujo de calor periódico a través de capas homogéneas o multicapas y explica el comportamiento de la temperatura exterior en las zonas urbanas a partir de los tres parámetros principales: el clima, las plantas y las edificaciones.

Las islas de calor en las ciudades se originan principalmente por el avance del desarrollo y los cambios en las propiedades térmicas y reflectivas de la infraestructura urbana, así como por el impacto que tienen los edificios sobre el microclima local (Köhler *et al.*, 2003). Las ciudades se caracterizan por tener superficies secas e impermeables. A medida que el desarrollo avanza, las plantas van desapareciendo y son reemplazadas por edificios y pavimentos (Davis *et al.*, 2008). Este cambio conduce a que haya menos sombra y humedad en el aire para mantener la ciudad fresca y contribuye a que las temperaturas sean más elevadas (Giridharan *et al.*, 2008).

Las propiedades de los materiales presentes en una ciudad, en particular la reflectancia solar, el grado de emisión térmica y la capacidad específica de calor, también afectan la formación de la isla de calor urbana, ya que determinan de qué manera se refleja, emite y absorbe la energía proveniente del sol (Vecchia *et al.*, 2001). La reflectancia solar o albedo de una superficie es el porcentaje de energía solar que la misma refleja (Watkins *et al.*, 2008). Este atributo se relaciona con el color de la superficie. Las ciudades suelen tener un albedo bajo. La energía que absorben aumenta la temperatura de las superficies y contribuyen a la formación de islas de calor. A su vez, el grado de emisión térmica de un material, su habilidad de emitir calor, determina la temperatura (Giridharan *et al.*, 2007). Otra de las propiedades es la capacidad específica de calor de un material, que se refiere a su habilidad de almacenar calor. Por otro lado la distribución de los edificios en una ciudad también afecta ya que suele determinar la formación de corrientes de viento y la absorción de energía (Palomo-Del Barrio, 1998). Las zonas edificadas ofrecen más superficie de absorción de calor, que irradian lentamente durante la noche.

La cubierta vegetal en las paredes de las construcciones en las zonas urbanas reduce los efectos del llamado cañón urbano. Los cañones urbanos de las calles son filas de edificios altos en ambos lados. La cantidad de radiación solar recibida por un cañón urbano depende, por lo general, de la altura de los edificios y de la orientación del cañón (Eleftheria y Jones, 2008).

La radiación solar se refleja en numerosas superficies, se da el fenómeno conocido como retención solar, permitiendo así mayores oportunidades de absorción. Cerca del 60% del conjunto de las radiaciones se libera al aire como calor sensible y el 30% se almacena en las fachadas y las calles. Sólo el 10% restante es el responsable de la evaporación, ya que las superficies artificiales no almacenan agua como las naturales, y suele haber pocas áreas verdes en una ciudad. La temperatura urbana se reduce de manera importante cuando la superficie de las edificaciones está cubierta por vegetación. En zonas áridas la temperatura del aire al nivel del techo si existe cobertura vegetal llega a un máximo de 26°C mientras que dentro del cañón llega a un máximo de 11.3°C (Eleftheria y Jones, 2008).

2.2.1. Balance de energía para edificaciones

Para las condiciones térmicas de una edificación se requiere de la magnitud de las pérdidas y ganancias de calor que está teniendo en un momento dado. El edificio tenderá a calentarse cuando las ganancias de calor sean mayores que las pérdidas, y a enfriarse en la situación contraria. En cualquiera de los dos casos se puede llegar fácilmente a condiciones interiores no óptimas, las cuales, en situaciones extremas, exigirán sistemas de climatización artificial (refrigeración y/o calefacción) para ser contrarrestadas.

En el caso de los techos verdes se debe tomar en cuenta un elemento más que será la capa vegetal posicionada en la azotea. Estos fenómenos se pueden estudiar a partir de la ecuación del balance térmico (Watkins *et al.*, 2006).

$$Q_i + Q_s \pm Q_c \pm Q_v - Q_e \pm Q_m \pm Q_v = 0 \quad (1)$$

donde:

Q_i = Ganancias internas

Q_s = Ganancias solares

Q_c = Pérdidas o ganancias por conducción

Q_v =Pérdidas o ganancias por ventilación - convección

Q_e = Pérdidas por evaporación

Q_m = Pérdidas y ganancias por sistemas mecánicos de climatización

Q_{v_2} = Pérdidas o ganancias por capas vegetales

2.2.2. Régimen térmico de sistemas multicapa

En los sistemas techo verde existen una serie de capas de distintos orígenes que ocasionan un complejo estudio de transferencia de calor. La forma de representación matemática más simple de la fluctuación del régimen térmico de la naturaleza es asumir que en todas las capas, sea cual sea su composición, la temperatura oscile como una función armónica pura (senoidal) del tiempo alrededor de valores promedio. Esta idea también se aplicada a los sistemas techo verde para estudiar su comportamiento térmico.

Según Hillel, (1998) si se asume que la temperatura promedio del sustrato es siempre la misma y se toma la temperatura inicial como $t=0$ en la superficie ($z=0$) se encuentra a la temperatura promedio, la temperatura en la superficie se puede expresar como una función del tiempo:

$$T(0,t) = T_{ave} + A_0 \sin \omega t \quad (2)$$

donde:

T = temperatura; °C

t = tiempo; h

T_{ave} = temperatura promedio; °C

A_0 = amplitud de fluctuación térmica; °C

ω = frecuencia radial; s^{-1}

ω es 2π veces la frecuencia instantánea. En el caso de las variaciones diurnas, el periodo es de 86,400 s (24 h), entonces ω se dividirá en este periodo de tiempo. La mejor manera de hacer estos cálculos es preferentemente en radianes.

La última ecuación será la de la condición de frontera para $z=0$. Para esto se asume que a una distancia de profundidad infinita ($z=\infty$) la temperatura es constante e igual a T_{ave} . Bajo estas condiciones la temperatura en cualquier profundidad z es también una función senoidal del tiempo.

$$T(z, t) = T_{ave} + A_z \sin \omega t + \phi(z) \quad (3)$$

A_z y Φ son funciones de z y no son funciones del tiempo. Éstas se determinan a partir de sustituir la solución de la ecuación 2 en la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D_h \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4)$$

Esta ecuación lleva a:

$$T(z, t) = T_{ave} + A_0 \left[\text{seno} \left(\omega t - \frac{z}{d} \right) \right] e^{-\frac{z}{d}} \quad (5)$$

donde:

d = constante de profundidad característica; m

d también llamada profundidad amortiguamiento es la profundidad a la cual la amplitud de la temperatura decrece a $1/e = 0.37$ veces la amplitud de la superficie de la capa A_0 . Ésta constante está relacionada a las propiedades térmicas del sustrato y a la frecuencia de las fluctuaciones de temperatura como se muestra:

$$d = \left(\frac{2k}{C\omega} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2D_h}{\omega} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

En cualquier profundidad la amplitud de fluctuación de temperatura A_z es más pequeña que A_0 a causa del factor $e^{-z/d}$ y existe un cambio de fase (por ejemplo un retraso del tiempo en la temperatura pico) igual a $-z/d$. La disminución de amplitud y el aumento en el espaciamiento entre fase con la profundidad son fenómenos típicos en la propagación de una onda periódica de temperatura en las capas. La razón física del amortiguamiento y el retraso de las ondas de temperatura con la profundidad es que cierta cantidad de calor es absorbido o liberado a través del área de propagación de calor cuando la temperatura del sustrato conductor incrementa o decrece, respectivamente.

2.2.3. Confort térmico

Hay muchas maneras de evaluar el confort térmico que dependen de una serie de características física del medio ambiente y la comodidad o incomodidad que los humanos que experimentan. Estas características cubren la interacción de la temperatura simple del aire, la temperatura radiante media y la temperatura operativa. El estándar ISO para el confort térmico es la norma ISO 7730. Algunos de los parámetros que interactúan en el cálculo del confort térmico son: la temperatura del air y su velocidad relativa, la presión de vapor, la ropa y el nivel de actividad humano (Watkins et al., 2006).

Tradicionalmente, la estrategia de control de la fuente de refrigeración se propone con base en la temperatura interior constante. El cambio de la temperatura interior a una cercana a la temperatura ambiente resulta un beneficio para la salud ya que la gente puede asegurar su propio bienestar a través del ajuste fisiológico que puede mejorar su sistema inmunológico. De algunos experimentos hechos sobre el confort térmico dinámico se obtuvieron las siguientes conclusiones: la temperatura de confort está relacionada con la temperatura exterior y para el clima, no hay temperatura de confort universal y cada comunidad debe tener su propia percepción del confort térmico (Zhang *et al.*, 2006).

No se cuenta con datos sobre el rango de confort térmico en la zona de Santiago de Querétaro pero se sabe de otros lugares de clima semiárido que ya han hecho estudios al interior de edificaciones. Por ejemplo los estudios sobre confort térmico en la provincia de Mendoza en Argentina, que es una zona de clima semiárido, el confort térmico interior se

establece entre los 18°C y los 26°C (Mercado *et al.*, 2010). Estos valores serán los considerados para definir la temperatura de confort para esta tesis.

Zhang *et al.* (2006), utiliza una relación entre la temperatura óptima con respecto a la temperatura interior y la exterior que se presenta como:

$$t_i = kt_e + b \quad (7)$$

donde:

k,b = constantes

t_e= temperatura externa; (°C)

t_i= temperatura interna; (°C)

Hay muchas correlaciones diferentes entre la temperatura neutra (t_n) y la temperatura externa (t_e) la que utilizan Wai y Mui (2003) es:

$$t_n = 18.303 + 0.158t_e \quad (8)$$

Para un cálculo más aproximado Zhang *et al.* (2006), incluye la temperatura interior a la neutra.

$$t_n = 9.22 + 0.14t_e + 0.48t_i \quad (9)$$

2.3. Hidrología de los Techos Verdes

Para tener condiciones ambientales más confortables y sanas para el desarrollo humano se requiere conservar parte del agua provista por la precipitación. El flujo de agua en el suelo es un proceso muy complejo. Ésta está en constante movimiento en el suelo y este movimiento depende de la cantidad de agua y el tipo de suelo. Gran parte del agua que trae la lluvia a las zonas urbanas no permanece en sus superficies, ésta se desplaza a través de los drenes y alcantarillado (Aparicio-Mijares, 1992).

El proceso lluvia-escurrimiento en zonas urbanas, presenta características muy peculiares. La lluvia es interceptada parcialmente por la vegetación, principalmente por las ramas de los árboles, antes de llegar al suelo. Al llegar la lluvia al suelo se presentan dos fenómenos simultáneos: la lluvia se infiltra en el terreno y comienza a mojarse la superficie, llenando las depresiones. Los procesos anteriores continúan hasta formarse un tirante suficiente que rompa la tensión superficial. Este hecho sucede cuando la intensidad de la lluvia es mayor que la capacidad de infiltración del terreno y así se inicia el escurrimiento superficial (Nanía, 2003).

Al ocurrir el escurrimiento superficial se presentan varios procesos pero para este estudio lo que importa es el agua que se infiltra, ésta puede hacerlo con una velocidad variable o constante, que depende del grado de saturación del terreno, intensidad de la lluvia y volumen de agua almacenado sobre la superficie. Los techos verdes son una forma de conservar el agua de la precipitación y con ésta sus beneficios además de tener la posibilidad de regular los procesos de lluvia-escurrimiento en las zonas urbanas (UAM, 2007).

2.3.1. Balance hídrico

El balance hídrico, es el cálculo de las entradas y salidas de agua y los cambios de almacenamiento de la misma que permite conocer la cantidad de agua en la superficie de la Tierra. La entrada principal es la precipitación y la pérdida por evapotranspiración (Aparicio-Mijares, 1992).

El escurrimiento se produce cuando la precipitación excede la capacidad de evapotranspiración bajo las condiciones ambientales del lugar. La evaporación o evapotranspiración son otra forma en que el agua se transporta fuera de las zonas urbanas. Éstas dependen de la disponibilidad de humedad del suelo, la temperatura y humedad relativa del aire. Estos transportes se dan mientras haya energía y agua disponible para el cambio de fase. El agua que no se puede infiltrar o evapotranspirar al suelo escurre. Este escurrimiento generalmente termina en los arroyos, ríos o lagos a las zonas urbanas creando un aumento del caudal y de la corriente (FAO, 2009). Ver Figura 2.

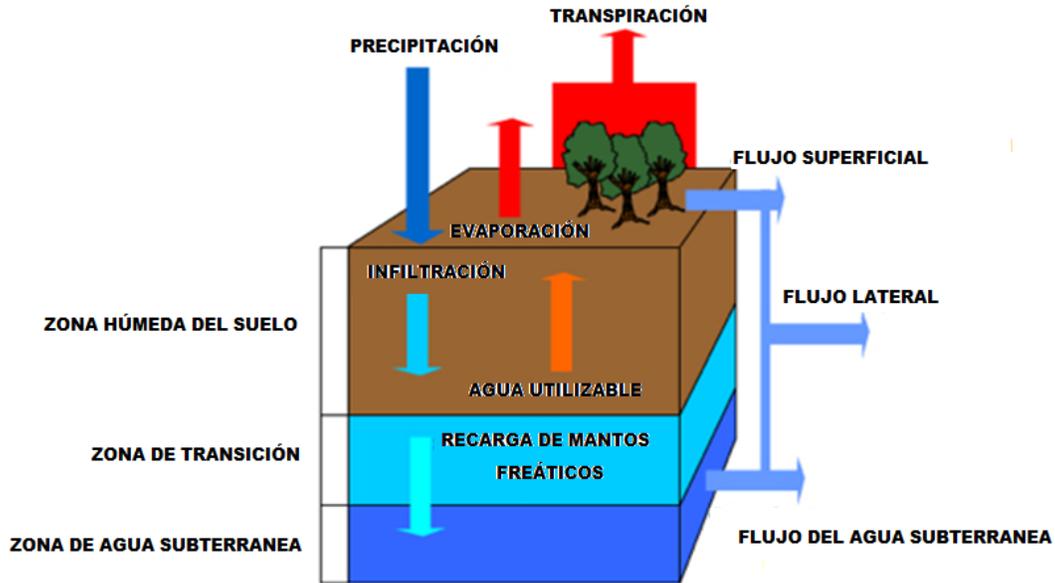


Figura 2. Balance Hídrico (Strahler, 2006)

La ecuación general del balance hídrico o de masa es:

$$P + E + R + \frac{I}{D} + \Delta S = 0 \quad (10)$$

donde:

P= precipitación; mm

E=evaporación total; mm

R= escurrimiento; mm

I= infiltración profunda; mm

D= drenaje; mm

ΔS = diferencial de Almacenamiento ó Cambio de Stocks; mm

2.3.1.1. Teoría de la intercepción

La intercepción es el volumen de agua retenido por una cubierta vegetal que se transforma en evaporación y modifica la intensidad de precipitación en función del tiempo. Los factores que influyen en la intercepción son: las características de la cubierta vegetal, las características de la superficie vegetada, el tipo de tormenta, entre otros (Nanía, 2003).

Según González del Tánago (2002) en su informe para la Universidad de Madrid uno de los factores principales que influyen en la intercepción es la precipitación (P). Es importante conocer la altura de ésta pues a mayor altura de precipitación mayor es intercepción, esto hasta obtener un valor más o menos constante dado por la capacidad de almacenamiento de agua de la cubierta vegetal (S). De esta forma la intercepción es definida por la siguiente ecuación:

$$I = aP^2 + bP \quad (11)$$

Otro factor es la intensidad (i) donde el porcentaje de agua interceptada disminuye al aumentar la intensidad de la lluvia. El último factor es el estado atmosférico pues éste hace que la cantidad total de agua interceptada dependa de la tasa de evaporación desde la cubierta vegetal que a su vez depende de las condiciones evaporantes de la atmósfera (temperatura, tasa de humedad, viento, etc.). El proceso general de la intercepción está dado por la siguiente ecuación:

$$I = P - R \quad (12)$$

donde:

I= intercepción; mm

P= precipitación; mm

R= infiltración; mm

Algunos autores proponen la siguiente fórmula para el cálculo de la intercepción (Nanía, 2003) donde S es un volumen fijo, c es una constante y E es la evapotranspiración. Los parámetros anteriores deben ser obtenidos de forma experimental.

$$I(t) = S + cEt \quad (13)$$

2.3.1.2. Teoría del almacenamiento

Según Sotelo-Ávila (1974) en su libro de Hidráulica general, de acuerdo con el principio de conservación de la materia, de la masa de fluido que en la unidad de tiempo entra a un volumen especificado dentro del flujo, una parte queda almacenada en su interior y otra sale del volumen. Si el volumen que se estudia es de forma y magnitud constante, el almacenamiento no puede ser indefinido. El principio de conservación de la materia aplicado a un volumen de control fijo se expresa como:

$$m_n + v_v = 0 \quad (14)$$

donde:

m_n =Cantidad de masa neta que atraviesa la superficie de la frontera del volumen, en la unidad de tiempo.

v_v = rapidez de variación de la masa contenida en el volumen.

Este principio se aplica tanto para un volumen de control de tamaño diferencial como para uno finito, de lo cual se deriva la Ecuación de Continuidad:

$$Q = vA \quad (15)$$

donde:

Q = es la caudal; m^3/s

v = velocidad; m/s

A = área; m^2

2.3.1.3. Teoría de la permeabilidad y flujo en suelos finos saturados

En suelos finos saturados, como las arcillas, el movimiento se apega a la ley de Darcy. Según el libro de Mecánica de Suelo No Saturados de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos(2004) los suelos por su propia génesis son anisotrópicos. En los suelos saturados se aplica la ley de Darcy para explicar su flujo donde el agua que pasa a través de un suelo es proporcional al gradiente hidráulico. Esta ley se expresa como:

$$v = Ki \quad (16)$$

o

$$V = KiAt \quad (17)$$

donde:

v= velocidad de descarga; cm/s

K= coeficiente de permeabilidad; cm/s

i= gradiente hidráulico

V= cantidad de agua; cm³; m³

A= área; cm², m²

t= tiempo; s, min, h, días

Si se tiene una porción de suelo sujeta a una carga h_1 por un lado y una más pequeña h_2 se da un flujo de agua para una longitud l directamente proporcional al gradiente hidráulico,

$$i = \frac{h_1 - h_2}{l} \quad (18)$$

La ley de Darcy es válida para velocidades pequeñas en flujo laminar. La conductividad hidráulica K depende de las propiedades físicas del suelo y otros factores como la temperatura que afecta la viscosidad del agua. El área del suelo saturado a través de la cual fluye el agua tiene fases líquida y sólida. El área disponible para la filtración es la que aportan los vacíos de donde se desprende el concepto de velocidad de infiltración que se puede establecer con la Ecuación de Continuidad:

$$A_v v_f = Av \quad (19)$$

así,

$$v_f = \frac{A}{A_v} v \quad (20)$$

Para un espesor unitario se tiene:

$$\frac{A}{A_v} = \frac{1}{n} = \frac{1+e}{e} \quad (21)$$

Por lo que la velocidad de filtración es:

$$v_f = \frac{1+e}{e} v \quad (22)$$

Que es la velocidad promedio del agua en dirección al flujo. Para ésta se supone que el recorrido del agua es recto, sin embargo, esto no es cierto ya que los poros del suelo no lo permiten y la longitud verdadera (L_r) será mayor a la de una longitud (L) en línea recta por lo que la velocidad real v_r es:

$$v_r = \left(\frac{1+e}{e} \right) \frac{L_r}{L} v \quad (23)$$

La ley de Darcy funciona sólo para flujos constantes donde la carga hidráulica y el gradiente en cada punto no cambian con el tiempo. Para un flujo unidimensional, siendo v_x la velocidad del agua en dirección x , la proporción del aumento de la humedad volumétrica Θ con el tiempo en su forma general es:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot v \quad (24)$$

Considerando la ley de Darcy

$$v = -K \nabla H \quad (25)$$

y para una sola dirección:

$$v_x = -K \frac{\partial H}{\partial x} \quad (26)$$

donde:

H= carga hidráulica

K= permeabilidad

Si se aplica la Ley de Darcy a la ecuación de continuidad se obtiene la ecuación general de flujo la cual considera que el agua está conectada de manera continua a través de la región de flujo, que no hay gradiente térmico, que la fuerzas inerciales son despreciables

con respecto a las viscosas y que no hay acción biológica que modifique el flujo o el medio poroso. Para una condición unidimensional la ecuación queda:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial H}{\partial x} \right) \quad (27)$$

2.3.1.4. Teoría del escurrimiento superficial

El escurrimiento es la parte de la precipitación que aparece en las corrientes fluviales superficiales, perennes, intermitentes o efímeras, y que regresa al mar o a los cuerpos de agua interiores. Es el deslizamiento virgen del agua, que no ha sido afectado por obras artificiales hechas por el hombre (UNAM, 1996). De acuerdo con las partes de la superficie terrestre en las que se realiza el escurrimiento, éste se puede dividir según la Figura 3 en:

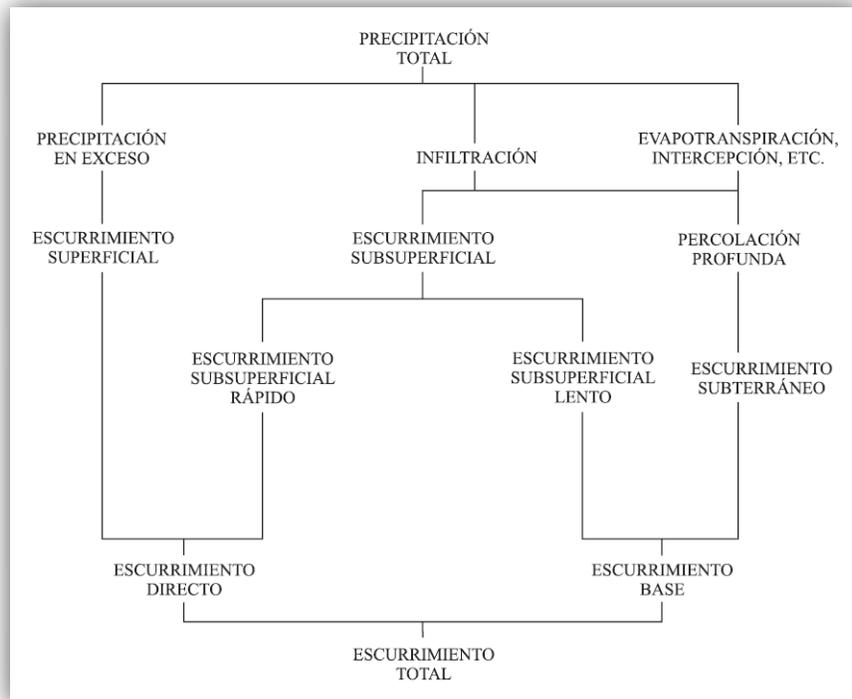


Figura 3. Diagrama del Escurrimiento (UNAM, 1996)

El escurrimiento superficial o escorrentía es la parte del agua que escurre sobre el suelo a partir de la precipitación. Los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes: el área de la zona de estudio, la altura total de la precipitación, las características generales o promedio de la cuenca (forma, pendiente, vegetación, etc.), la distribución de la lluvia en tiempo y espacio. Según Aparicio-Mijares (1992) el análisis de estos escurrimientos se basa en la Obtención del caudal pico utilizando el método racional con la fórmula:

$$Q_p = 0.278CiA \quad (28)$$

donde:

Q_p = caudal pico; m^3/s

C = coeficiente de escurrimiento

i = intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la zona; (mm/h)

A = área; (m^2)

Nota: El coeficiente de escurrimiento para un techo verde de tipo extensivo con suelo arcilloso se encontrará entre los valores 0.13 a 0.17 si su pendiente va de 0.02 ó menos (SIAPA, 2010).

Este método considera que existe una lluvia uniforme sobre el área durante un tiempo por lo que el caudal será constante en la descarga. Éste permite saber el caudal máximo de la tormenta cuando la intensidad de la lluvia es constante en un tiempo, que se considera igual al tiempo de concentración. El tiempo de concentración para un punto dado, se define como el tiempo que tarda una gota de agua en viajar desde el punto más lejano hasta la salida de la zona de estudio. Su fórmula es la siguiente:

$$t_c = t_{cs} + t_t \quad (29)$$

donde:

t_c = tiempo de concentración

t_{cs} = tiempo de concentración sobre la superficie

t_t = tiempo de traslado a través de los colectores

III. METODOLOGÍA

En este capítulo se abordan los procesos y materiales utilizados para la evaluación del confort térmico y comportamiento hidrológico en edificios urbanos con techos verdes para regiones semiáridas. Lo anterior a partir del registro abril 2009 - abril 2010 de la temperatura interior de los salones con eco-estructuras y los datos obtenidos en campo de los eventos de precipitación presentados en las mismas fechas.

3.1. Localización y Descripción del Sitio Experimental

El sitio experimental se encuentra en los $20^{\circ}35'27.41''$ de latitud Norte y a los $100^{\circ}24'47.80''$ de longitud Oeste que corresponde al techo del edificio de salones del Departamento de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI). Ver Figura 4 para precisar el sitio dentro del Campus Cerro de las Campanas de la UAQ.



Figura 4. Sitio experimental, $20^{\circ}35'27.41''$ Norte - $100^{\circ}24'47.80''$ Oeste

Con base a los registros meteorológicos del Municipio de Querétaro (2009), la temperatura media anual es de 18°C . Los meses más calurosos son mayo y junio; alcanzando temperaturas máximas de 36°C , en tanto que los más fríos son los meses de

diciembre y enero, en los que se registran temperaturas mínimas de hasta -3°C . La precipitación media anual es de 555 mm y se da principalmente entre los meses de mayo y septiembre. De acuerdo con el condensado de precipitación de la Comisión Nacional del Agua (2009) en el periodo 1921 - 2009 ha llegado a llover hasta 400mm en tan sólo un mes, siendo julio el mes más abundante en precipitaciones en esta entidad.

3.2. Descripción del Sistema Techo Verde

Los techos verdes se sitúan sobre las áreas 2, 4, y 5 de las aulas de Posgrado de la Facultad de Ingeniería (DEPFI) de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Como se aprecia en la Figura 5. Cada área verde (A1, A4 y A5) cuenta con un tratamiento impermeable diferente; impermeabilizante, loseta y membrana respectivamente. El área 3 tiene la finalidad de ser un control contiguo mientras las áreas 1 y 6 son despreciadas para el estudio.

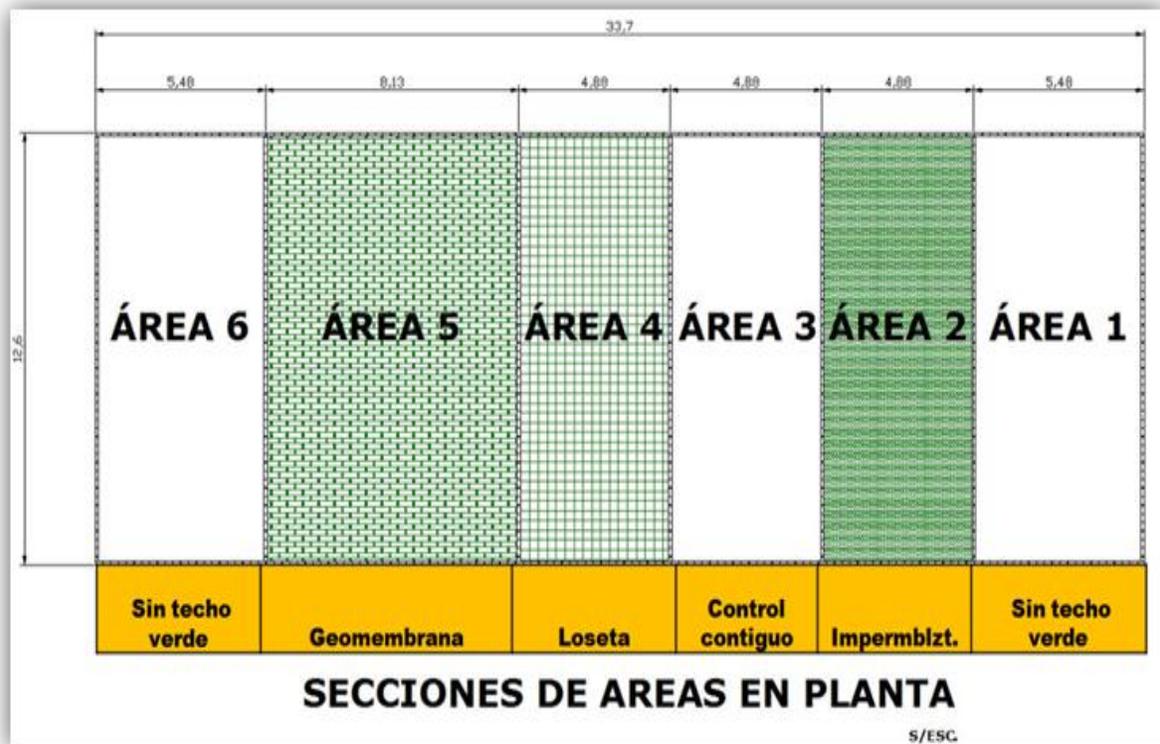


Figura 5. Asignación de las áreas con techo verde y sus sistemas impermeables

Existe una estructura de control externa la cual está fuera de la zona de influencia de los techos verdes. A éste se le designa como control externo (A7). La edificación cuenta con losa de concreto de 10 cm de espesor sobre la cual se posicionan las eco-estructuras. Las dimensiones de cada azotea verde se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones de las áreas a evaluar para la experimentación

Área	Características	Ancho (m)	Largo (m)	Superficie (m ²)
A ₂	Impermeabilizante Asfáltico	4.88	12.6	61.49
A ₃	Control contiguo	4.88	12.6	61.49
A ₄	Loseta	4.88	12.6	61.49
A ₅	Membrana	8.13	12.6	102.44
A ₇	Control externo	3.00	4.00	12.00

Las estructuras techo verde están conformadas por tres capas: superficie impermeable, suelo y vegetación. Ver figura 6.

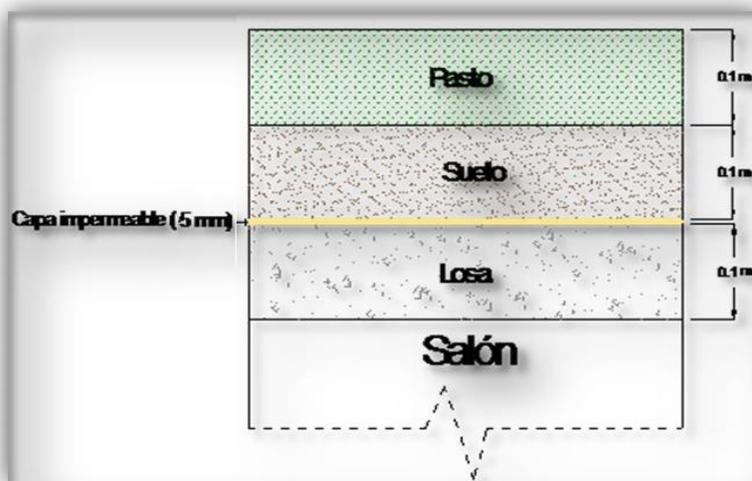


Figura 6. Corte transversal del techo verde con loseta DEPMI-UAQ

3.2.1. Tratamientos

Los tratamientos techo verde se definen por el procedimiento aislante de humedad que tienen. También se les denominará tratamientos a las superficies que no cuenten con azotea verde pero que sirven de comparativo para la experimentación. Ver la Tabla 1.

3.2.1.1. Impermeabilizante asfáltico

Se define así por la opción utilizada como cubierta aislante de humedad. Éste se instalará en la A₂. El impermeabilizante asfáltico es un impermeabilizante de alta calidad, con base en agua, coloides minerales tixotrópicos y fibras de refuerzo. Esta emulsión garantiza una excelente adherencia sobre concreto y mortero por lo que bloquea la infiltración.

3.2.1.2. Loseta

Este tratamiento, para la superficie A₄, se define por una superficie impermeable a base de pedacería de loseta de 5 mm de espesor. Ésta es adherida a la losa con cemento tradicional y resanada en las juntas con cemento blanco para impedir la infiltración.

3.2.1.3. Membrana

Este tratamiento se implementará en la superficie A₅, que es la de mayor tamaño. Éste es definido por es una cubierta de geomembrana de poliuretano de alta densidad color negro.

3.2.1.4. Control contiguo

El control contiguo es el tratamiento de la losa de área 3. Es una superficie que se encuentra entre dos techos verdes que cuenta sólo con un acriltecho tradicional de color rojizo para impermeabilizar la losa de concreto.

Este tratamiento puede recibir las influencias térmicas de los techos verdes por lo que no es el mejor control para el comportamiento térmico. Pese a lo anterior, éste servirá como superficie de captación de lluvia para comparar el volumen de escurrimiento de la misma al no tener azotea verde vs a las superficies que sí la tienen.

3.2.1.5. Control externo

El tratamiento control externo está definido como el control que al estar fuera de la edificación donde se encuentran los techos verdes no recibe las influencias de los mismos. Éste es un comparativo importante ante los efectos térmico de las eco-estructuras. Éste lleva el mismo sistema impermeable que el control contiguo antes mencionado.

3.2.2. Suelo

El suelo utilizado como sustrato en los techos verdes corresponde a un vertisol dominante en la zona, Figura 7, sus propiedades fisicoquímicas se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas de la capa de suelo

<i>Parámetro</i>	<i>Criterio-Método</i>	<i>Resultados</i>
Tamaño de partícula	Hidrómetro	20% Arena 25% Limo 55% Arcilla
Diámetro promedio	D ₅₀	Malla $\Phi=1$ mm
Densidad aparente	Relación volumen-masa	0.96
Densidad de partícula		0.70
Porosidad		4%
Humedad		4%
Humedad gravimétrica		0.04
Humedad volumétrica		0.03
Color	FAO	Café oscuro
PH	Potenciómetro	8.42

Para conocer estas propiedades se necesita un análisis de las relaciones volumen - masa. Para conocer el tamaño de partícula se debe realizar un cribado por los diámetros de malla que satisfagan las características granulométricas del suelo. Las partículas finas se analizan mediante el método del hidrómetro.

Para ver el análisis de las fases sólido-líquido-gas ir al anexo A y para la curva granulométrica ir al anexo B.



Figura 7. Suelo del los techos verdes

3.2.3. Vegetación

La vegetación a utilizar en el sistema Techo verde es un pasto *Pennisetum Clandestinum*, comúnmente llamado Kikuyo. Es una especie perenne tropical de la familia de las gramíneas de rápido crecimiento y de gran tolerancia a las sequías. Posee matas de hojas laminares, muy angostas que alcanzan de 10 a 13 cm de altura. Se conserva en mejor estado alrededor de los 5 cm de alto. Es muy resistente al tránsito rudo, debido a su fuerte red de raíces (Dávila-Suarez y Chaverra-Gil, 1978). Ver Figura 8.



Figura 8. Vegetación Techos Verdes UAQ, Pasto *Pennisetum Clandestinum*

3.2.3.1.El estado de la vegetación

Al influir directamente el estado físico de la vegetación sobre las mediciones es importante conocer en que condición está. Por cuestiones económicas se requiere que la vegetación se conserve con el menor mantenimiento posible por esto, la vegetación se deja sin riego abasteciéndose únicamente de la lluvia existente.

La posibilidad de que se alojen especies de tipo invasivas no representa un problema para los fines de este estudio. No se requiere eliminarlas ni evitar que se alberguen en las azoteas verdes.

Para fines de comparación sobre el desempeño de los techos verdes se vigiló la apariencia de la vegetación: seca, verde o en algún estado intermedio. Se llevó un registro diario de su aspecto demás de respaldarlo mediante fotografías cada vez que se notaba un cambio significativo en la apariencia del follaje.

3.3. Acondicionamiento estructural de los tratamientos

Para la instalación de los tratamientos se procedió a limpiar la superficie de la losa. Ésta era cubierta por un impermeabilizante tipo acriltecho el cual se removió incluyendo el chapopote que llevaba debajo. Una vez raspada y limpia la superficie se puede proceder a la instalación de los nuevos tratamientos impermeables. Ver Figura 9.

Para controlar el comportamiento experimental de cada techo se debe construir un pretil para confinar el sustrato y separar los tratamientos. El pretil está hecho de tabicón de 11 cm de largo por 14 cm de ancho.



Figura 9. Preparación de la losa para la instalación del sistema impermeable

Cada superficie experimental propuesta cuenta con perforaciones hechas en los volados de la losa. A éstos son adaptados tubos de PVC de 3” para permitir la salida del escurrimiento, Figura 10.



Figura 10. Tubos de PVC de 3” para la salida del escurrimiento

Los conductos están cubiertos por malla galvanizada tipo mosquitero a la que se le sobrepone grava a manera de filtro evitando con ésta la pérdida excesiva del suelo, Figura 11.



Figura 11. Filtros de malla galvanizada

La función de los tubos es encausar y concentrar el agua que el sustrato o la superficie control no tiene capacidad de retener evitando el derrame descontrolado y creando una vía de colección. Se dispusieron tubos en las dos salidas del parte aguas de la losa. Las pendientes son suaves pero pueden llevar los escurrimientos a los tubos de desfogue. Los tubos posteriores de los salones están conectados a tinacos a los que se les adaptó una manguera graduada para medir los cambios de nivel durante las tormentas y así medir el volumen de escurrimiento de las superficies experimentales, Figura 12.



Figura 12. Tinacos de almacenamiento y medición del escurrimiento

En la Tabla 3 se presenta la descripción de los materiales y cantidades de los mismos utilizados para el acondicionamiento estructural de los tratamientos.

Tabla 3. Materiales para el acondicionamiento estructural

<i>CONCEPTO</i>	<i>CANTIDAD</i>	<i>UNIDAD</i>
Cartuchos silicón negro	2	Pza.
Membrana de polietileno	102	m ²
Impermeabilizante “Top s”	3	Pza.
Tela mosquitero 1.05 m	2	m ²
Adhesivo gris “Perdura”	28	Saco
Codos PVC drenaje 3”	12	Pza.
Mortero pobre	1	m ³
Loseta de tráfico normal	65	m ²
Cemento blanco o lechada	25	kg

3.4. Implementación de los Sistemas Impermeables

3.4.1. Impermeabilizante Asfáltico

Antes de colocar la emulsión asfáltica impermeabilizante de alta calidad, posicionada en el A₂ se debe colocar una nueva capa de acriltecho para garantizar la protección de la losa de cualquier humedad a causa de la azotea verde. Finalmente se puede instalar el impermeabilizante asfáltico esparciendo una capa delgada del mismo en forma uniforme. Ver Figura 13.



Figura 13. Instalación del impermeabilizante asfáltico

3.4.2. Loseta

Para este sistema impermeable destinado a la superficie A₄, se requiere seleccionar y acomodar la pedacería de loseta de 5 mm de espesor lo más uniforme posible evitando dejar espacios grandes entre las uniones. Ésta pedacería debe ser adherida a la losa con cemento tradicional y resanada en las juntas con cemento blanco para impedir la infiltración, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Instalación de la loseta

3.4.3. Membrana

El sistema impermeable a base de poliuretano de alta densidad, que se instaló en la superficie A₅, debe ser anclado al pretil a través de una solera de aluminio de 1 ½ pulgada y una pistola de impacto para clavos de concreto de 1 ½ pulgada. Al terminar se le deben recortar los bordes que sobre salen del pretil.

Si la geomembrana no cubre las dimensiones deseadas se le puede añadir más material a través de una termofusión. Es muy importante que esta capa sea manejada cuidadosamente ya que cualquier perforación permitiría el paso de la humedad a la losa. Ver Figura 15.



Figura 15. Instalación de la membrana

3.4.4. Control contiguo y control externo

A las áreas 3 y 7 únicamente se les reemplazó el acriltecho existente por una nueva capa del mismo material. Esto con la finalidad de asegurar que el deterioro de éste no permitirá la infiltración y trastornaría las mediciones. Ver Figura 16.



Figura 16. Instalación de la superficie del control contiguo

3.5. Instrumentación

3.5.1. Instrumentación para la evaluación del confort térmico

En la instrumentación para la evaluación del confort térmico se utilizaron sensores de temperatura marca Watchdog de la compañía Spectrum. Estos sensores se colocaron a 1.50 m de altura dentro de cada lugar a monitorear en un sitio representativo de las mediciones promedio. Ver Figura 17.



Figura 17. Sensores Watchdog dentro de los salones monitoreados

Para apreciar la respuesta térmica y definir los niveles de confort térmico de los espacios con techos verdes se analizaron los datos registrados por los sensores de temperatura situados al interior de los salones de los tratamientos con impermeabilizante y loseta. También se monitorearon el salón definido como control contiguo y una oficina llamada control externo. Los datos fueron registrados desde la segunda quincena de abril de 2009 hasta la primera quincena de abril 2010 a cada 10 min. Para visualizar el funcionamiento térmico en la edificación, se graficaron las series de tiempo de los datos registrados. Las gráficas se elaboraron de forma anual, estacional y mensual.

3.5.2. Instrumentación para la evaluación del comportamiento hidrológico

La precipitación es el primer parámetro que se requiere para conocer cómo es el comportamiento hidrológico de los techos verdes bajo condiciones naturales. Ésta se midió con un pluviómetro marca WatchDog modelo 120, Figura 18, con registros a cada 5 min para cada una de las tormentas que se presentaron en el periodo de medición (abril de 2009 - abril de 2010).



Figura 18. Pluviómetro WatchDog modelo 120

A partir de los registros de precipitación, se hicieron los cálculos necesarios para conocer algunos de los datos más importantes a usar en este estudio como: la lámina total de lluvia, el tiempo total de duración del evento y la intensidad máxima en treinta minutos. Conociendo las características de la precipitación y la geometría de los techos verdes se procedió a medir el volumen de escurrimiento de estos y de techo control.

Se hicieron dos tipos de mediciones. La primera, fue conocer al final de cada evento el volumen de escurrimiento de cada techo verdes y la superficie control. La segunda medir en el transcurso del evento como se modificaba el nivel de escurrimiento a través del tiempo con intervalos de 5 minutos. Ver Figura 19.



Figura 19. Mediciones del agua escurrida

Dado que la losa de la edificación es a dos aguas con las mismas dimensiones, el cálculo del escurrimiento se hizo sólo en la mitad de la superficie. El escurrimiento de cada tratamiento fue encausado a los tinacos de almacenamiento a los cuales fueron instaladas mangueras graduadas con las que se pudo medir el nivel de escurrimiento. Con estas mediciones fueron determinados los hidrogramas de escurrimiento para eventos específicos.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados Térmicos

A continuación se presenta el análisis estadístico térmico de los datos registrados de abril 2009 a abril 2010 para los tratamientos experimentales. Estos se analizan de manera anual, estacional y mensual.

4.1.1. Estadísticas anuales del comportamiento y confort térmico

La Tabla 4 resume los promedios anuales de los tratamientos experimentales. Contiene los valores medios máximos, mínimos y promedios de los meses monitoreados.

Tabla 4. Estadístico anual de temperaturas medias máximas, mínimas y promedio

MES	MÁXIMOS (°C)					MÍNIMOS (°C)					MEDIOS (°C)				
	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA
ABRIL 2009	27	26	30	33	24	21	22	23	27	16	24	24	26	30	22
MAYO 2009	27	27	29	35	26	22	22	22	27	17	25	25	26	30	22
JUNIO 2009	28	28	29	32	27	23	23	22	26	18	25	25	26	29	22
JULIO 2009	27	26	28	29	24	23	23	24	25	20	25	24	26	27	22
AGOSTO 2009	25	25	27	29	25	22	22	23	26	19	24	24	25	27	22
SEPTIEMBRE 2009	24	24	24	28	22	21	22	22	24	18	23	23	23	26	20
OCTUBRE 2009	27	27	27	29	24	20	20	20	24	15	23	23	23	27	19
NOVIEMBRE 2009	21	21	21	23	18	18	17	17	19	13	19	19	20	21	16
DICIEMBRE 2009	21	21	22	S/D	22	17	16	17	S/D	13	18	18	19	S/D	16
ENERO 2010	20	20	20	S/D	17	12	12	12	S/D	6	16	16	16	S/D	13
FEBRERO 2010	20	19	25	20	17	15	14	15	14	10	17	17	19	17	14
MARZO 2010	23	24	24	27	21	20	19	19	22	15	22	22	22	25	17
ABRIL 2010	25	26	26	29	22	23	23	24	26	18	24	24	25	27	20
MÁXIMO	28	28	30	35	27	23	23	24	27	20	25	25	26	30	22
MÍNIMO	20	19	20	20	17	12	12	12	14	6	16	16	16	17	13
PROMEDIO	24	24	25	27	22	19	19	20	23	15	21	21	22	25	18

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo,
CE= control externo, TA= temperatura ambiente, S/D= sin dato

Para analizar el confort térmico se incluyen los gráficos de las temperaturas medias máximas, mínimas y promedio una franja que va de los 18°C a los 26°C que son las temperaturas de confort obtenidas de la literatura. A esta franja se le designará como la zona de confort térmico.

4.1.1.1. Temperaturas máximas

El valor máximo promedio anual de los datos monitoreados se presenta en la Tabla 4. Haciendo un comparativo entre las temperaturas internas del control externo y las aulas con techo verde, se puede destacar que gracias a los efectos de los techos verdes existe una reducción de 7°C en la temperatura media máxima interna. El tratamiento control contiguo adquiere los efectos de las eco-estructuras y reduce la temperatura en 5°C con respecto al control externo. Así la temperatura promedio máxima de los techos verdes va de 4 a 7°C en primavera, de 2 a 4°C en verano, de 2°C en otoño y de 0 a 4°C en invierno.

Los techos verdes alcanzan a reducir la temperatura ambiente hasta los 28°C que es sólo un grado por encima de ésta. Si el límite superior de la temperatura de confort es de 26°C se puede observar que la temperatura media máxima anual de los techos verdes se acerca a este límite sólo 2°C por encima de él, lo que provoca un acercamiento importante a garantizar la comodidad de trabajo dentro de las aulas con azotea verde cuando las temperaturas son máximas.

El Gráfico 1 explica mejor el comportamiento de las temperaturas medias máximas anuales para cada mes. También permite visualizar como se posicionan éstas con respecto a los límites de confort térmico.

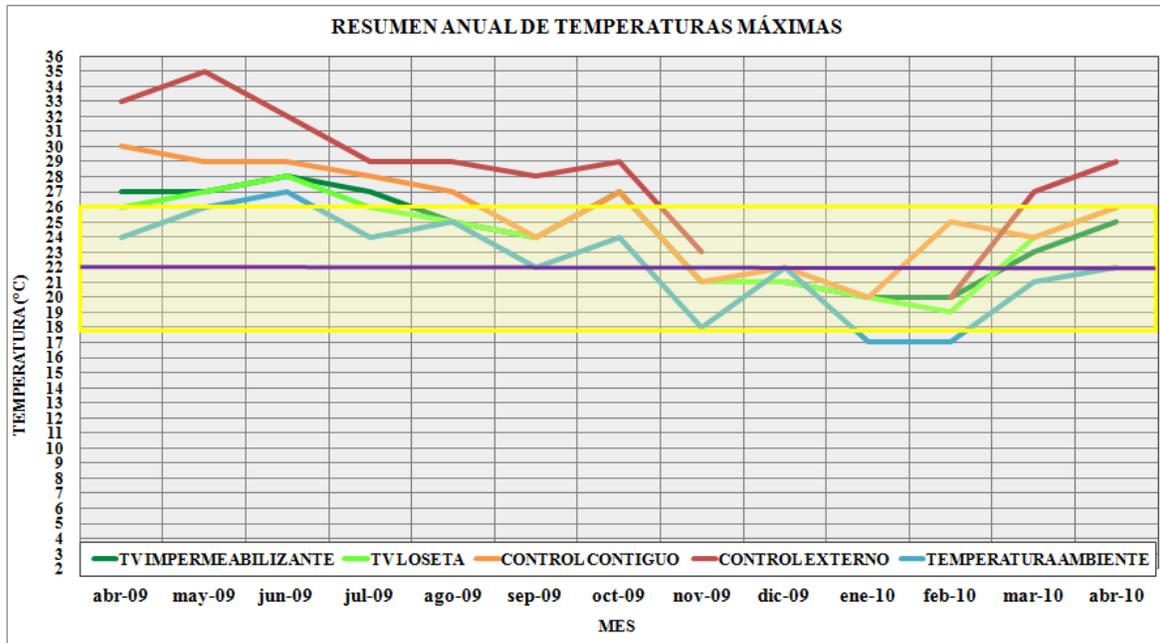


Gráfico 1. Resumen anual de temperatura interna máxima media y de confort térmico

En este gráfico las líneas que representan los techos verdes con impermeabilizante y loseta respectivamente, permanecen dentro de los límites de confort térmico en hasta 9 meses del periodo experimental. De abril 2009 a julio del mismo año los valores oscilan en 2°C alrededor del límite superior de confort térmico. Los techos verdes mejoran las condiciones de temperatura interna reduciendo las temperaturas medias máximas en un rango de 2 a 7°C con respecto al control externo.

4.1.1.2. Temperaturas mínimas

En la Tabla 4 se presenta el valor medio mínimo anual de los datos monitoreados. Haciendo un comparativo entre las temperaturas internas del control externo y las aulas con techo verde, se puede destacar que debido a los efectos de los techos verdes cuando las temperaturas mínimas son máximas existe una reducción de 2°C. El tratamiento control contiguo recibe los efectos de las eco-estructuras y equilibra su temperatura media mínima en 12°C con la de las eco-estructuras. La temperatura de los techos verdes logra aumentar la temperatura ambiente media mínima en 6°C al interior de las edificaciones. Las azoteas verdes permiten conservar el calor interior de manera muy significativa. En general la

reducción de temperatura media mínima de los techos verdes con respecto al control externo va de 3 a 6°C en primavera, de 2 a 4°C en verano, de 1 a 4°C en otoño y de 0 a 3°C en invierno.

Al ser el límite inferior de la temperatura de confort 18°C se puede decir que la temperatura media mínima anual de los techos verdes se separa por debajo de éste en 6°C al igual que el control contiguo. Es de notarse que la temperatura media mínima del control externo tiende más al confort que las azoteas verdes pero sólo por 2°C. Este efecto de enfriamiento de las eco-estructuras no es el deseado sin embargo en 10 de los periodos experimentales las temperaturas internas medias mínimas de estos se encuentran dentro del rango de confort cosa que sucede sólo en 8 meses del control externo. Se puede garantizar la comodidad de trabajo dentro de las aulas con azotea verde cuando las temperaturas son mínimas mediante techos verdes en un 20% más que al no contar con ellos. A continuación el Gráfico 2 explica mejor el comportamiento de las temperaturas medias mínimas anuales para cada mes y como se posicionan éstas con respecto a los límites de confort térmico.

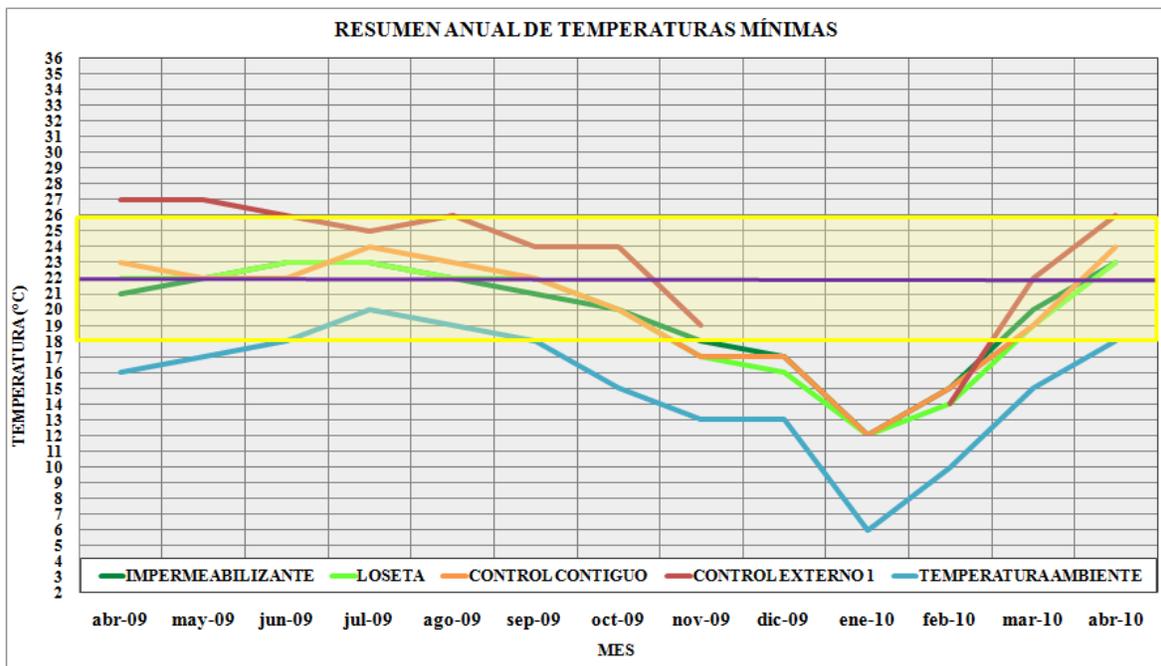


Gráfico 2. Resumen anual de temperatura interna mínima media y de confort térmico

Las líneas de los techos verdes permanecen dentro de los límites de confort térmico menos en el periodo noviembre-febrero. A pesar de que la reducción de temperatura generada por los techos verdes no es la deseada, cuando las temperaturas son mínimas, estos lo hacen por un periodo corto que es menos significativo que los beneficios de reducción de temperatura con las temperaturas son máximos. El caso a destacar es el del control contiguo. Éste asume los efectos de los techos verdes, sin embargo, este tratamiento tiende a promediar las influencias de las eco-estructuras con el control externo dando una temperatura interna mínima más tendiente hacia el confort.

4.1.1.3. Temperaturas medias

El valor medio anual de los datos monitoreados se ve en la Tabla 4. Haciendo un comparativo entre las temperaturas internas del control externo y las aulas con techo verde, se puede destacar que gracias a los efectos de los techos verdes existe una reducción de 4°C en la temperatura media máxima interna. El tratamiento control contiguo adquiere los beneficios de las eco-estructuras y reduce la temperatura en 4°C con respecto al control externo. La temperatura de los techos verdes aumenta la temperatura ambiente en 3°C mientras que el control contiguo lo hace en 4°C. En general la reducción de temperatura media de los techos verdes con respecto al control externo va de 4 a 6°C en primavera, de 2 a 3°C en verano, de 2 a 4°C en otoño y de 0 a 3°C en invierno.

Si el límite superior de la temperatura de confort es de 26°C y el inferior de 18°C la temperatura media anual de los techos verdes y el control contiguo permanece dentro de estos límites durante todo el periodo experimental, sólo enero y febrero están por debajo en un rango de 1 a 2°C. En cuanto al control externo en los meses más cálidos supera el límite superior de confort hasta en 4°C para 6 de los lapsos de medición. En el Gráfico 3 se explica mejor el comportamiento de las temperaturas medias anuales para cada mes y permite visualizar como se posicionan éstas con respecto a los límites de confort térmico.

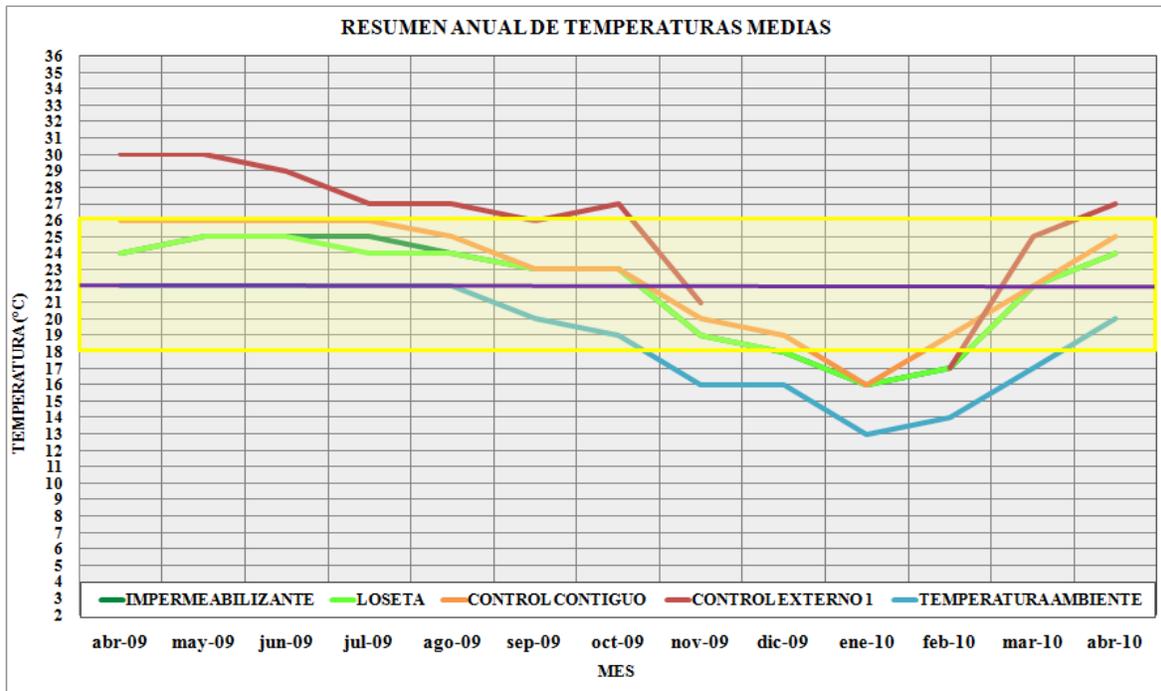


Gráfico 3. Resumen anual de temperatura interna promedio y de confort térmico

En este gráfico los techos verdes y el control contiguo permanecen dentro de los límites de confort térmico. Sólo para enero y febrero se posicionan un poco por debajo del límite inferior sin ser decrementos muy significativos.

4.1.2. Estadístico estacional del comportamiento y confort térmico

De acuerdo al estadístico estacional de temperaturas promedio con respecto al control externo en primavera los techos verdes reducen la temperatura en 7°C y 2°C con respecto al control contiguo y aumentan 1°C la temperatura ambiente. En verano reducen la temperatura en hasta 3°C con respecto al control externo y hasta 2°C con respecto al control contiguo y aumentan hasta 2°C la temperatura ambiente. Para otoño las azoteas verdes y el control contiguo reducen la temperatura en 2°C con respecto al control externo y aumentan 3°C la temperatura ambiente. Es importante notar que para otoño los efectos de las eco-estructuras en el control contiguo permiten que éste llegué al equilibrio térmico con éstas. Para invierno las azoteas verdes reducen la temperatura en hasta 4°C con respecto al control externo y pueden alcanzar el equilibrio térmico con el control contiguo. En esta

estación aumentan la temperatura ambiente en hasta 4°C. Para apreciar como los techos verdes mejoran las condiciones de temperatura al interior de las edificaciones disminuyéndola en todos los casos frente al control externo ver la Tabla 5 y el Gráfico 4.

Tabla 5. Estadístico estacional de temperaturas promedio

MES	MÁXIMOS (°C)					MÍNIMOS (°C)					MEDIOS (°C)				
	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA	TV _{Im}	TV _{Lo}	CC	CE	TA
PRIMAVERA	28	28	30	35	27	21	22	22	26	16	25	25	26	30	22
VERANO	27	26	28	29	25	21	22	22	24	18	24	24	25	27	21
OTOÑO	27	27	27	29	24	17	16	17	19	13	20	20	21	24	17
INVIERNO	25	26	26	29	22	12	12	12	14	6	20	22	23	26	19
MÁXIMO	28	28	30	35	27	23	23	24	26	20	25	25	26	30	22
MÍNIMO	20	19	20	20	17	12	12	12	14	6	16	16	16	17	13
PROMEDIO	24	24	25	28	22	19	19	19	22	14	21	21	22	25	18

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo, TA= temperatura ambiente

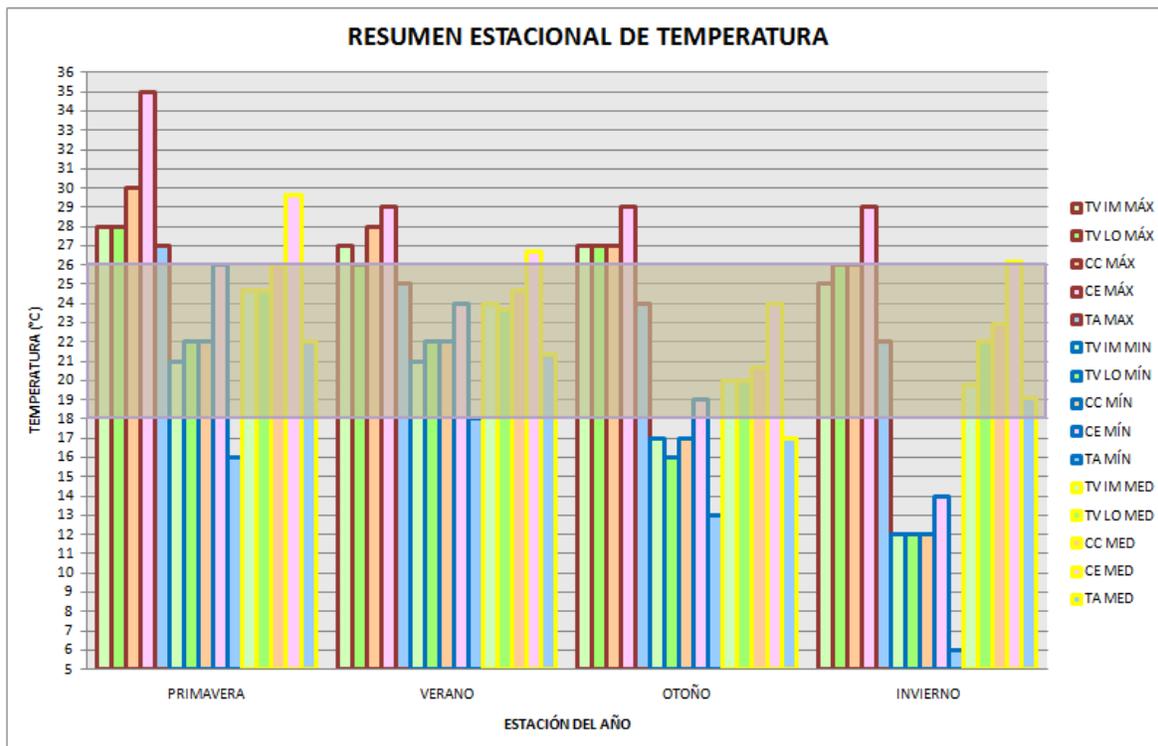


Gráfico 4. Resumen estacional de temperatura interna promedio y confort térmico

4.1.3. Comportamiento térmico promedio diario mensual

El comportamiento térmico promedio diario de los tratamientos se llevó a cabo mensualmente. Para los registros observados se muestran los gradientes de enfriamiento y calentamientos a partir del tiempo de la temperatura máxima a mínima y de la mínima a la máxima respectivamente. Estos valores se comparan con las predicciones polinomiales de 5° y 6° grado, modelos creados con el método de mínimos cuadrados, que son los valores ideales del comportamiento térmico para cada mes registrado. No es la finalidad de este estudio analizar los modelos por lo que no se presentan ni discuten las ecuaciones de las líneas de tendencia que serán sólo un comparativo de los valores observados.

4.1.3.1. Abril 2009

En la Tabla 6 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento de los datos registrados para el mes de abril 2009 que parten de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día.

Tabla 6. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, abril 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO CAL(hr)	TIEMPO ENF(hr)	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)				
TV _{Im}	09:10	22.70	17:30	25.00	8.33	15.67	0.276	0.147
TV _{Lo}	08:30	22.30	17:30	25.10	9.00	15.00	0.311	0.187
CC	09:30	22.50	19:10	29.40	9.67	14.33	0.714	0.481
CE	10:00	24.90	18:30	30.80	8.50	15.50	0.694	0.381

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para abril establece que entre las 9:10 y las 8:30 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 22.70 y 22.30 °C hasta los 25 y 25.10 °C que se presentaron a las 17:30 hrs para ambos tratamientos. El gradiente de calentamiento fue de 0.276 y 0.311 °C por hora respectivamente para cada techo verde. Una vez alcanzada la temperatura máxima y

suponiendo que el comportamiento térmico del día siguiente fuera el mismo, se llegaría de nuevo a la temperatura mínima. Lo anterior generó un gradiente de enfriamiento de 0.147 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.187 para el de loseta.

En cuanto a los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento no difieren mucho de los de los techos verdes sin embargo, estos los superan en gran medida a los de las eco-estructuras. Los techos verdes reducen el gradiente de calentamiento hasta en casi un 60% con respecto al control externo y en hasta el 61% el gradiente de enfriamiento mientras que el control contiguo los aumenta en un 3% y 26.5% respectivamente. A continuación se presentan las series de datos observados frente a los modelos que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

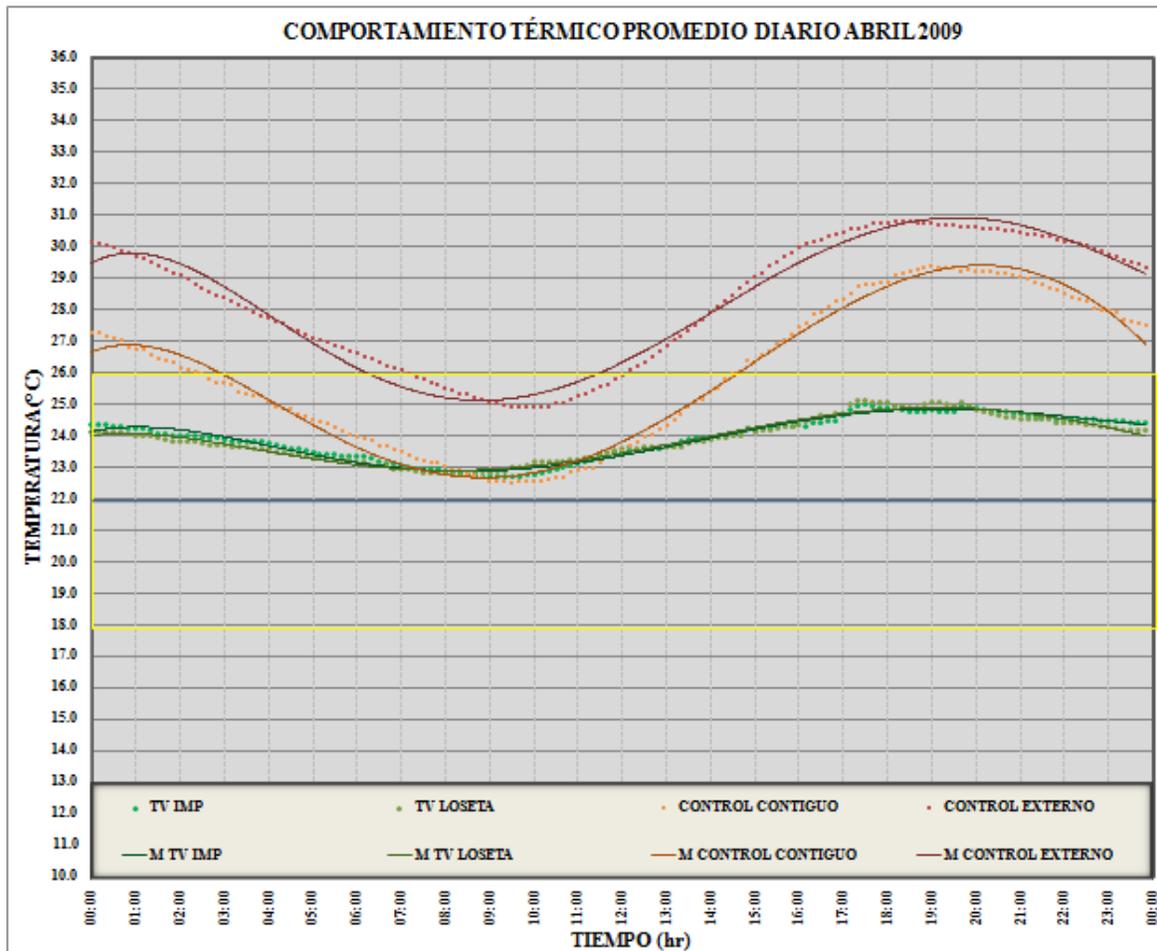


Gráfico 5. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, abril 2009

En el Gráfico 5 se observa claramente como las oscilaciones térmicas de los techos verdes son mucho menores en comparación con las de los controles. Los valores medidos y predichos permanecen dentro de la franja de confort térmico y se acercan al valor medio de esta franja en tan sólo un grado por encima de ésta. Cuando los valores son mínimos los techos verdes reducen la temperatura del control externo en 3°C y cuando son máximos estos lo hacen en hasta 6°C. El control contiguo al adoptar los efectos de los techos verdes tiende a reducir la temperatura con respecto al control contiguo como sería de esperarse.

Algo destacable es que este control contiguo continúa la reducción de temperatura más allá de los valores mínimos de las azoteas verdes, por lo que se puede suponer que potencializa los efectos de los techos verdes cuando las temperaturas son mínimas. Este tipo de efectos de los techos verdes sobre superficies cercanas sin eco-estructuras no se profundizan en el análisis pero queda como una observación que podría ser analizada a profundidad en futuras investigaciones.

4.1.3.2. Mayo 2009

El mes de mayo 2009 tuvo la temperatura máxima del registro del estudio. En la Tabla 7 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día del mes.

Tabla 7. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, mayo 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO CAL(hr)	TIEMPO ENF(hr)	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)				
TV _{Im}	08:40	23.70	17:30	26.50	8.83	15.17	0.317	0.185
TV _{Lo}	08:50	23.60	17:30	25.90	8.67	15.33	0.265	0.150
CC	09:10	22.90	17:30	29.00	8.33	15.67	0.732	0.389
CE	08:20	16.60	18:40	34.50	10.33	13.67	1.732	1.310

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

Para mayo entre las 8:40 y las 8:50 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas fueron

aumentando de 23.70 y 23.60 °C hasta los 26.50 y 25.90 °C que se dieron a las 17:30 hrs para ambos tratamientos. El gradiente de calentamiento fue de 0.317 y 0.265 °C por hora para cada techo verde respectivamente. Alcanzada la temperatura máxima y suponiendo que el comportamiento térmico del día siguiente fuera el mismo se generó un gradiente de enfriamiento de 0.185 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.150 para el de loseta. En cuanto al control contiguo el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento no difieren mucho de los de los techos verdes pero para el control contiguo el tiempo de calentamiento es mayor y el de enfriamiento consecuentemente es menor. Para mayo 2009 los techos verdes reducen el gradiente de calentamiento hasta en 85% con respecto al control externo y en hasta el 88.5% el gradiente de enfriamiento mientras que el control contiguo lo hace en un 58% y 70% respectivamente.

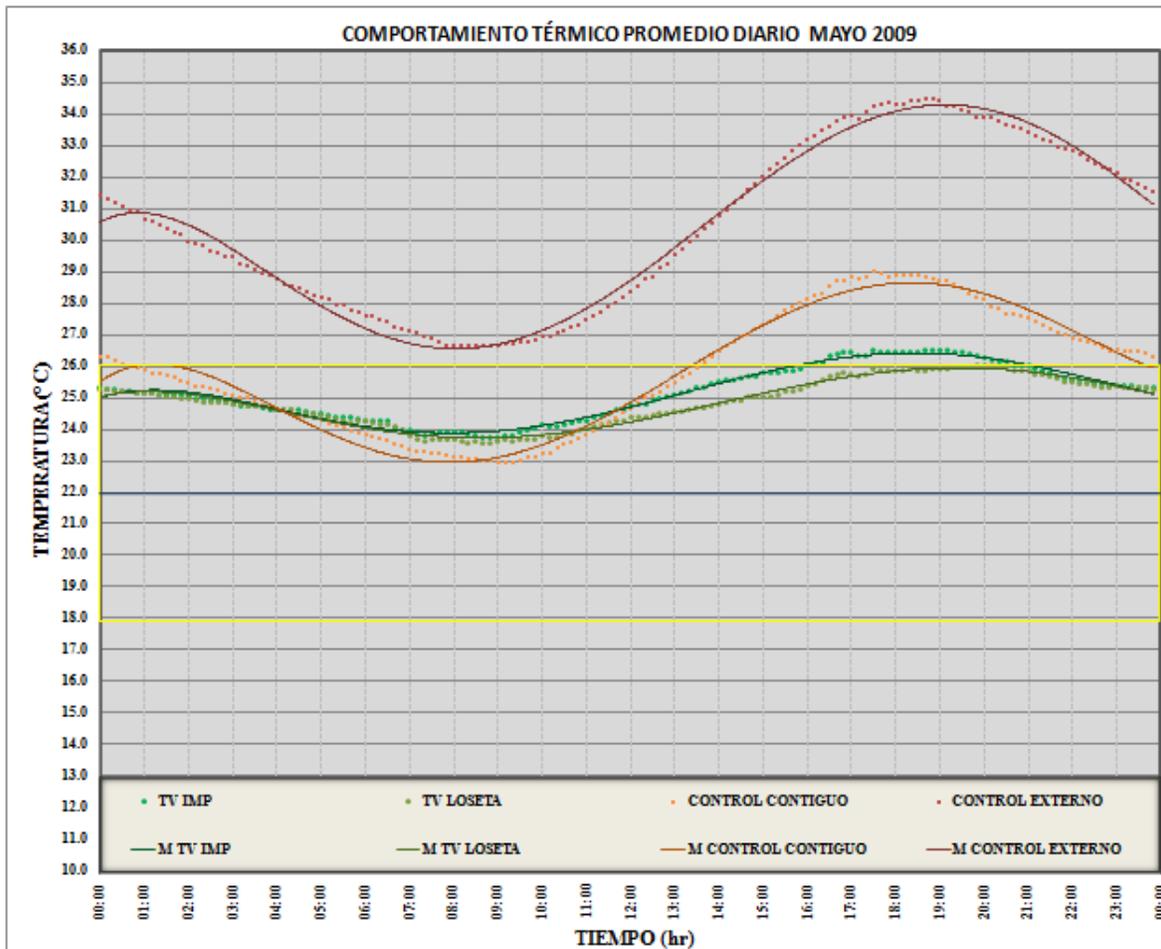


Gráfico 6. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, mayo 2009

En el Gráfico 6 se observa como las oscilaciones térmicas de los techos verdes son mucho menores comparadas con las de los controles. Los valores medidos y predichos permanecen dentro de la franja de confort térmico. Sólo cuando la temperatura es máxima el techo verde con impermeabilizante supera los 26°C en media unidad. Cuando los valores son mínimos los techos verdes reducen la temperatura del control externo en 2.5°C y cuando son máximos lo hacen en hasta 8.5°C. Nuevamente el control contiguo tiende a reducir la temperatura con respecto al control contiguo y la reduce más allá de los valores mínimos de las azoteas verdes en 1°C.

4.1.3.3. Junio 2009

En la Tabla 8 están los gradientes de calentamiento y enfriamiento de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales del día para junio 2009.

Tabla 8. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, junio 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO CAL(hr)	TIEMPO ENF(hr)	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)				
TV _{Im}	07:10	23.60	19:30	26.80	12.33	11.67	0.259	0.274
TV _{Lo}	08:20	23.70	19:10	26.50	10.83	13.17	0.258	0.213
CC	08:40	23.30	19:20	28.10	10.67	13.33	0.450	0.360
CE	08:20	26.00	19:00	31.80	10.67	13.33	0.544	0.435

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para junio muestra que entre las 7:10 y las 8:20 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 23.60 y 23.70 °C hasta los 26.80 y 26.50 °C que se dieron a las 19:30 y 19:10 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento fue prácticamente el mismo en los techos verdes de 0.259 y 0.258°C por hora. Suponiendo que el comportamiento térmico del día siguiente fuera el mismo se calculó un gradiente de enfriamiento de 0.274 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.213 para el de loseta.

En cuanto a los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron muy similares al de la azotea con loseta. El techo con impermeabilizante tardo más en calentarse y menos al enfriarse que los otros techos pero no difirió en mucho con los gradientes del techo con impermeabilizantes. Para este mes más templado los gradientes de enfriamiento y calentamiento de los controles no superaron a los de las azoteas verdes tan drásticamente como en los meses anteriores. Los techos verdes reducen el gradiente de calentamiento hasta un 52.5% con respecto al control externo y en hasta el 51% el gradiente de enfriamiento mientras que el control contiguo lo hace en un 17% para ambos casos. A continuación se presentan las series de datos observados frente a los modelados.

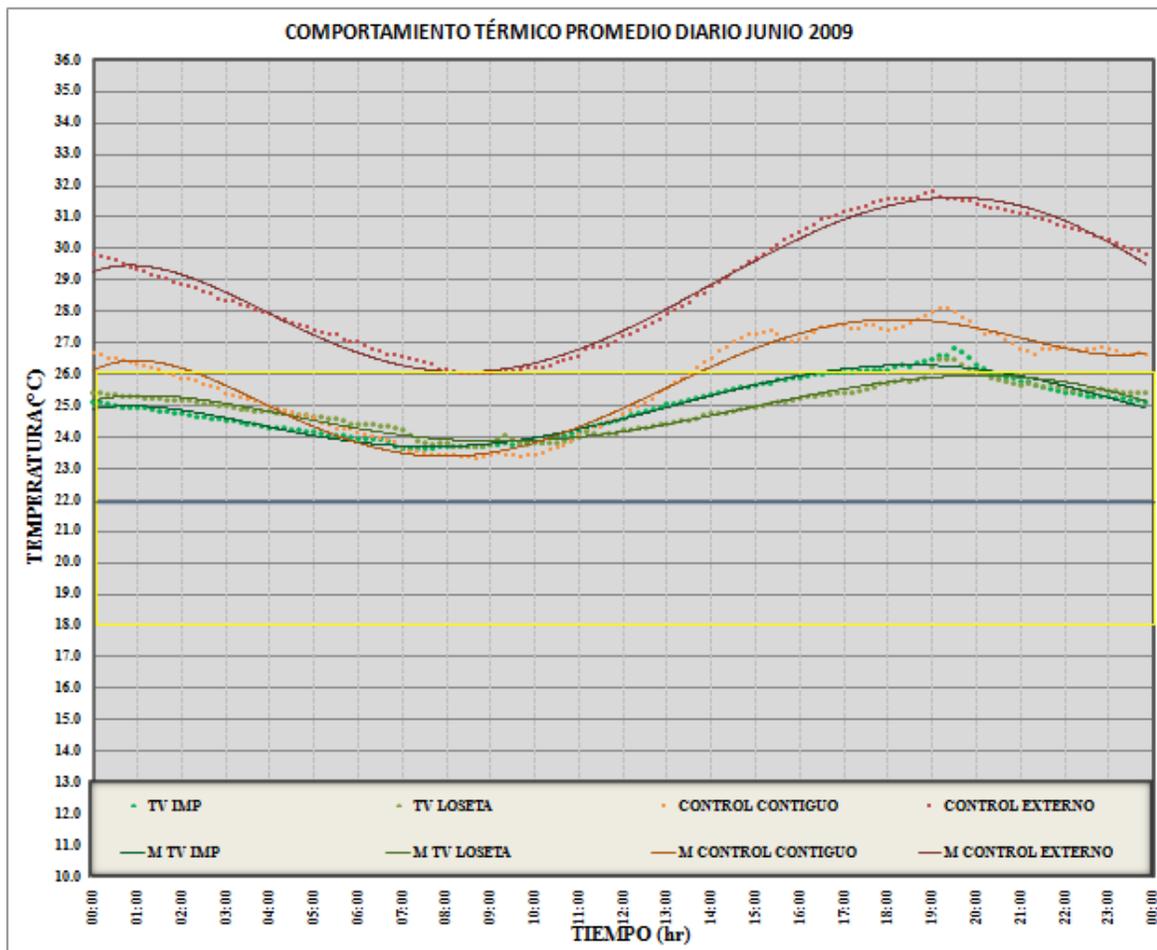


Gráfico 7. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, junio 2009

En el Gráfico 7 nuevamente se observa como las oscilaciones térmicas de los techos verdes son menores en comparación con las de los controles. En algunas zonas los valores observados sobresalen notoriamente de los modelados esto puede deberse a la ocupación de las aulas pero este análisis también estará fuera del alcance de este estudio. En general los valores medidos y predichos permanecen dentro de la franja de confort térmico, sólo cuando la temperatura es máxima las azoteas verdes superan mínimamente esta zona. Cuando los valores son mínimos los techos verdes reducen la temperatura del control externo en poco más de 2°C y cuando son máximos éstos lo hacen en aproximadamente 5°C. El control contiguo vuelve a generar una reducción de temperatura más allá de los valores mínimos de las azoteas verdes.

4.1.3.4. Julio 2009

En la Tabla 9 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de julio 2009. Estos representan los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día.

Tabla 9. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, julio 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)		
TV _{Im}	08:30	22.80	18:30	27.00	10.00	14.00	0.420	0.300
TV _{Lo}	08:20	23.30	19:20	25.50	11.00	13.00	0.200	0.169
CC	09:20	22.70	18:20	28.80	9.00	15.00	0.678	0.407
CE	09:00	24.60	18:10	29.10	9.17	14.83	0.491	0.303

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

En julio entre las 8:30 y las 8:20 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 22.80 y 23.30 °C hasta los 27 y 25.50 °C que se dieron a las 18:30 y 19:20 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de

0.420 y 0.200°C por hora. El gradiente de enfriamiento fue de 0.300 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.169 para el de loseta.

Para los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron prácticamente el mismo. En los techos verdes la diferencia fue de una hora entre sí. El techo con impermeabilizante tardó una hora menos en calentarse y una más al enfriarse que la otra azotea verde. Los gradientes de temperatura entre las eco-estructuras varió en aproximadamente 50%. A partir del control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 14.5% y el de loseta en 60% y gradiente de enfriamiento se reduce en 1 y 44% respectivamente. Para el control contiguo el gradiente de calentamiento supera al del control externo en un 38%. Ver el Gráfico 8.

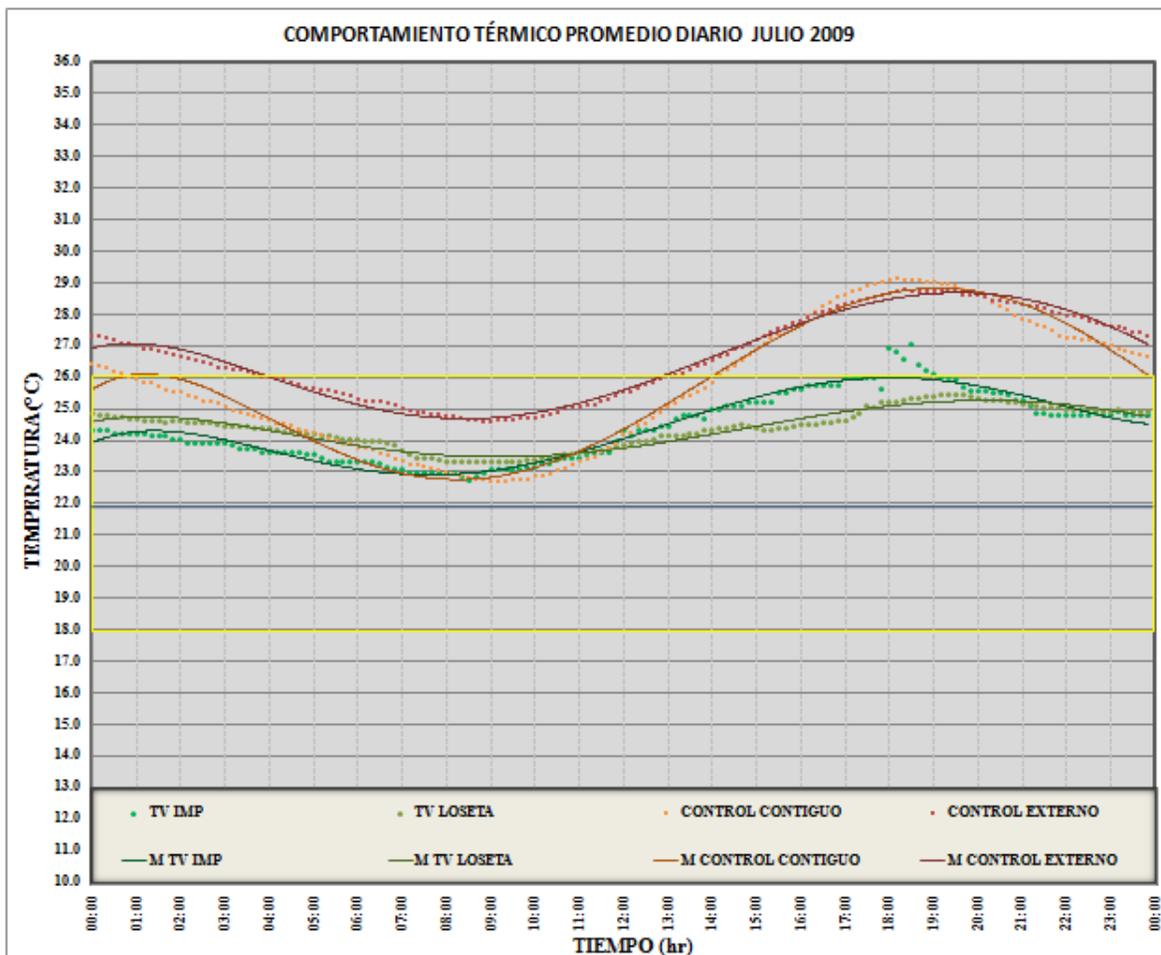


Gráfico 8. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, julio 2009

En el Gráfico una vez más, se ve como las oscilaciones térmicas de los techos verdes son menores a las de los controles. Alrededor de las 18:00 hrs los valores observados sobresalen notoriamente de los modelados para el techo verde con impermeabilizante que podría ser debido a la ocupación de las aulas. Para este mes los modelos de los techos verdes permanecen dentro de la franja de confort térmico, sólo a las 18:00 hrs se presenta una alza de temperatura por lo antes mencionado. Cuando los valores son mínimos el control contiguo reduce la temperatura un poco más que los eco-techos. Los techos verdes reducen la temperatura cuando es mínima de 1 a 1.5°C con respecto al control externo y cuando es máximas en poco menos de 3°C.

4.1.3.5. Agosto 2009

En la Tabla 10 se encuentran los gradientes de calentamiento y enfriamiento a para el mes de agosto 2009. Estos representan los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día.

Tabla 10. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, agosto 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)		
TV _{Im}	08:40	22.40	18:20	25.60	9.67	14.33	0.331	0.223
TV _{Lo}	09:00	22.90	18:50	25.70	9.83	14.17	0.285	0.198
CC	08:40	22.00	18:10	28.70	9.50	14.50	0.705	0.462
CE	08:40	24.20	18:10	31.00	9.50	14.50	0.716	0.469

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para agosto establece que entre las 8:40 y las 9:00 hrs se presentó la temperatura mínima para los eco-techos con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 22.40 y 22.90 °C hasta los 25.60 y 25.70 °C que se dieron a las 18:20 y 18:50 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.331 y 0.285°C por hora. Una vez alcanzada la temperatura máxima y suponiendo que el comportamiento térmico del día siguiente fuera el mismo, se llegaría de nuevo a la temperatura mínima. Lo

anterior generó un gradiente de enfriamiento de 0.223 para la azotea verde con impermeabilizante y de 0.198 para la de loseta.

En cuanto a los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron el mismo. En los techos verdes la diferencia entre sí de los tiempos fue mínima. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 54% y el de loseta en 60%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 52 y 58% con respecto al control externo. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento y de enfriamiento sólo se reducen en un 1.5% en comparación con el control externo.

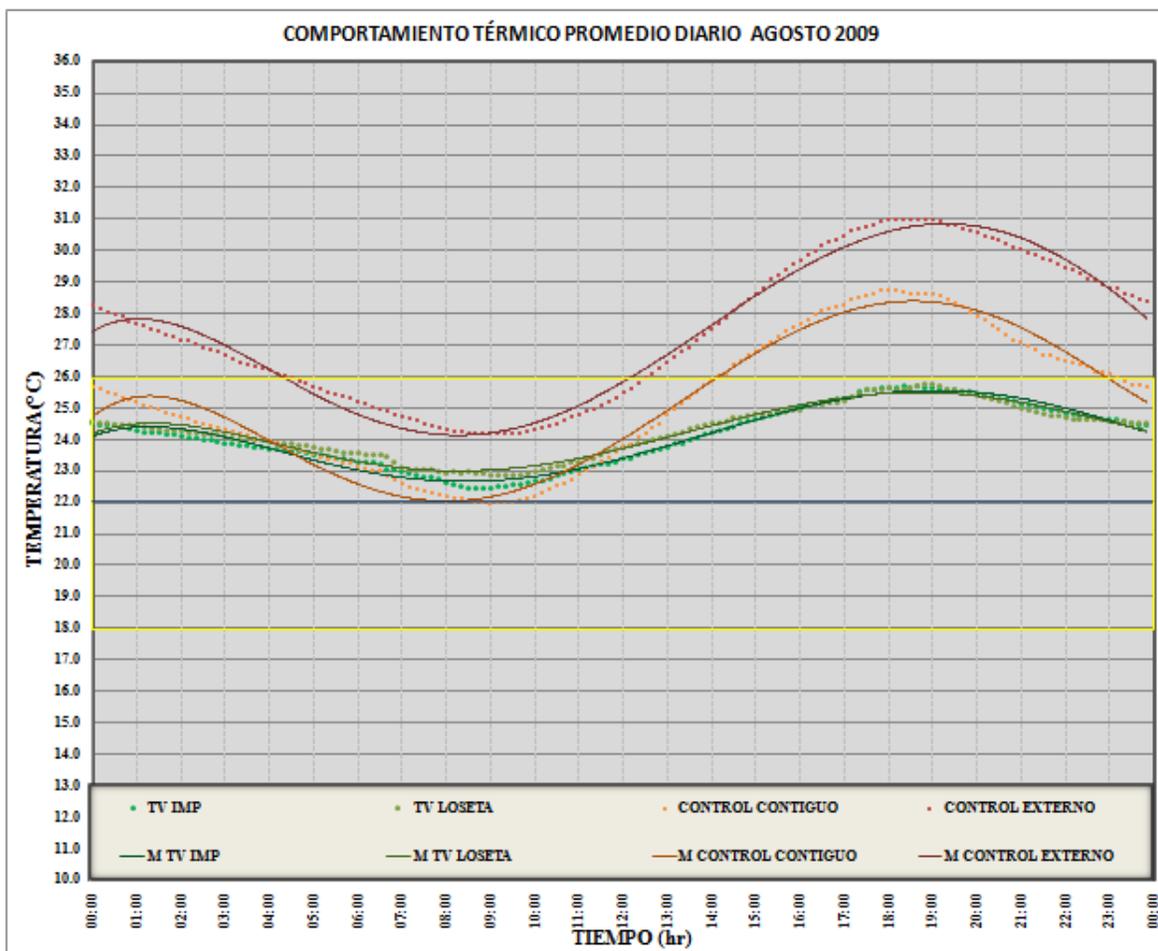


Gráfico 9. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, agosto 2009

En el Gráfico 9 se ve como las oscilaciones térmicas de los techos verdes son menores en comparación con las de los controles. Para este mes los modelos de los techos verdes permanecen dentro de la franja de confort térmico. Cuando los valores son mínimos el control contiguo reduce la temperatura en 1°C más que los eco-techos. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima de 1 a 1.5°C con respecto al control externo y cuando es máxima lo hacen en 5°C aproximadamente.

4.1.3.6. Septiembre 2009

A partir de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día se obtienen los gradientes de calentamiento y enfriamiento para septiembre 2009. Ver la Tabla 11.

Tabla 11. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, septiembre 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO CAL(hr)	TIEMPO ENF(hr)	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)				
TV _{Im}	08:40	21.50	19:50	23.50	10.83	13.17	0.185	0.152
TV _{Lo}	08:20	22.30	18:40	24.20	10.33	13.67	0.184	0.139
CC	08:40	21.20	18:10	26.10	9.50	14.50	0.516	0.338
CE	07:50	23.00	17:00	30.10	9.17	14.83	0.775	0.479

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para septiembre establece que entre las 8:40 y las 8:20 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 21.50 y 22.30 °C hasta los 23.50 y 24.20 °C que se dieron a las 19:50 y 18:40 hrs. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.185°C por hora para ambas eco-estructuras y el gradiente de enfriamiento de 0.152 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.139 para el de loseta.

Para los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron muy similares y para los techos verdes la diferencia entre sí también fue muy similar. Con respecto al control externo ambos techos verdes reducen el gradiente de calentamiento en 76% y el de enfriamiento se reduce en 68 y 71%. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento se reduce en 33% y el de enfriamiento en 29% en comparación con control externo. Ver las series de datos que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

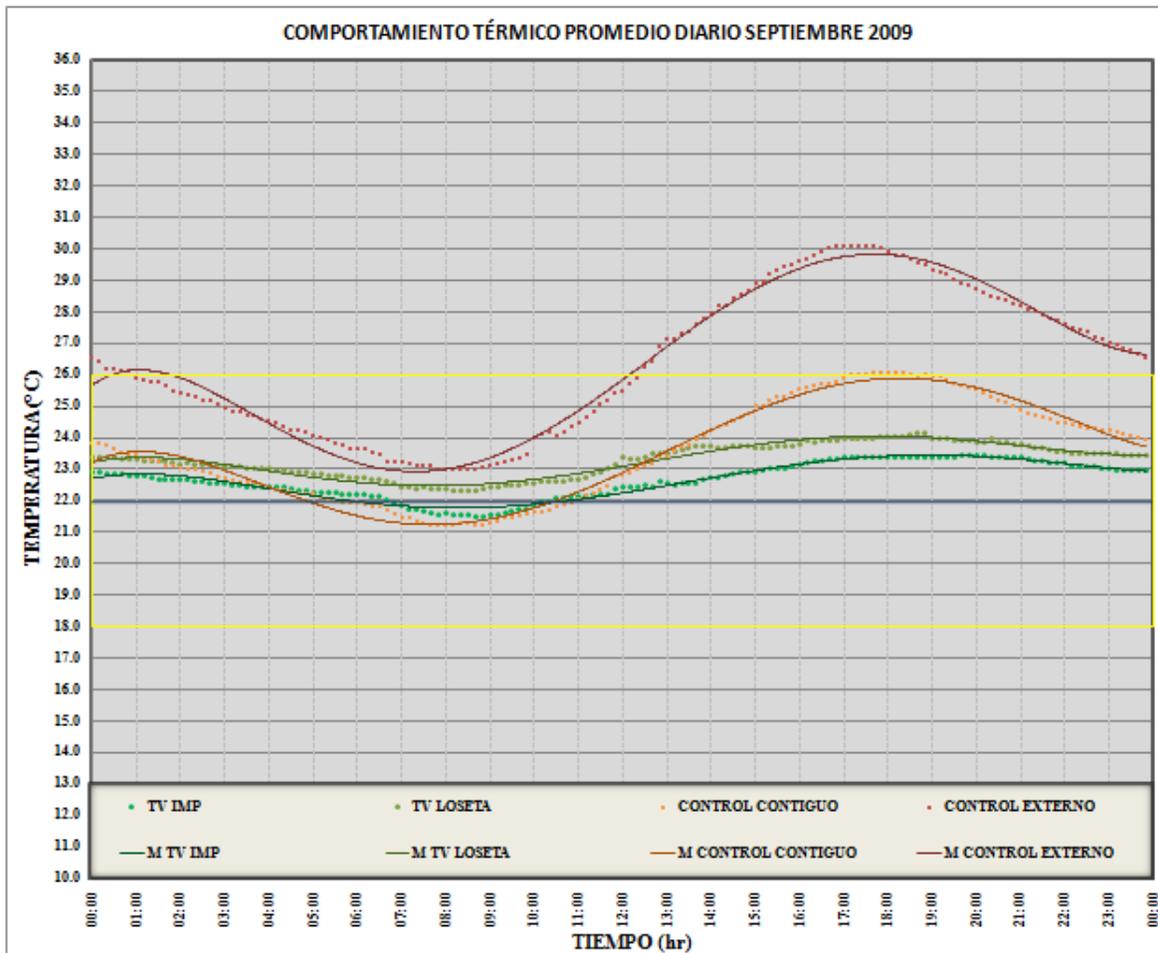


Gráfico 10. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, septiembre 2009

En el Gráfico 10 se ve que las oscilaciones térmicas de los techos verdes son menores en comparación con las de los controles además de que se posicionan muy cerca de la línea central que representa el punto medio de la temperatura de confort. Cuando los

valores son mínimos el control contiguo reduce la temperatura ligeramente más que los eco-techos. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima de 0.5 a 1.5°C con respecto al control externo y cuando los valores son máximos lo hacen en hasta 6°C mientras que el control contiguo lo hace en 4°C.

4.1.3.7. Octubre 2009

En la Tabla 12 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de octubre 2009 a partir de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día.

Tabla 12. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, octubre 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL	GRAD ENF
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)	(°C/hr)	(°C/hr)
TV _{Im}	09:00	21.80	21:00	23.80	10.00	14.00	0.200	0.143
TV _{Lo}	08:30	22.30	18:50	24.00	10.33	13.67	0.165	0.124
CC	08:10	21.00	17:50	25.50	9.67	14.33	0.466	0.314
CE	09:30	23.30	18:10	31.00	8.67	15.33	0.889	0.502

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico para octubre muestra que entre las 9:00 y las 8:30 hrs se presentó la temperatura mínima y fue aumentando de 21.80 y 22.30 °C hasta los 23.80 y 24.00 °C que se dieron a las 21:00 y 18:50 hrs para los techos verdes con impermeabilizante y loseta respectivamente. El gradiente de calentamiento fue de 0.200°C para el impermeabilizante y 0.165°C para el de loseta por hora. Una vez alcanzada la temperatura máxima y suponiendo que el mismo comportamiento térmico a partir de la temperatura mínima generó un gradiente de enfriamiento de 0.143 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.124 para el de loseta.

En cuanto a los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento se desfasaron por sólo una hora. En los techos verdes la diferencia entre sí de los tiempos fue mínima. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el

gradiente de calentamiento en 77.5% y el de loseta en 81.5%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 72 y 75% con respecto al control externo. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento se reduce en 48% y el de enfriamiento en 37.5% en comparación con control externo. Ver las series de datos observados frente a los modelados que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

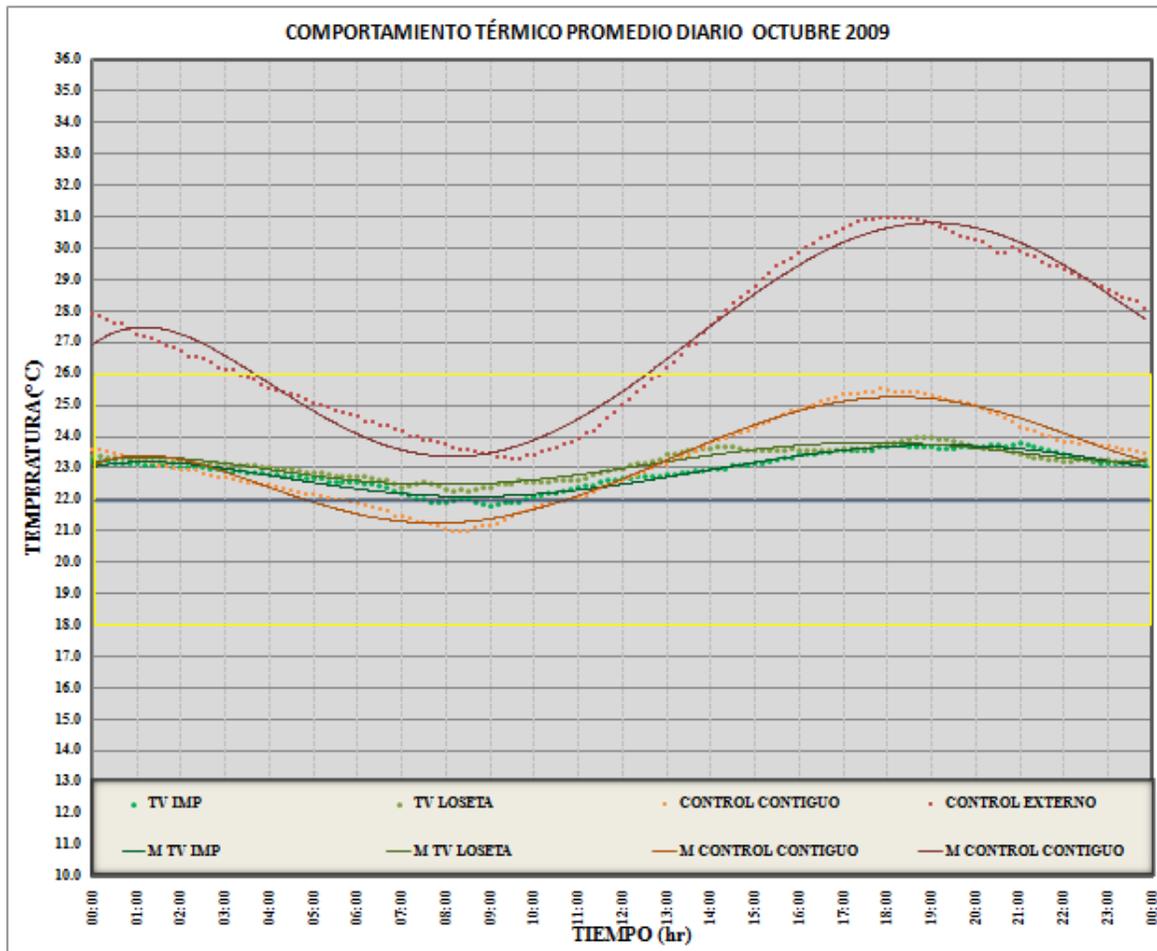


Gráfico 11. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, octubre 2009

En el Gráfico 11 se muestra como las oscilaciones térmicas de los techos verdes se vuelven cada vez más suaves y cercanas a la línea media de confort térmico. Cuando los valores son mínimos el control contiguo reduce la temperatura en casi 1°C más que los eco-techos y permanece todo el tiempo dentro de los límites de confort térmico. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima en casi 1°C con respecto al control

externo y cuando los valores son máximos lo hacen en hasta 7°C mientras que el control contiguo lo hace en casi 4°C.

4.1.3.8. Noviembre 2009

En seguida se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de noviembre 2009. Estos se obtienen de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día.

Tabla 13. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, noviembre 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)		
TV _{Im}	08:10	17.70	18:50	20.20	10.67	13.33	0.234	0.188
TV _{Lo}	07:20	18.40	19:30	20.00	12.17	11.83	0.132	0.135
CC	07:40	16.80	17:20	22.80	9.67	14.33	0.621	0.419
CE	08:20	18.40	19:20	24.70	11.00	13.00	0.573	0.485

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para noviembre establece que entre las 8:10 y las 7:20 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta. Estas temperaturas aumentaron de 17.70 y 18.40°C hasta los 20.20 y 20°C que se dieron a las 18:50 y 19:30 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento por hora de los techos verdes fue de 0.234°C para el impermeabilizante y 0.132°C para el de loseta. El gradiente de enfriamiento fue de 0.188 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.135 para el de loseta.

En los controles el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento se desfazaron aproximadamente una hora y los techos verdes la diferencia entre sí fue de alrededor de 2 hrs. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 59% y el de loseta en 77%. El gradiente de enfriamiento se reduce en 61 y 72% con respecto al control externo. En relación al control

contiguo el gradiente de calentamiento aumenta en 8% y el de enfriamiento reduce en 14% en comparación con control externo.

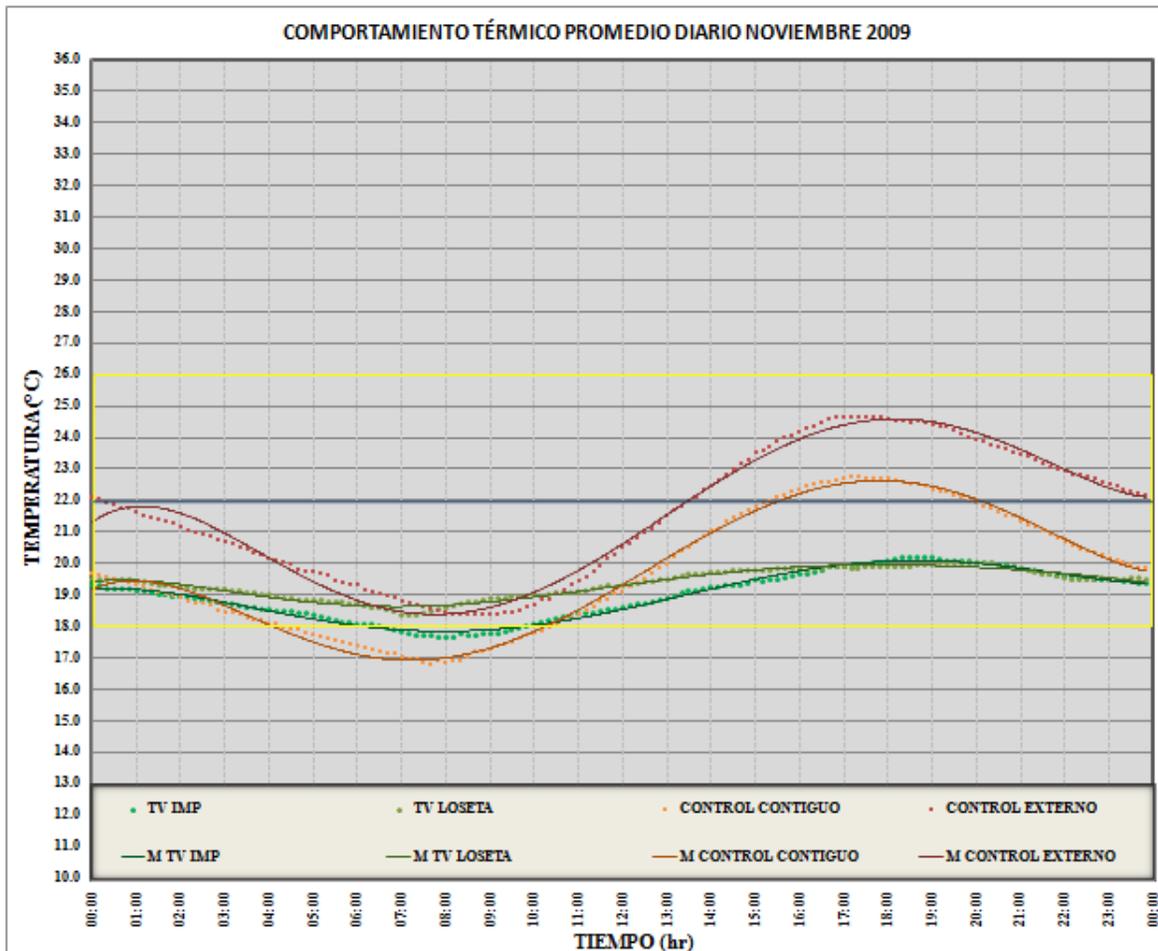


Gráfico 12. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, noviembre 2009

En el Gráfico 12 las oscilaciones térmicas de los techos verdes empiezan a pasar por debajo del límite inferior de la zona de confort térmico. Cuando los valores son mínimos el control contiguo pasa un grado por debajo del límite inferior de la zona de confort y pese a lo anterior, los techos verdes la mayoría del tiempo permanecen dentro. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima en menos de 1°C con respecto al control externo y cuando los valores son máximos en hasta 4°C mientras que el control contiguo lo hace en promedio 2°C.

4.1.3.9. Diciembre 2009

En la Tabla 14 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de diciembre 2009. Estos representan los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día. En este mes por fallas del equipo no se tuvieron registros para el control externo.

Tabla 14. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, diciembre 2009

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL	GRAD ENF
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)	(°C/hr)	(°C/hr)
TV _{Im}	08:20	17.00	17:50	19.00	9.50	14.50	0.211	0.138
TV _{Lo}	07:40	18.00	19:00	19.00	11.33	12.67	0.088	0.079
CC	07:40	16.00	17:30	22.00	9.83	14.17	0.610	0.424

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo

Entre las 8:20 y las 7:40 hrs se presentó la temperatura mínima, estas temperaturas fueron aumentando de 17 y 18°C hasta los 19°C que se dieron a las 17:50 y 19:00 hrs para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.211°C para el impermeabilizante y 0.088°C para el de loseta por hora. El gradiente de enfriamiento fue de 0.138 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.079 para el de loseta.

En cuanto al control contiguo los tiempos de calentamiento y de enfriamiento fueron casi los mismos al de los del techo verde con impermeabilizante. La azotea con loseta tiene un desfase a los otros tratamientos en alrededor de 1.5 hrs. Al no haber registros del control externo el comparativo se hace con el control contiguo y se tiene que el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 65.5% y el de loseta en 85.5%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 67 y 81%. A continuación se presentan las series de datos observados frente a los modelos que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

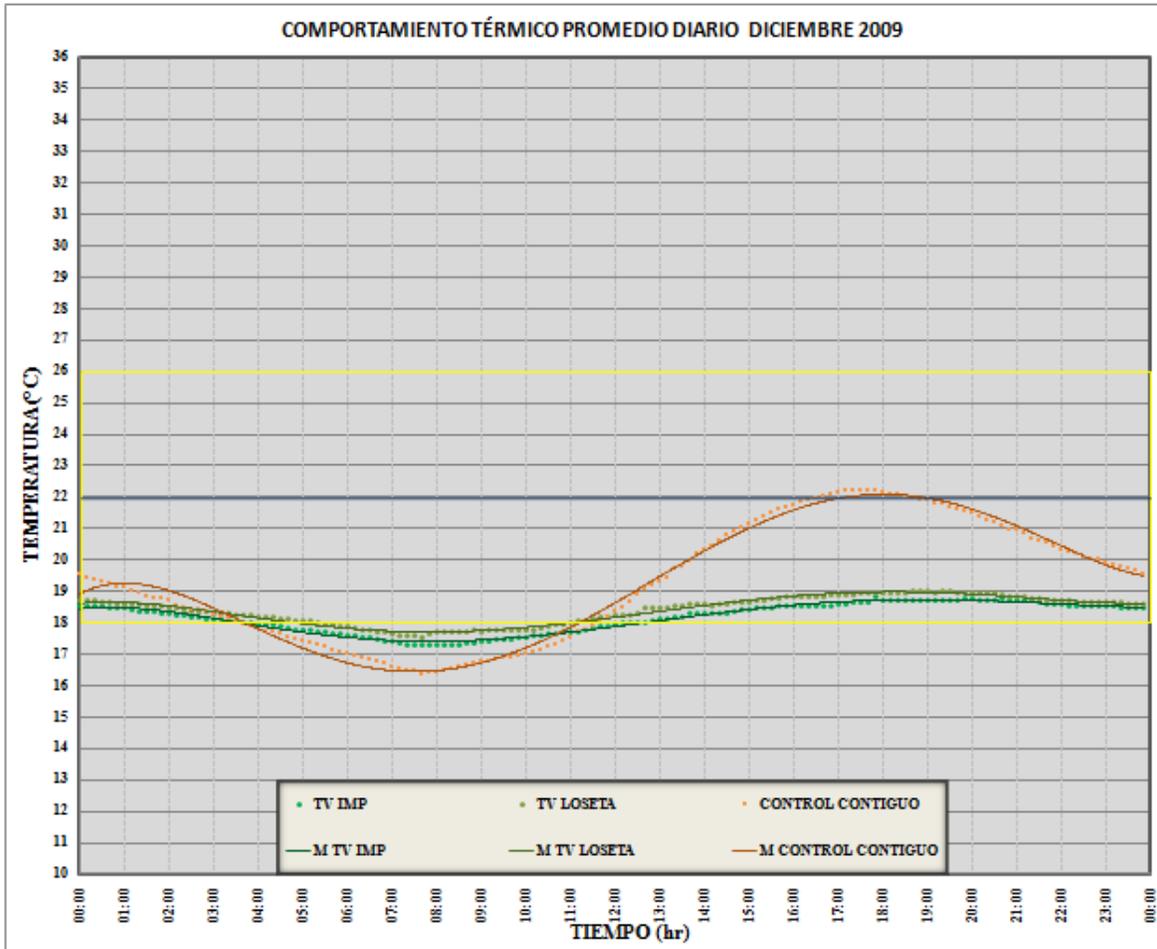


Gráfico 13. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, diciembre 2009

Como se aprecia las oscilaciones térmicas de los techos verdes pasan por debajo del límite inferior de la zona de confort y tienden a una recta. El control contiguo baja 1.5 unidades del límite inferior de la zona de confort y los techos verdes lo hacen en menos de la unidad. Los eco-techos reducen la temperatura máxima del control contiguo en 3°C.

4.1.3.10. Enero 2010

El mes de enero 2010 tuvo la temperatura mínima del registro de este estudio. En la Tabla 15 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de enero 2010. Estos representan los promedios de las temperaturas

mínimas y máximas mensuales a través del día. En este mes de igual forma por fallas del equipo no se tuvieron registros para el control externo.

Tabla 15. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, enero 2010

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL	GRAD ENF
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)	(°C/hr)	(°C/hr)
TV _{Im}	07:10	15.40	18:00	16.90	10.83	13.17	0.138	0.114
TV _{Lo}	07:40	15.20	17:00	16.60	9.33	14.67	0.150	0.095
CC	08:20	14.20	18:00	19.00	9.67	14.33	0.497	0.335

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para enero establece que entre las 7:10 y las 7:40 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 15.40 y 15.20°C hasta los 16.90 y 16.60°C que se dieron a las 18:00 y 17:00 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.138°C para el impermeabilizante y 0.150°C para el de loseta por hora. Una vez alcanzada la temperatura máxima se pudo calcular el gradiente de enfriamiento de 0.114 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.095 para el de loseta.

En cuanto a los tiempos de calentamiento y de enfriamiento fueron casi los mismos para los tres tratamientos. Al no haber registros del control externo el comparativo se hace con el control contiguo y se tiene que el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 72% y el de loseta en 70%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 66 y 71.5%.

A continuación se presentan las series de datos observados frente a los modelos que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

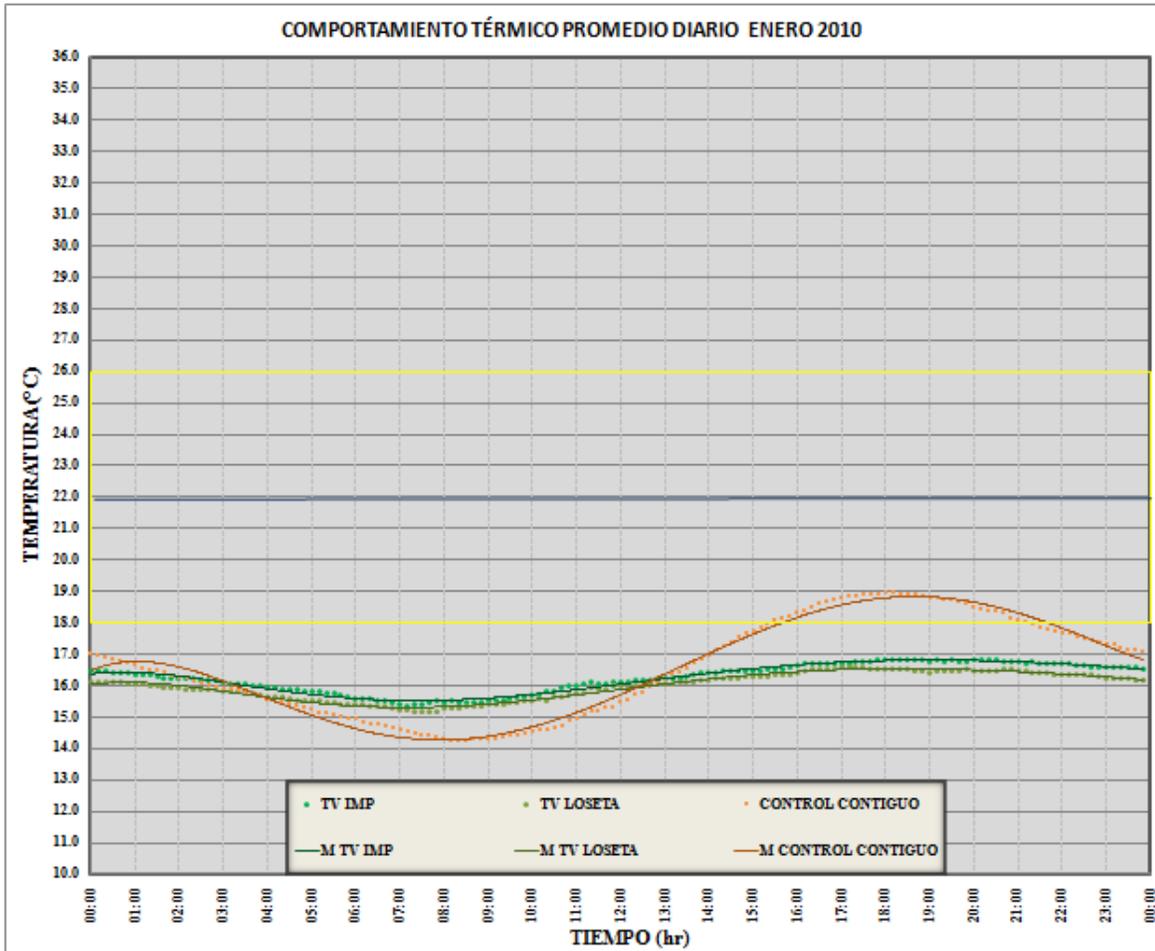


Gráfico 14. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, enero 2010

En el Gráfico se observa que las oscilaciones térmicas de los techos verdes tienden cada vez más a una línea recta. Éstas dejaron por completo la franja de confort térmico estando por debajo de ella en al menos 1°C. Cuando los valores son mínimos el control contiguo pasa una unidad por debajo de los modelos de los techos verdes. Los techos verdes reducen la temperatura máxima del control contiguo en 2°C.

4.1.3.11. Febrero 2010

A partir de los promedios de las temperaturas mínimas y máximas mensuales a través del día de febrero 2010 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento de los datos registrados. Ver Tabla 16.

Tabla 16. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, febrero 2010

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO CAL(hr)	TIEMPO ENF(hr)	GRAD CAL (°C/hr)	GRAD ENF (°C/hr)
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)				
TV _{Im}	08:50	16.30	20:20	18.30	11.50	12.50	0.174	0.160
TV _{Lo}	08:10	16.00	17:10	17.90	9.00	15.00	0.211	0.127
CC	09:50	15.60	18:40	21.00	8.83	15.17	0.611	0.356
CE	08:10	14.90	18:30	18.80	10.33	13.67	0.377	0.285

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

El comportamiento térmico promedio diario mensual para febrero establece que entre las 8:50 y las 8:10 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 16.30 y 16°C hasta los 18.30 y 17.90°C que se dieron a las 20:20 y 17:10 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.174°C para el impermeabilizante y 0.211°C para el de loseta por hora. El gradiente de enfriamiento fue de 0.160 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.127 para el de loseta.

En cuanto al control contiguo los tiempos de calentamiento y de enfriamiento fueron casi los mismos al de los del techo verde con loseta. La azotea con impermeabilizante tiene un aumento de una hora en estos tiempos con el control contiguo. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 54% y el de loseta en 44%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 44 y 56% con respecto al control externo. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento aumenta en 62% y el de enfriamiento en 25% en comparación con control externo.

Ver las series de datos observados frente a los modelados que representan el comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

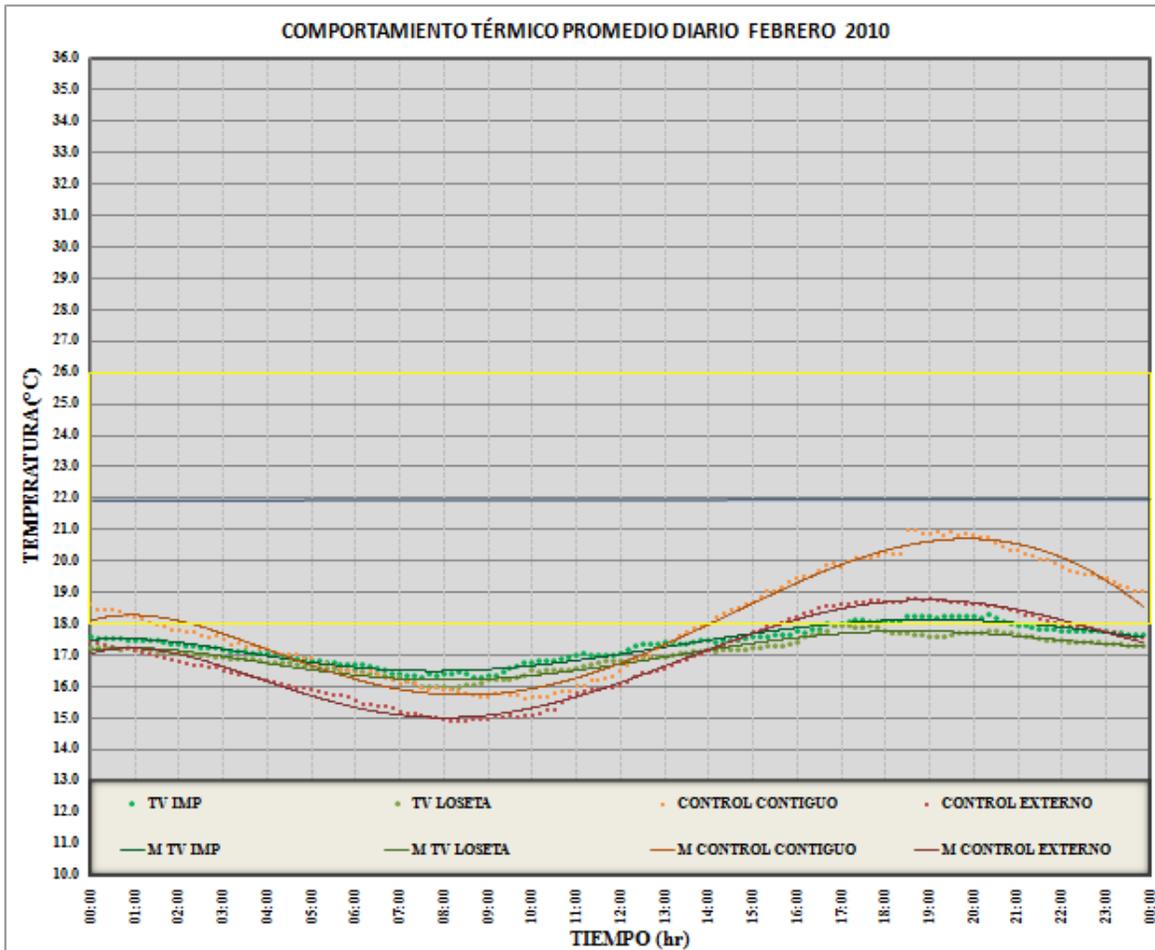


Gráfico 15. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, febrero 2010

En el Gráfico 15 las oscilaciones térmicas de los techos verdes empiezan a regresar al límite inferior de la zona de confort térmico. En este mes se ve como el control externo rebasa en temperaturas mínimas a todos los tratamientos, lo hace bajando en 3°C al límite inferior de confort térmico. Cuando los valores son mínimos el control contiguo aumenta en casi una unidad la temperatura del control externo y los techos verdes lo hacen en más de la unidad. En este mes un comportamiento inusual es el del control contiguo que cuando las temperaturas son máximas superan al control contiguo. Esto no había sucedido en los meses anteriores. Los techos verdes reducen la temperatura máxima del control contiguo en 2°C y el control externo lo hace en 1.5°C.

De haber existido registros del control externos para diciembre 2009 y enero 2010 el comportamiento de los tratamientos con respecto a éste pudieron haber seguido la misma dinámica térmica. Se pudo haber visualizado un aumento en la temperatura máxima del control contiguo más allá del externo y también un aumento de la temperatura del control contiguo y los techos verdes por encima de éste.

4.1.3.12. Marzo 2010

En la Tabla 17 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para el mes de marzo 2010.

Tabla 17. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, marzo 2010

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL	GRAD ENF
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)	(°C/hr)	(°C/hr)
TV _{Im}	08:40	20.10	18:30	23.10	9.83	14.17	0.305	0.212
TV _{Lo}	08:00	20.70	18:30	23.50	10.50	13.50	0.267	0.207
CC	08:30	18.70	17:50	25.50	9.33	14.67	0.729	0.464
CE	09:50	20.80	18:40	28.40	8.83	15.17	0.860	0.501

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

Para marzo entre las 8:40 y las 8:00 hrs se presentó la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente. Estas temperaturas fueron aumentando de 20.10 y 20.70°C hasta los 23.10 y 23.50°C que se dieron a las 18:00 hrs para los techos verdes. El gradiente de calentamiento de los techos verdes fue de 0.305°C para el impermeabilizante y 0.267°C para el de loseta por hora. El gradiente de enfriamiento fue de 0.212 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.207 para el de loseta.

En cuanto al control contiguo y el techo verde con impermeabilizante el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron casi iguales, mientras que el otro techo verde superó el tiempo de calentamiento en casi una hora y el del control externo fue menor a una hora. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el

gradiente de calentamiento en 64.5% y el de loseta en 69%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 58 y 59% con respecto al control externo. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento lo hace en 15% y el de enfriamiento en 7% en comparación con control externo. Ver las series de datos observados frente a los modelados.

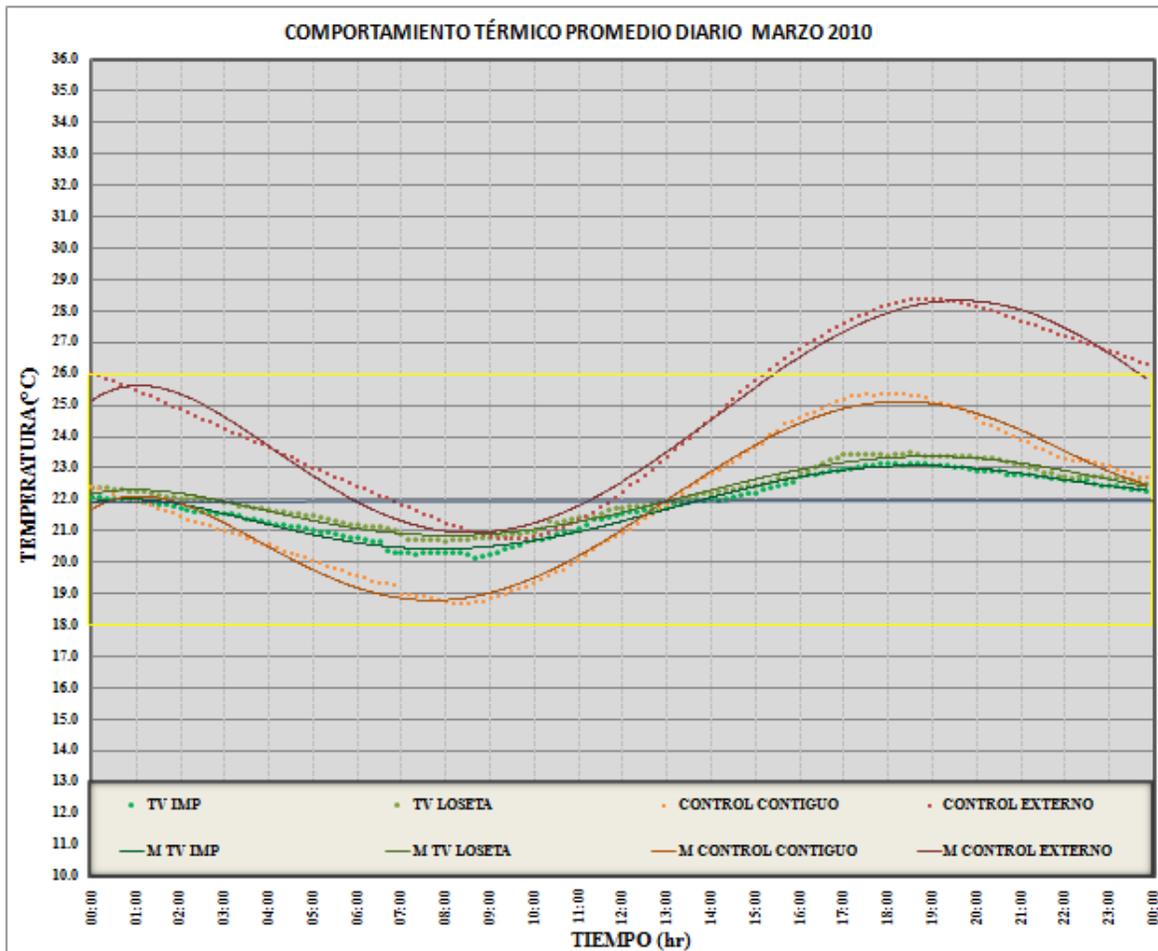


Gráfico 16. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, marzo 2010

Según el Gráfico 16 las oscilaciones térmicas de los techos verdes se posicionan nuevamente en la zona media de confort térmico y el control externo vuelve a subir por encima de todos los tratamientos. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima apenas por debajo del control externo. Cuando los valores son máximos lo hacen en casi 5°C mientras que el control contiguo lo hace en poco más de 3°C.

4.1.3.13. Abril 2010

El último mes de registro fue abril 2010. En la Tabla 18 se presentan los gradientes de calentamiento y enfriamiento a partir de los datos registrados para él.

Tabla 18. Gradientes de calentamiento y enfriamiento, abril 2010

TRATM	MÍNIMO		MÁXIMO		TIEMPO	TIEMPO	GRAD CAL	GRAD ENF
	HORA	TEMP(°C)	HORA	TEMP(°C)	CAL(hr)	ENF(hr)	(°C/hr)	(°C/hr)
TV _{Im}	08:00	22.90	18:50	25.00	10.87	13.13	0.193	0.160
TV _{Lo}	08:50	22.80	18:00	25.20	9.13	14.87	0.263	0.161
CC	08:00	22.50	17:30	27.60	9.50	14.50	0.537	0.352
CE	09:30	24.00	19:30	30.80	10.00	14.00	0.680	0.486

TV_{Im}= techo verde con impermeabilizante, TV_{Lo}= techo verde con loseta, CC= control contiguo, CE= control externo

En abril la temperatura mínima para los techos verdes con impermeabilizante y con loseta respectivamente se presentó entre las 8:00 y las 8:50 hrs. Estas temperaturas fueron aumentando de 22.90 y 22.80°C hasta los 25 y 25.20°C que se dieron a las 18:50 y 18:00 hrs. El gradiente de calentamiento por hora de los techos verdes fue de 0.193°C para el impermeabilizante y 0.263°C para el de loseta. El gradiente de enfriamiento fue de 0.160 para el techo verde con impermeabilizante y de 0.161 para el de loseta.

En cuanto al control contiguo y el techo verde con impermeabilizante el tiempo de calentamiento y el tiempo de enfriamiento fueron muy similares, mientras que el otro techo verde superó el tiempo de calentamiento en más de una hora y el del control externo un poco menor al control contiguo. En cuanto al control externo el techo verde con impermeabilizante reduce el gradiente de calentamiento en 72% y el de loseta en 61%. El gradiente de enfriamiento de los techos verdes se reduce en 67% con respecto al control externo. En relación al control contiguo el gradiente de calentamiento lo hace en 21% y el de enfriamiento en 28% en comparación con control externo.

A continuación se presentan las series de datos del comportamiento térmico promedio diario mensual ideal.

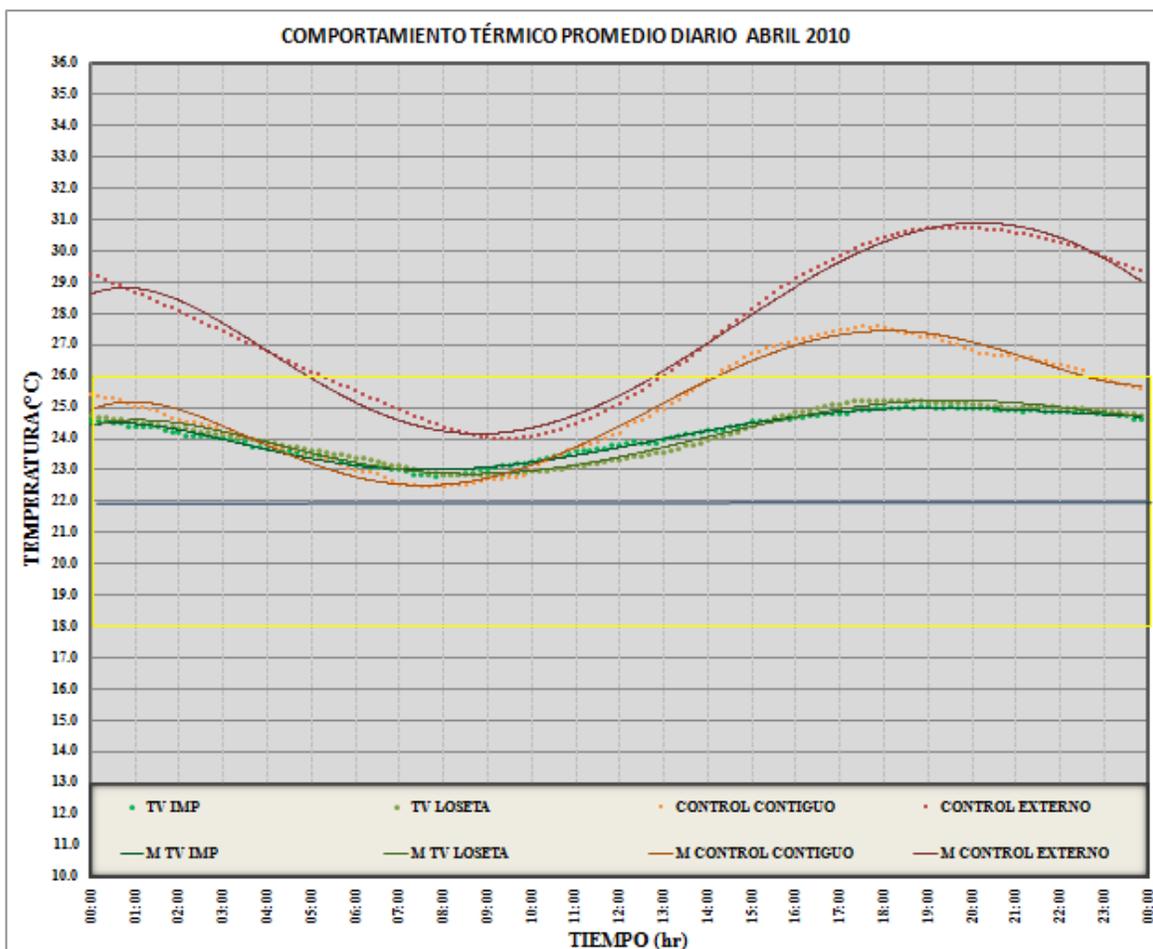


Gráfico 17. Modelos del comportamiento térmico promedio diario, abril 2010

En el Gráfico 17 las oscilaciones térmicas de los techos verdes se posicionan por encima de la zona media de confort térmico. Los techos verdes reducen la temperatura cuando ésta es mínima apenas alrededor de 1°C con respecto al control externo. El control contiguo se posiciona un poco por debajo de las azoteas verdes. Cuando los valores son máximos los techos verdes reducen la temperatura en casi 6°C mientras que el control contiguo lo hace en alrededor de los 3°C con respecto al control externo.

4.1.3.14. *Resumen*

En resumen el comportamiento térmico promedio diario mensual de los techos verdes para el periodo experimental oscila entre los 15 y los 27°C, el control contiguo lo hace entre los 14 y los 29 °C y el control externo entre los 15 y los 35°C. Los gradientes de calentamiento de los techos verdes van de 0.09 a 0.42°C/hr, de 0.45 a 0.73°C/hr para el control contiguo y de 0.38 a 1.73°C/hr para el control externo. En cuanto los gradientes de enfriamiento estos van de 0.08 a 0.30°C/hr para los techos verdes, de 0.31 a 0.48°C/hr para el control contiguo y de 0.29 a 1.31°C/hr para el control externo.

De manera general se tiene que los techos verdes reducen la temperatura en hasta 8°C con respecto al control externo cuando las temperaturas son máximas. Éstos la aumentan en 0.5°C cuando las temperaturas son mínimas. El control contiguo reduce las temperaturas máximas alrededor de 5°C y en 0.7°C cuando son mínimas.

4.2. Resultados Hidrológicos

Para conocer la respuesta hidrológica de los techos verdes se obtuvo la tasa de precipitación, el tiempo de escurrimiento y el volumen de escurrimiento de las ecoestructuras y de una superficie control para varias tormentas de abril 2009 a abril 2010. Estos resultados se muestran en dos fases: los escurrimientos totales de las tormentas y los escurrimientos medidos durante las tormentas.

4.2.1. Escurrimientos totales de las tormentas

A continuación se presentan los datos obtenidos de los niveles finales del escurrimiento con respecto a las tormentas de los tratamientos experimentales.

4.2.1.1. Junio 2009

Para junio la lámina de escurrimiento total muestra que el control escurre el 95% de la precipitación total en promedio. Para los salones con techo verde el escurrimiento es del 20% en promedio. Por lo tanto los techos verdes retuvieron el 80% de la precipitación.

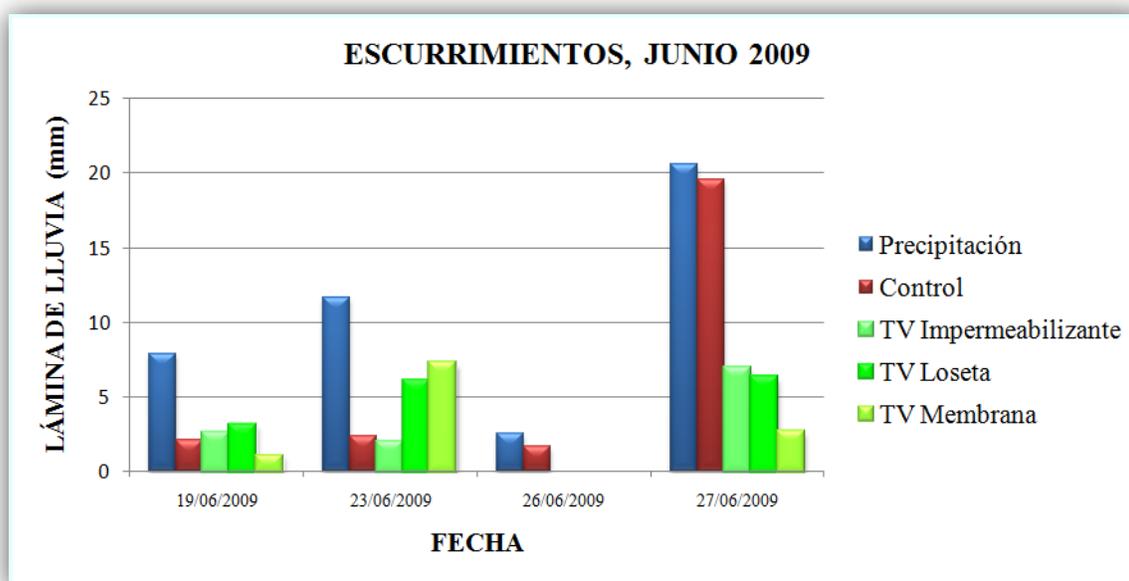


Gráfico 18. Lámina de escurrimiento, Junio 2009

4.2.1.2. Julio 2009

En el mes de julio se midieron cuatro eventos. Los resultados del escurrimiento demuestran que en control escurre en promedio el 80% de la precipitación total y para los salones donde se tiene techo verde el escurrimiento es en promedio de 10%, esto representa que los techos verdes para las tormentas del mes de julio retuvieron el 90% de la precipitación. Ver Gráfico 19.

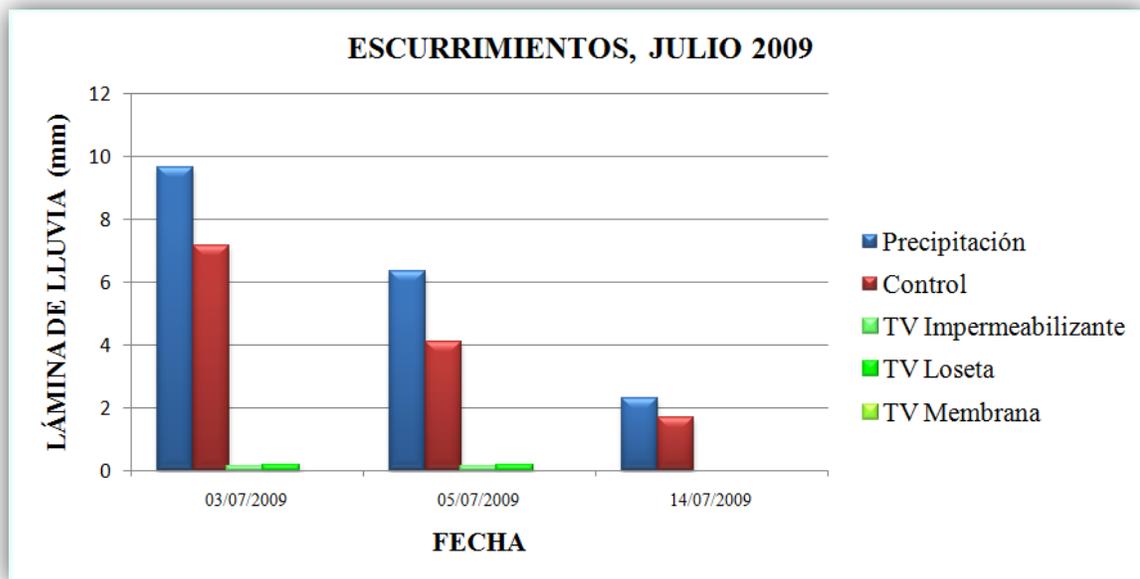


Gráfico 19. Lámina de escurrimiento, Julio 2009

4.2.1.3. Septiembre 2009

En los resultados de la lámina de escurrimiento total para los seis eventos medidos del mes de septiembre se puede observar, que en el control escurre en promedio el 85% de la precipitación total y para los salones donde se tiene techo verde el escurrimiento es en promedio del 50%. Esto representa que los techos verdes para las tormentas del mes de septiembre retuvieron en promedio el 50% de la precipitación. Ver Gráfico 20.

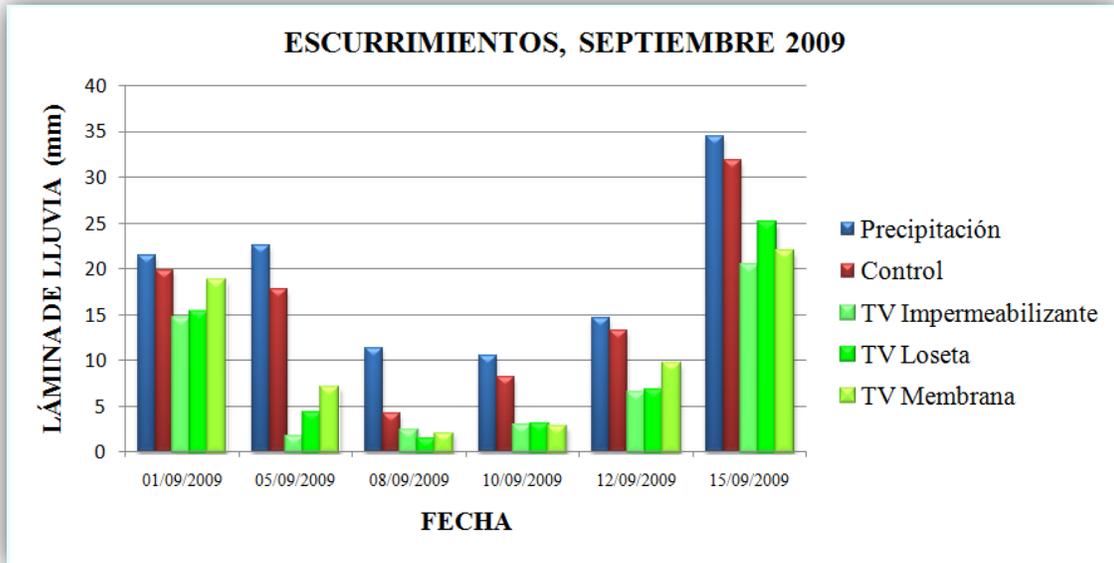


Gráfico 20. Lámina de escurrimiento, Septiembre 2009

4.2.1.4. Octubre 2009

Para los tres eventos de este mes el control escurrió en promedio 80% de la precipitación total. En los salones con techo verde el escurrimiento fue en promedio del 25%, esto es una retención del 75% de la precipitación total. El día 25 no se logró registrar el escurrimiento del control ya que se desbordó. Ver Gráfico 21.

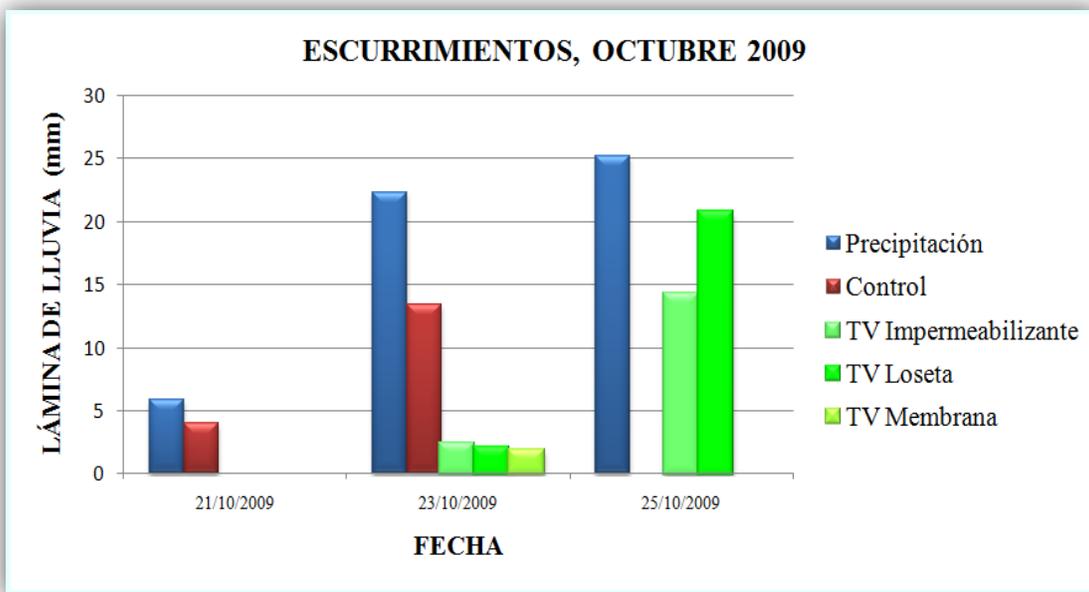


Gráfico 21. Lámina de escurrimiento, Octubre 2009

4.2.1.5. Febrero 2010

En el mes de Febrero ocurrió un solo evento. Los resultados del escurrimiento demuestran que el control escurre 80% de la precipitación total y para los salones donde se tiene techo verde el escurrimiento es en promedio de 75%. Esto representa que los techos verdes para esta tormenta sólo retuvieron el 25% de la precipitación total como se puede observar en el Gráfico 22.

También se puede ver que los valores del control y el techo verde con impermeabilizante son prácticamente iguales debido a que el suelo se encontraba saturado gracias a eventos días antes de que éste fuera medido. El propósito de esta medición fue ver el efecto que tenían ante esta condición.



Gráfico 22. Lámina de escurrimiento, Febrero 2010

4.2.2. Escurrimientos medidos durante las tormentas

En esta parte se muestran las medidas del nivel de escurrimiento a cada 5 minutos durante las tormentas para obtener el tiempo de escurrimiento de los tratamientos, el volumen y el comportamiento de los gastos picos. A continuación se presentan los resultados de los 5 eventos más significativos.

4.2.2.1. Evento del 31 de Agosto 2009

El evento medido el lunes 31 de Agosto del 2009 inició a las 18:44 hrs y las mediciones terminaron a las 21:14 hrs realizándolas con un intervalo de 5 minutos. En la Tabla 19 se pueden observar los resultados obtenidos de las mediciones realizadas. En el control prácticamente escurrió todo lo que llovió. El 10% que se redujo se debe a la acumulación en el techo por la basura existente. En los techos verdes se redujo el escurrimiento total al 50% de la precipitación total.

Tabla 19. Escurrimiento por tratamiento, 31/08/2009

Concepto	Precipitación Total = 24.6 mm			
	Control	TV Imp.	TV Loseta	TV Memb.
Vol. Esc. (mm/m ²)	22.07	12.70	12.06	12.30
Vol. Esc. (%)	90.00	51.62	49.00	50.00
Red. Esc. (%)	10.00	48.38	51.00	50.00

En el Gráfico 23 se hace notar el efecto que tienen los techos verdes en el aumento del tiempo de concentración en comparación con el control, el cual es de 30 minutos. También se puede observar que la lámina del techo control tiene un comportamiento similar a la evolución de la precipitación en el tiempo y para los techos verdes podemos ver que se estabilizan en el rango de 5 a 12 mm/h, mientras que el control se dispara hasta 35 mm/h.

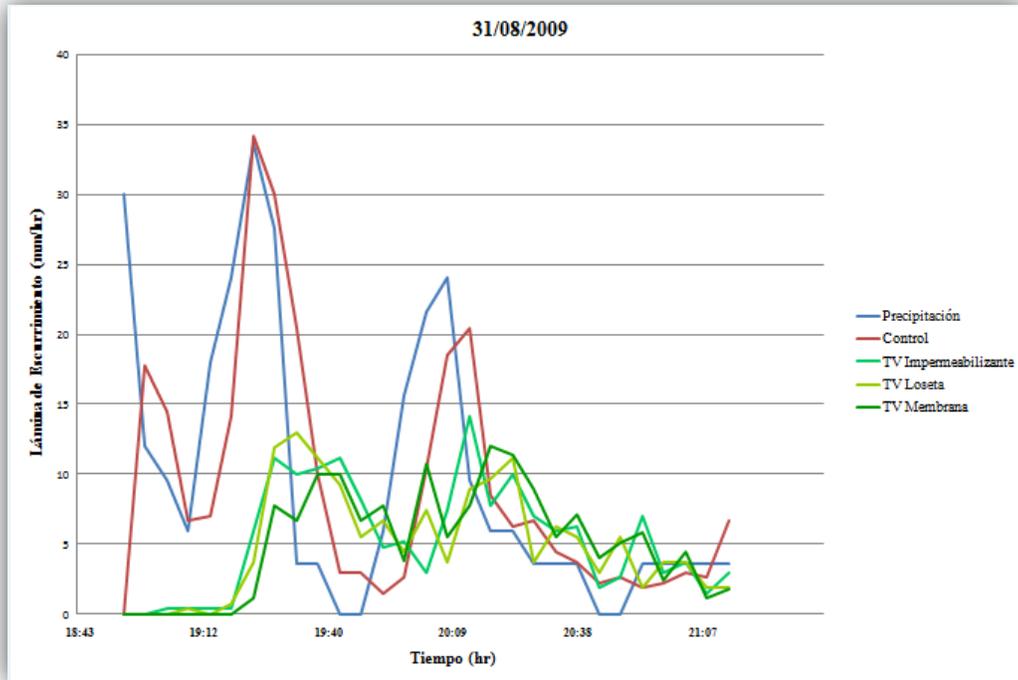


Gráfico 23. Hidrograma de escurrimiento 31/08/2009

4.3.2.2. Evento del 09 de Septiembre 2009

El día miércoles 9 de Septiembre del 2009 se presentó un evento pequeño de 2.1 mm de precipitación total que inicio a las 16:50 hrs y se terminó de medir a las 17:20 hrs. Los resultados que se muestran en la Tabla 20 son del volumen de escurrimiento para el control y los techos verdes con diferentes tratamientos de impermeabilización. Se puede ver que para precipitaciones pequeñas los techos verdes funcionan correctamente al detener el escurrimiento.

Es importante resaltar que el contenido de humedad del suelo era alto ya que hubo precipitación el día anterior al evento. Puede provocar duda el valor de 42.86% de escurrimiento en el techo verde del salón 23, pero es importante recordar que el área de este salón es prácticamente el doble que los otros. Se puede decir que el volumen de escurrimiento en promedio de los techos verdes es del 16.45%.

Tabla 20. Esgurrimiento por tratamiento, 09/08/2009

Concepto	Precipitación Total = 2.1 mm			
	Control	TV Imp.	TV Loseta	TV Memb.
Vol. Esc. (mm/m ²)	1.79	0.34	0.25	0.9
Vol. Esc. (%)	85.00	16.00	11.9	42.86
Red. Esc. (%)	15.00	84.00	88.10	57.14

El Gráfico 24 muestra el comportamiento de la lámina de escurrimiento, en él se ve que el aumento en el tiempo de concentración es de 5 minutos en comparación al pico de la precipitación. Algo interesante que se observa es como tiempo de concentración del control en comparación con los techos verdes es igual lo que demuestra, que la humedad del suelo tiene un impacto importante en el funcionamiento de los techos verdes. Un contenido de humedad alto en suelos finos arcillosos, como el que tiene los techos verdes, los vuelve impermeables. Pero eso es importante resaltar que aunque se presente este efecto los techos verdes reducen 80% el escurrimiento en comparación al control.

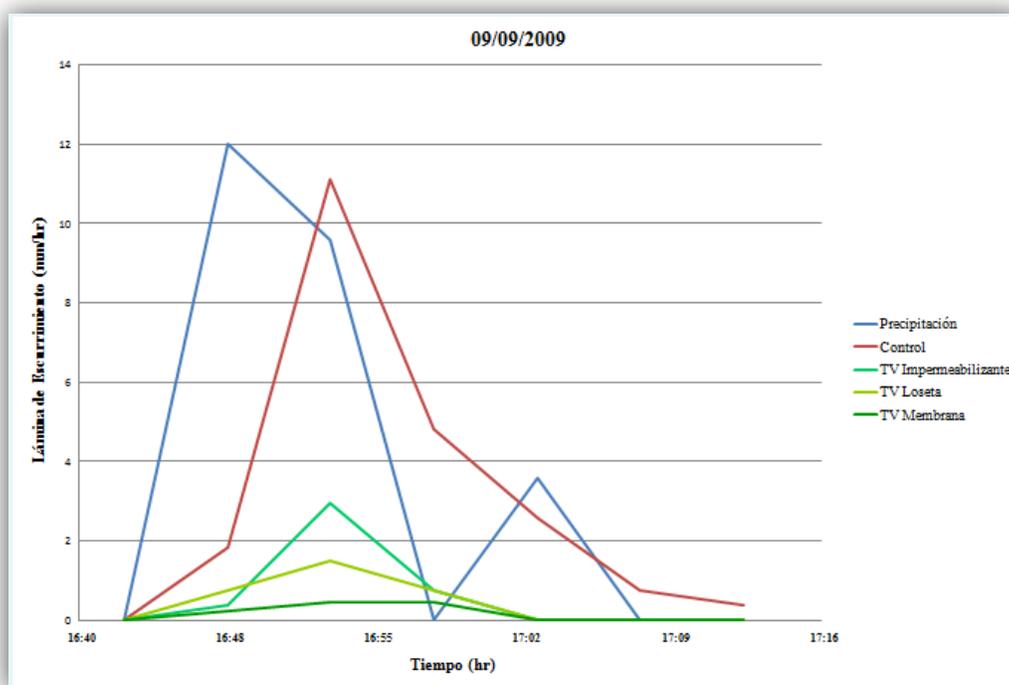


Gráfico 24. Hidrograma de escurrimiento 09/09/2009

4.3.2.3. Evento del 10 de Septiembre 2009

El evento medido el jueves 10 de Septiembre del 2009 inicio a las 16:28 hrs. y las mediciones terminaron a las 18:53 hrs realizándolas con un intervalo de 5 minutos. En la Tabla 21 se pueden observar los resultados obtenidos de las mediciones realizadas. Como se puede apreciar en el control prácticamente escurrió todo lo que llovió. El 20% que se marca que redujo se debe a la acumulación que se presenta en el techo por la basura. En los techos verdes se redujo el escurrimiento al 70% de la precipitación total.

Tabla 21. Esgurrimento por tratamiento, 10/09/2009

Concepto	Precipitación Total = 10.2 mm			
	Control	TV Imp.	TV Loseta	TV Memb.
Vol. Esc. (mm/m ²)	8.25	2.94	3.15	2.84
Vol. Esc. (%)	80.00	28.88	30.88	27.84
Red. Esc. (%)	20.00	71.12	69.12	72.16

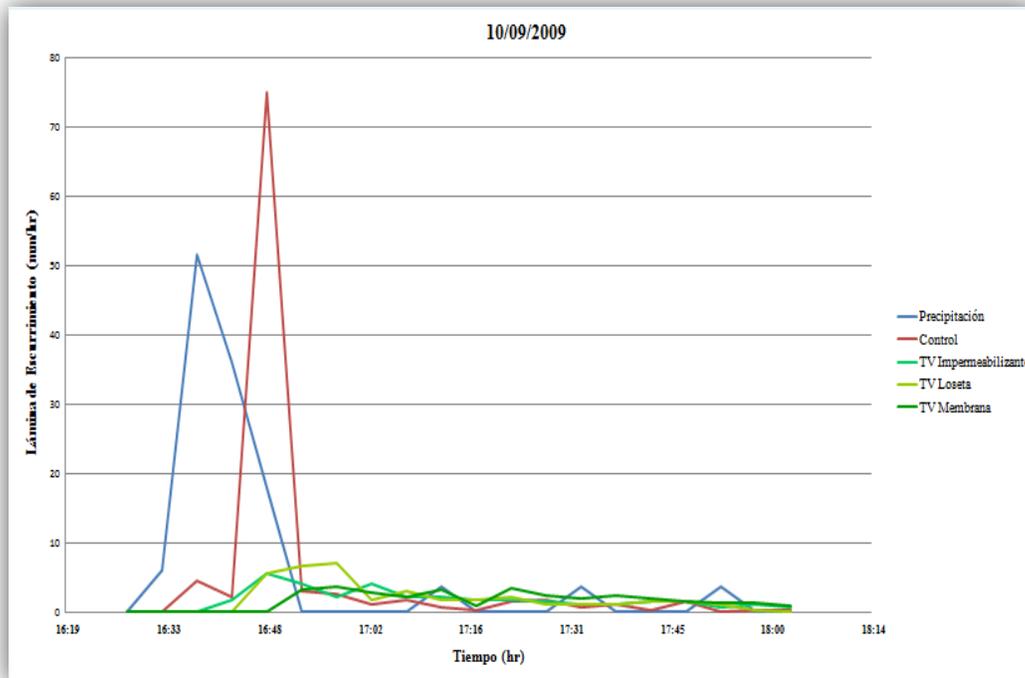


Gráfico 25. Hidrograma de escurrimiento 10/09/2009

En el Gráfico 25 se hace notar el efecto que tienen los techos verdes en el aumento del tiempo de concentración en comparación con el control, el cual es de 20 minutos. También se puede observar que el techo control presentó una descarga importantes a las 16:48 hrs, superior a la precipitación misma. Este comportamiento atípico puede ser debido a un taponamiento momentáneo en la salida del tubo de descarga. Así los techos verdes tienen una evolución en el escurrimiento en el rango de 3 a 7 mm/h, mientras que el control se dispara hasta 74 mm/h.

4.3.2.4. Evento del 24 de Octubre 2009

Los resultados que se muestran en la Tabla 22 son del evento de día sábado 24 de octubre del 2009. De éste se desconocen los datos de la reducción del volumen de escurrimiento ya que al llegar al sitio experimental el control ya estaba desbordado y no se pudieron tomar esas lecturas.

Sin embargo en el Gráfico 26 se ve como la lámina de escurrimiento en los techos verdes se reduce significativamente en comparación a la precipitación. Se observa cómo el gasto pico de estos son superiores al de la precipitación y como estos se desfasan de la misma comprobando así el aumento del tiempo de concentración antes del escurrimiento.

Tabla 22. Escurrimiento por tratamiento, 24/10/2009

Concepto	Precipitación Total = 20.07 mm			
	Control	TV Imp.	TV Loseta	TV Memb.
Vol. Esc. (mm/m²)	S/D	10.66	13.14	15.18
Vol. Esc. (%)	S/D	S/D	S/D	S/D
Red. Esc. (%)	S/D	S/D	S/D	S/D

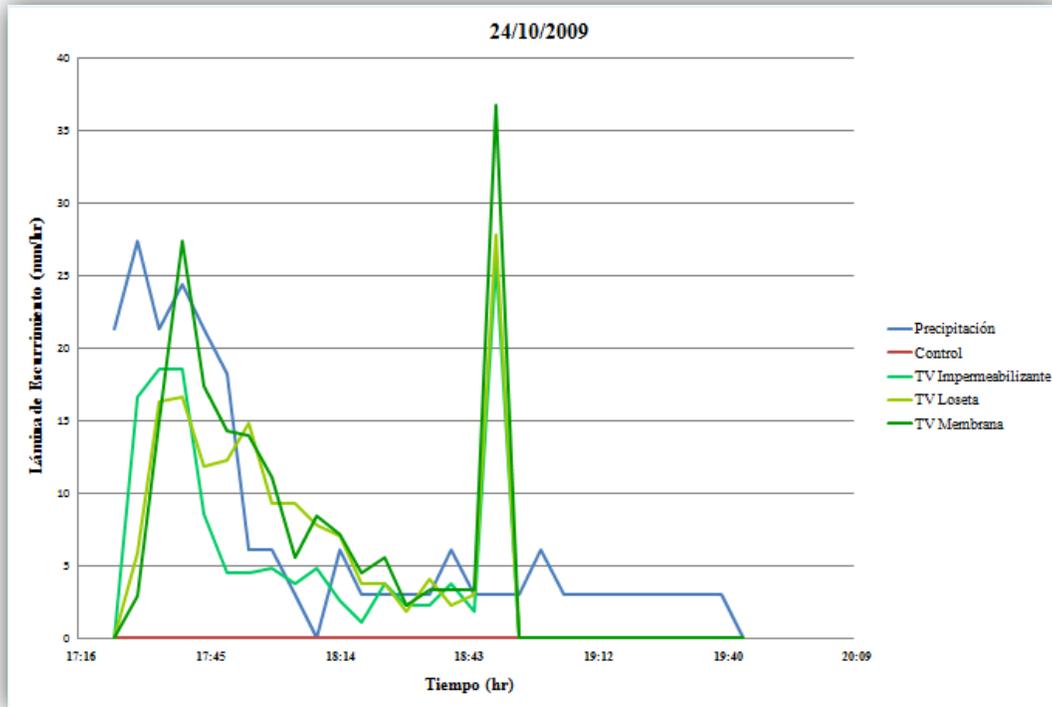


Gráfico 26. Hidrograma de escurrimiento 24/10/2009

4.3.2.5. Evento del 04 de Febrero 2010

Los resultados de la reducción del volumen de escurrimiento del control vs los tratamientos verdes para el día 4 de febrero van del 30.53% al 11.31% como se observa en la Tabla 23.

Tabla 23. Escurrimiento por tratamiento, 04/02/2010

Concepto	Precipitación Total = 1.5 mm			
	Control	TV Imp.	TV Loseta	TV Memb.
Vol. Esc. (mm/m²)	12.02	10.66	10.05	13.92
Vol. Esc. (%)	100.00	88.69	83.55	69.47
Red. Esc. (%)	0.00	11.31	16.45	30.53

. En el Gráfico 27 se ve como el volumen de escurrimiento en los techos verdes se reduce significativamente en comparación a la precipitación. Se observa cómo se desfasan y disminuyen los gastos pico de las eco-estructuras demostrando el retraso del escurrimiento pese a haber tomado las mediciones cuando el escurrimiento ya había iniciado en todos los tratamientos.

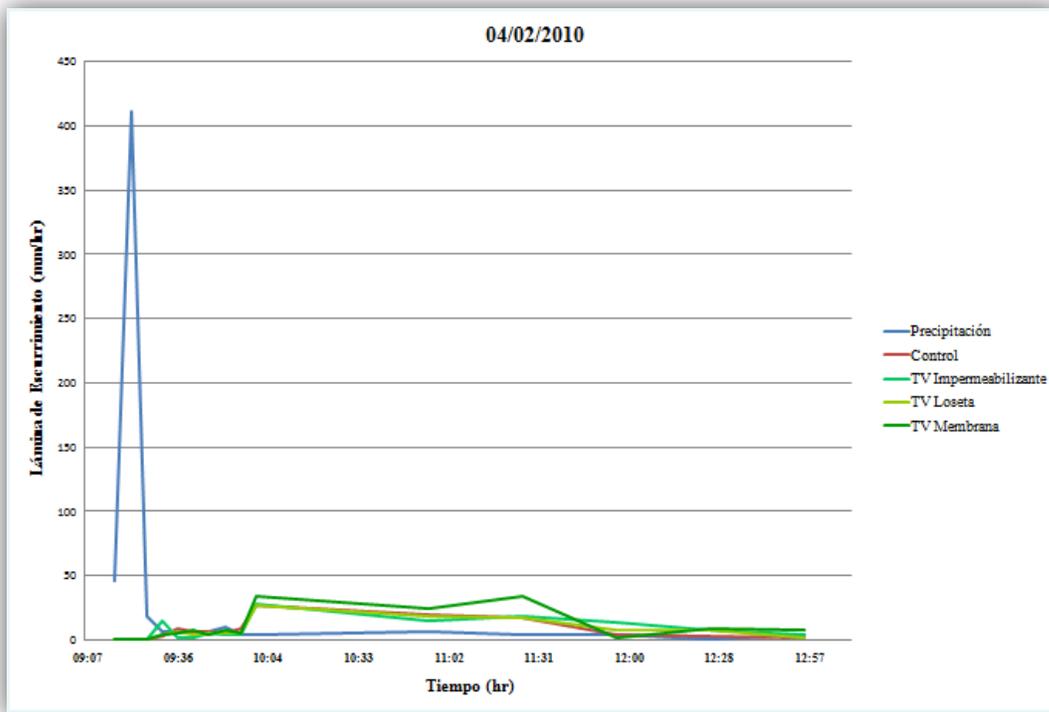


Gráfico 27. Hidrograma de escurrimiento 04/02/2010

V. CONCLUSIONES

En cuanto al análisis térmico después del estadístico anual y estacional, los resultados demuestran que para la zona urbana del municipio de Querétaro los techos verdes tienden a reducir la temperatura interna en un rango de 2 a 7°C para las temperaturas medias máximas anuales. Para las temperaturas medias mínimas anuales puede haber un alza en éstas de hasta 6°C. Confirmando que las azoteas verdes no sólo permiten refrescar el interior de las edificaciones si no que permiten conservar el calor interior de manera muy significativa. Para las temperaturas medias anuales se concluye que los techos verdes y el control contiguo permanecen dentro de los límites de la zona de confort térmico durante más del 80% del periodo experimental. El estadístico estacional muestra que los techos verdes mejoran las condiciones de temperatura al interior de las edificaciones en las cuatro estaciones frente al control externo.

Para el comportamiento térmico promedio diario mensual los techos verdes reducen la temperatura en hasta 8°C con respecto al control externo y en 2°C del control contiguo cuando las temperaturas son máximas. Cuando son mínimas éstos permiten que la temperatura se equilibre con el control externo mientras que el control contiguo continúa la reducción un grado más. Los techos verdes retardan el calentamiento de las aulas hasta un 76% más que las aulas sin techo verde cuando las temperaturas son máximas mientras que el control contiguo lo aceleran en un 18%. Cuando las temperaturas son mínimas las azoteas verdes retardan la pérdida de calor hasta un 72% mientras que el control contiguo lo acelera en un 7%.

El análisis hidrológico demuestra que el sistema techo verde permite la infiltración y almacenamiento de las aguas pluviales reduciendo así el riesgo de inundaciones. Los datos mostraron una reducción promedio máxima del escurrimiento del 80% mientras que la mínima fue del 30%. El gasto pico se redujo muy significativamente hasta en un 80%. La lámina de escurrimiento para los techos verdes se desfasa del control con lo que se comprueba el retraso del escurrimiento entre 5 y 30 minutos dependiendo de

la intensidad y duración de la tormenta además de las condiciones de la vegetación y la humedad del suelo previa a ésta.

Se detectaron algunos fenómenos que pueden sesgar los resultados de la investigación. Se descubrió que un techo desnudo en el área de estudio sufre efectos térmicos importantes a causa de los techos verdes contiguos a él. También se detectó que los edificios monitoreados al estar en uso registraron algunos datos que salen de la continuidad de series esto se le atribuye a la entrada y salida de personas, a la apertura de las aulas y al uso parcial de sistemas de aire acondicionado en los primeros meses de registro. Se desprecian los efectos térmicos que se pudieran generar por los materiales impermeabilizantes sobre las aulas experimentales. Por los resultados obtenidos se presume que esta variable no causa diferencias significativas entre las mediciones térmicas de los tres techos verdes. Por último el estado de la vegetación y humedad del suelo son factores que afectan a los registros térmico e hidrológicos del estudio, sin embargo estos factores se despreciaron en este análisis y pueden ser una oportunidad interesante para una nueva investigación.

En resumen con base a los resultados obtenidos de la investigación, los sistemas techo verde son una opción factible para lograr confort térmico y ayudar a un mejor funcionamiento hídrico en regiones urbanas de clima semiárido como la ciudad de Santiago de Querétaro. Por todo lo anterior se confirma la hipótesis de la presente tesis.

BIBLIOGRAFÍA

Al-Sanea, S. A. (2004). Thermal performance of Hordi Roofs in a Hot-dry Climate. *J. King Saud University*, 17 (1), 101-121.

Aparicio-Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México, México: Limusa S.A. de C.V.

Aynsley, R., & Su, B. (2005). Insulation of roofs in warm climates. *The impact of cultural differences and systems on construction performance*. Las Vegas: International symposium on procurement systems.

Bass, B. (2007). *Green roofs and green walls: potencial energy savings in the winter*. environment Canada at the University of Toronto, Adaptation and impact research division. Toronto: .

Bliuc, I., & Baran, I. (2006). Quality of the inside environment and the energy efficiency of buildings. En *Intersections* (Vol. 3, págs. 53- 62). Lasi, Romania: Matei- Teiu Botez.

Castañeda-Nolasco, G., & Vecchia, F. (2007). Sistema de techo alternativo para vivienda progresiva en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 11 (2), 21-30.

Chua, K. J., & Chou, S. K. (2009). An ETTV-based approach to improving the energy performance of commercial buildings. *Energy and buildings* .

CNA. (2009). Concentrado de Precipitación y Temperatura 1921-2008 del Municipio de Querétaro. Comisión Nacional del Agua, Querétaro.

Comisión Estatal del Agua Queretaro. (2009). *CEA*. Recuperado el 2009, de <http://www.ceaqueretaro.gob.mx>

CONAPO. (2009). *Consejo Nacional de Población*. Recuperado el 15 de Junio de 2009, de <http://www.conapo.gob.mx>

Connelly, M., & Liu, K. (2005). Green roof research in British Columbia- an overview. *Construction* , 1-17.

Dam, A., Walke, C., & Wilson, C. (2000).*The future of rooftop gardens on the University of Waterloo Campus.* Waterloo, Canadá: University of Waterloo.

Dávila- Suarez, V., & Chaverra- Gil, H. (Agosto de 1978). Kikuyo: Pennisetum Clandestinum Hochts. *Temas de orientación agropecuaria* , 147-154.

Davis, Mike, Steadman, P., & Oreszczyn, T. (2008). Strategies for the modification of the urban climate and the consequent impact on building energy use. *Energy Policy* .

El ergonomista. (2006). Recuperado el 2009, de [http:// elergonomista.com](http://elergonomista.com)

Eleftheria, A., & Jones, P. (2008).Temperature decreases in a urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and environment*, 43 (4), 480- 493.

Food and agriculture organization of the United Nations. (2009).*FAO.* Recuperado el 2009, de <http://www.fao.org>

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41 (5), 1276-1285.

Giridharan, R., Lau, S., Ganesa, S., & Givoni, B. (2008). Lowering the outdoor temperature in high-rise high-density residential developments of coastal Hong Kong: the vegetation influence. *Building and environment*, 43, 1583- 1595.

Gobierno del Estado de Querétaro. (2009). Recuperado el 2009, de <http://www.queretaro.gob.mx>

Gobierno Estatal de Buenos Aires. (2007). Isla de Calor Urbana. En Plan de Acción Buenos Aires 2030 (págs. 143-158). Argentina.

Gobierno Federal de los Estados Unidos Mexicanos. (2009). Recuperado el 2009, de <http://presidencia.gob.mx>

González del Tánago, M. (2002).*Intercepción*. Universidad Politécnica de Madrid, Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología, Madrid.

González- Embarcadero, A., Flore- Cecilio, V., & García- Silva, S. (2004).*Guía de identificación de plantas útiles para cobertura de azoteas urbanas*. (A. González-Embarcadero, Ed.) México: Universidad Autónoma Chapingo.

Hake, A. (2004).*Promoting sustainable green roofs through leadership in energy and environmental design (LEED)*. Manhattan, Kansas: Kansas State University.

Hillel, D. (1998).*Environmental Soil Physics*. San Diego, California: Academic Press.

Instituto Municipal de Planeación de Querétaro (2010).*Gobierno del Estado de Querétaro*. Recuperado el 10 de junio de 2010, de <http://www.implanqueretaro.gob.mx>

INEGI. (2010).*Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Recuperado el 2010, de <http://www.inegi.org.mx>

Jiang, Y., Bacall, A., Jones, B., Hammer, W., Kluz, E., & Soan, A. (2006). Design of a green demo building in a hot and humid city in China.

Köhler, M., Schmidt, M., & Laar, M. (2003). Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands. *World climate and energy event*, (págs. 1-5). Rio de Janeiro.

Kumar, R., & Kaushik, S. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and environment* (40), 1505- 1511.

Lanham, J. K. (2007).*Thermal performance of green roofs in cold climates*. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University.

Lerum, & Vidar. (2003). Green roof turning white. 85287-1605.

Liu, K., & Minor, J. (Mayo de 2005).Performance evaluation of an extensive green roof. *Construction* , 1-11.

Mackey, C., & Wright, L. (1946).*Periodic heat flow-composite walls or roofs.* American Society of heating and ventilation engineers.

Mackey, C., & Wright, L. T. (1943).*Periodic heat flow- homogeneous walls or roofs.* American society of heating and ventilation engineers.

Mercado, M. V., Esteves, A., & Filippín, C. (2010).Comportamiento térmico-energético de una vivienda social de la ciudad de Mendoza, Argentina. *Asociación Nacional de Tecnología del Ambiente Construido*, 10 (2), 87-100.

Municipio de Querétaro. (2009).*Municipio de Querétaro.* Recuperado el 2009, de <http://mqro.gob.mx>

Nanía, L. S. (2003).*La cuenca y los procesos hidrológicos.* Granada, España: Universidad de Granada.

Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33, 719-729.

ONU. (2009).*Organización de las Naciones Unidas México.* Recuperado el 2009, de <http://www.onu.org.mx>

Palomo- Del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potencial in buildings. *Energy and Buildings* (27), 179- 193.

Radu, A., & Dumitrescu, L. (2006). Sustainable development in Civil engineering under the climate change and the increasing cost of the energy. En *Physics of constructions* (Vol. 3, págs. 63-67). Lasi, Romania: Matei- Teiu Botez.

Roberts, S. (2008). Altering existing buildings in the UK. *Energy Policy* .

SIAPA. (2010).*Sistema de alcantarillado y agua potable Jalisco México.* Recuperado el 2010, de <http://www.siapa.gob.mx>

Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. (2004).*Mecánica de suelos no saturados.* (J. A. Zepeda, Ed.) Querétaro, México: Universidad Autónoma de Querétaro.

Sotelo-Ávila, G. (1974). *Hidráulica general* (Vol. 1). México: Limusa S.A.

Stephenson, D. (1957).*Periodic heat flow in walls and roofs.* National research council of Canada, Division of building research, Ottawa.

Strahler, A. N. (2006).*Physical Geography.* New York: John Wiley and Sons.

U.S. Green Building Council. (2010).*USGBC.* Recuperado el 2010, de <http://www.usgbc.org/LEED>

UAM. (2007). *Universidad Autónoma Metropolitana en línea.* Recuperado el 2009, de <http://www.uamenlinea.uam.mx>

UNAM. (1996).*Principios de hidrogeografía.* México, México: Universidad Autónoma de México.

Vecchia, F., Givoni, B., & Silva, A. C. (2001).Analyzing thermal performance of occupied houses in Descalvado, Brazil. *The 18th conference on passive and low energy architecture* (págs. 7-9). Florianópolis: University of Sao Paulo.

Wai, K., & Mui, H. (2003). Adaptive comfort temperature model of air conditioned building in Hong Kong. *Building and Environment*, 38, 837-852.

Wark, C. G., & Wark, W. W. (2003). Green roof specifications and standards. *The construction specifier*, 56 (8).

Watkins, R., Palmer, J., & Kolokotroni, M. (2006). Increased temperature and intensification of the urban heat island: Implications for human comfort and urban design. *Built environment*, 33 (1), 85- 96.

Watkins, R., Palmer, J., & Kolokotroni, M. (2008). Increased temperature and intensification of the urban heat island: implications for Human comfort and urban design. *Built environment*, 33 (1).

Wong, N. H., Tay, S. F., Wong, R., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment* (38), 499- 509.

Yang, Z., & Xu, X. (2006). Study on the intelligence control system of artificial cooling source in Architecture. *Control systems for energy efficiency and comfort*, 5, 2-4.

Yu, C., & Hien, W. N. (2006). A green experiment conducted in the tropical climate. *The 23th Conference on Passive and Low Energy Architecture*, (págs. 6-8). Geneva.

Zhang, W., Wu, J., Wei, J., & Gao, X. (2006). Research on the effect of a planting roof on the Thermal Load of a Business Building. *Envelope Technologies for building energy efficiency*, 2, 4-2.

ANEXOS EN CD

Anexo A- Análisis de fase de suelo sólido-líquido-gas

Anexo B- Curva granulométrica del suelo

Anexo C- Monitoreo de la humedad del suelo y estado de la vegetación

Anexo D- Curva de calibración de la humedad del suelo

Anexo E- Base de datos mensual y estacional de temperatura interna de los techos verdes

Anexo F- Base de datos del comportamiento térmico promedio diario mensual de la temperatura interna de los techos verdes

Anexo G- Procedimientos para el cálculo de los escurrimientos totales

Anexo H- Procedimientos para el cálculo de los escurrimientos medidos durante las tormentas