

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN INGENIERÍA



TESIS

Evaluación de superficies verdes verticales como
estrategia de mitigación térmica en clima desértico-árido

PRESENTA: MA. DE LOS ÁNGELES CAMPOS OSORIO

angie.campos86@gmail.com

DIRECTOR DE TESIS: DR. NESTOR SANTILLÁN SOTO

MEXICALI, BAJA CALIFORNIA A:

Junio 2021

Agradecimientos

En primer instancia a Dios, por darme la fuerza y la oportunidad de enfrentar este proceso de su mano. Después a mi Esposo, por estar a mi lado, apoyarme en mi decisión y ser el pilar en mi fortaleza. A mi familia, por su apoyo incondicional.

A CONACYT por su apoyo económico durante estos 4 años. A mis tutores, Dr. Néstor Santillán y Dr. Rafael García Cueto por su guía y participación en esta etapa. Al grupo docente perteneciente al Instituto de Ingeniería por todo el conocimiento nuevo adquirido. A los docentes de la Facultad de Arquitectura, particularmente al Dr. Gonzalo Bojórquez por el préstamo de equipo utilizado para el proyecto.

Y por último, pero no menos importantes a mis amigos y compañeros del Instituto por el fiel acompañamiento en todo momento.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	viii
RESUMEN	1
CAPITULO 1. PRELIMINARES	2
1.1 INTRODUCCIÓN.....	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	7
1.4 ANTECEDENTES.....	8
1.5 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....	10
1.6 HIPÓTESIS.....	10
1.7 OBJETIVOS.....	11
1.7.1 Objetivo General	11
1.7.2 Objetivos Específicos.....	11
1.8 Alcance y limitaciones.....	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Ecología urbana.....	12
2.1.1 El Espacio arquitectónico urbano	15
2.2 Asoleamiento	17
2.2.1 Factor de vista de cielo	19
2.3 Uso de agua en plantas adaptadas al clima desértico-árido	21
2.3.1 Evapotranspiración.	24
2.4 Especies vegetales adaptadas.....	27
2.5 Balance Radiativo.....	32
2.5.1 Balance de energía.....	33
2.5.2 Comportamiento térmico de superficies verdes verticales.....	33
2.5.3 Flujo de calor en Superficies Verdes Verticales.	37
2.5.4 Fachadas de doble piel.....	39
2.6 Pruebas estadísticas de datos.....	41

2.6.1 Prueba de diferencia de medias, ANOVAS.....	41
2.6.2 Prueba de rango múltiple Duncan	42
2.7 Normas aplicables a las Superficies Verdes Verticales	43
2.8 Normas para instrumentos de medición	50
2.8.1 Termopar Tipo K.....	50
2.8.2 Sensores de Flujo de Calor HSF-3.....	51
2.8.3 Sonda de temperatura y humedad relativa HMP-45C.....	51
2.8.4 Radiómetro neto NR-01	51
2.8.5 Cámara Termográfica FLIR T620	52
CAPITULO 3. METODOLOGÍA	53
3.1 Contexto urbano	53
3.1.1 Clima en Mexicali	53
3.1.2 Análisis Urbano	54
3.1.4 Zonificación urbana.....	56
3.2 Características del Sistema de SVV	58
3.2.1 Sitio de análisis.....	58
3.3 Periodo de Estudio	59
3.4 Diseño de SVV	59
3.4.1 Anteproyecto	59
3.5 Condiciones del sitio estudio.	60
3.5.1 Factor Vista de Cielo	60
3.5.2 Asoleamiento	61
3.5.3 Variables climáticas.....	62
3.5.4 Mediciones de flujo de calor.....	63
3.6 Vegetación	64
3.6.1 Selección de Vegetación	64
3.6.2 Fisonomía.....	64
3.6.3 Estrés hídrico.....	65
3.7. Flujos de calor internos del edificio	65
3.7.1 Calor antropogénico	65
3.7.2 Equipo de oficina.....	66
3.7.3 Comportamiento térmico edificio	66

3.8 Análisis estadístico	66
3.9 Cámara termográfica	67
CAPITULO 4. RESULTADOS	68
4.1 Factores externos.....	68
4.1.1 Temperatura del aire	68
4.1.2 Caracterización de vientos predominantes	71
4.1.3 Radiación solar global	74
4.2 Análisis Urbano	76
4.2.1 Sitio de análisis.....	80
4.2.2 Periodo de estudio	81
4.2.3 Microclima en sitio.....	82
4.2.3.1 Balance radiativo.....	82
4.2.3.2 Incidencia de radiación solar en el muro	83
4.2.3.3 Temperatura del aire	87
4.2.3.4 Humedad Relativa	88
4.3 Vegetación	89
4.3.1 Selección de vegetación.....	89
4.3.3 Fisonomía especie	91
4.3.4 Estrés hídrico.....	93
4.4 Campaña 1	95
4.4.1 Gráficas de probabilidad normal.....	95
4.4.2 Análisis gráfico de variables	96
4.4.3 Diferencia de medias	99
4.4.4 Gráficas de cajas y bigotes	99
4.4.5 ANOVAS.....	101
4.5 Campaña 2	101
4.5.1 Gráficas de probabilidad normal.....	102
4.5.2 Gráficas	103
4.5.3 Gráficas de cajas y bigotes	106
4.5.4 ANOVA	107
4.6. Campaña 3	108
4.6.1 Gráficas de probabilidad normal.....	108

4.6.2 Gráficas	110
4.6.3 Gráficas de cajas y bigotes	114
4.6.4 ANOVA	115
4.7. Implicaciones energéticas y emisiones de GEI.....	116
4.8. Cámara termográfica.	120
CAPITULO 5. DISCUSIÓN	124
5.1. Variables climáticas y su relación en el sitio	124
5.1.1 Orientación de edificación.	124
5.3 Vegetación implementada.....	126
5.4 Comparación con estudio de Perini.	126
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	128
7. REFERENCIAS.....	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen satelital NDVI, elaboración propia en Arcgis, imagen Landsat, 2018.	4
Figura 2. Escuela en Al-Ain (Haggag, 2014)	9
Figura 3. Adaptación Uso de Suelos, Mexicali (IMIP, 2018)	55
Figura 4. Sitio de estudio, Mexicali	56
Figura 5. Puntos de toma de datos	56
Figura 6. Tesorería, Vicerrectoría Mexicali	58
Figura 7. Biblioteca, Campus Cs. de la salud	58
Figura 8. Acceso Unidad Deportiva	58
Figura 9. FVC Sitio experimentación	60
Figura 10. Asoleamiento Sitio	61
Figura 11. HMP-45C Campbell en SVV	62
Figura 12. Sitio de experimentación	62
Figura 13. Diagrama de sección de muro, colocación de instrumentación en sitio de experimentación, s/e	63
Figura 14. Plano Edificio de Tesorería, UABC	66
Figura 15. Rosa de vientos para el periodo de verano en Mexicali. Datos promedio horario Inst. de Ingeniera 2000-2016	71
Figura 16. Rosa de vientos invierno Mexicali, datos promedio horario Inst. de ingeniería	72
Figura 17. Mapa IMIP, 2015. Modificación de plano de uso de suelo, Mexicali	76
Figura 18. Ficha de zonificación parcial climática local (LCZ)	77
Figura 19. Mapa zonificación parcial climática	78
Figura 20. Vista de Cielo, Sitio	78
Figura 21. Asoleamiento en sitio experimental	79
Figura 22. Edificio Tesorería, UABC Campus Central	80
Figura 23. Ejemplo de recolección de hojas, Bugambilea sp	91
Figura 24. Fotografía térmica Sitio Experimentación 12:00h	120
Figura 25. Fotografía térmica sitio experimental 14:00h	121
Figura 26. Fotografía térmica sitio experimental 17:00h	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Antecedentes de aplicación de SVV	8
Tabla 2. Consideraciones asociadas LCZ Stewart & Oke, 2012	57
Tabla 3. Temperatura del aire promedio diario 2001-2016	68
Tabla 4. Clasificación parcial climática	77
Tabla 5. Periodo de estudio, campaña 1	81
Tabla 6. Periodo de estudio, campaña 2	81
Tabla 7. Periodo de estudio, campaña 3	81
Tabla 8. Proporciones entre MT/Rad Vert y SVV/Rad Vert	87
Tabla 9. Diferencia promedio 2001-2016 vs 2017	90
Tabla 10. Fisionomía de las especies	92
Tabla 11. Estructura de suelos de SVV	93
Tabla 12. Diferencia de medias por grupo SVV-MT, Campaña 1	101
Tabla 13. Diferencia de medias por grupo SVV-MT, Campaña 2	107

Tabla 14. Diferencia de medias por grupo SVV-MT, Campaña 3	115
Tabla 15. Resultados del análisis energético – Campaña 1	116
Tabla 16. Tabla de CO ₂ eq. para Campaña 1	117
Tabla 17. Resultados de análisis energético – Campaña 2	117
Tabla 18. Resultados de análisis energético, Campaña 3	118
Tabla 19. Equivalentes de kWh a GEI, Campaña 3	119
Tabla 20. Datos comparativos entre termopares, sensores de flujo y cámara termográfica en promedios horarios (Datos del 29 de Agosto 2019)	122
Tabla 21. Comparación de resultados vs Perini et al. (2011)	126

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Consumo de energía eléctrica por usuario residencial	4
Gráfica 2. Temperatura del aire promedio mensual 2001-2016	68
Gráfica 3. Histograma de Temp del aire	70
Gráfica 4. Probabilidad normal de Temp Aire	70
Gráfica 5. Cajas y bigotes de Temp Aire	70
Gráfica 6. Histograma de Dir. Viento	73
Gráfica 7. Probabilidad normal Dir. Viento	73
Gráfica 8. Cajas y bigotes Dir. Viento	73
Gráfica 9. Histograma de Vel. viento	73
Gráfica 10. Probabilidad normal Vel. viento	73
Gráfica 11. Cajas y bigotes Velocidad de viento	73
Gráfica 12. Gráfica radiación solar global promedio / promedio máximo mensual 2000-2016	74
Gráfica 13. Histograma Rad Global	75
Gráfica 14. Probabilidad normal Rad Global	75
Gráfica 15. Cajas y bigotes Rad Global	75
Gráfica 16. Histograma de Rad Global Máx	75
Gráfica 17. Probabilidad normal Rad Global Máx	75
Gráfica 18. Cajas y bigotes Rad Global Máx	75
Gráfica 19. Balance radiativo, promedio horario – Campaña 1 (verano 2018)	82
Gráfica 20. Balance radiativo, promedio horario – Campaña 3 (Verano 2019)	83
Gráfica 21. Radiación Global (W/m ²) y Radiación Vertical (W/m ²) – Campaña 1 (verano 2018).....	84
Gráfica 22. Radiación Global (W/m ²) y Radiación Vertical (W/m ²) – Campaña 3 (verano 2019)	85
Gráfica 23. Comparación Radiación Vertical/MT/SVV – Campaña 1	86
Gráfica 24. Comparación Radiación Vertical/MT/SVV – Campaña 3	86
Gráfica 25. Temperaturas del aire – Campaña 1	88
Gráfica 26. Promedio horario humedad relativa – Campaña 1	89
Gráfica 27. Diagrama de movimiento de agua, programa de simulación Chemflo 2000	94
Gráfica 28. Probabilidad normal Temperatura de superficie	95
Gráfica 29. Probabilidad normal Temperatura del aire	95
Gráfica 30. Probabilidad normal Flujo	95

Gráfica 31. Probabilidad normal Humedad Relativa	95
Gráfica 32. Promedio de Temperatura de superficie – Campaña 1	96
Gráfica 33. Promedio de Flujo de calor, Radiación global y Radiación vertical – Campaña 1	97
Gráfica 34. Promedio de Temperatura del aire – Campaña 1	98
Gráfica 35. Promedio humedad relativa – Campaña 1	99
Gráfica 36. Cajas y bigotes Temperatura Superficie	100
Gráfica 37. Cajas y bigotes Temperatura de aire	100
Gráfica 38. Cajas y bigotes Flujo	100
Gráfica 39. Cajas y bigotes Humedad Relativa	100
Gráfica 40. Probabilidad normal Temperatura del aire	102
Gráfica 41. Probabilidad normal Temperatura Superficie	102
Gráfica 42. Probabilidad normal Humedad Relativa	102
Gráfica 43. Probabilidad normal Flujo	102
Gráfica 44. Promedio de Temperatura superficie – Campaña 2	103
Gráfica 45. Promedio flujos de calor – Campaña 2	103
Gráfica 46. Promedio de Temperatura del aire – Campaña 2	104
Gráfica 47. Promedio de humedad relativa – Campaña 2	105
Gráfica 48. Cajas y bigotes Temperatura superficie	106
Gráfica 49. Cajas y bigotes Temperatura de aire	106
Gráfica 50. Cajas y bigotes Flujo	106
Gráfica 51. Cajas y bigotes Humedad Relativa	106
Gráfica 52. Probabilidad normal Temperatura Superficie	108
Gráfica 53. Probabilidad normal Temperatura de aire	108
Gráfica 54. Probabilidad normal Humedad Relativa	108
Gráfica 55. Probabilidad normal Flujo	109
Gráfica 56. Promedio Temperatura superficie – Campaña 3	110
Gráfica 57. Promedio de flujo de calor, Radiación Global y Radiación Vertical – Campaña 3	111
Gráfica 58. Promedio de flujo de calor con elemento arquitectónico – Campaña 3	112
Gráfica 59. Promedio temperatura de aire – Campaña 3	113
Gráfica 60. Promedio humedad relativa – Campaña 3	113
Gráfica 61. Cajas y bigotes Temperatura superficie	114
Gráfica 62. Cajas y bigotes Temperatura de aire	114
Gráfica 63. Cajas y bigotes Humedad Relativa	114
Gráfica 64. Cajas y bigotes Flujo	114
Gráfica 65. Comparación de datos promedios horarios de Flujo de calor, Temperatura de superficie con termopares, Temperatura superficie cámara térmica	123
Gráfica 66. Comparación Temperatura de superficie/Temperatura del aire/ Flujo de calor	125

RESUMEN

En Mexicali, una ciudad situada en la parte noroeste del desierto de Sonora, el clima, la alta urbanización; así como la falta de áreas verdes presentan problemas entre sí, lo que propician microclimas de poco confort térmico y altos consumos eléctricos.

Para ayudar a resolver estos problemas se propone en el documento, el uso de superficies verdes verticales (SVV), particularmente en el proyecto se utilizó *Bugambileas* sp, su selección se da gracias a las características fisiológicas (floreamiento en verano, perenne, tamaño de la especie, etc) y su adaptabilidad al tipo de clima. Las SVV son un sistema pasivo de aislamiento térmico, que mitiga la transferencia de calor en los muros exteriores de las edificaciones, ya que en principio se encuentran expuestos a la radiación solar debido a su orientación en sitio.

Al colocar las SVV frente a las superficies expuestas a la radiación, gracias a la sombra que se crea con el follaje y al espacio entre la vegetación y la superficie del muro, se crea un efecto de convección suficiente para disminuir el flujo de calor hacia el muro.

Se colocó un módulo contenedor con vegetación frente a una fachada oeste, donde la exposición a la radiación en un horario crítico en verano (12:00 – 18:00) es directa. Con el uso de instrumentación, como lo son termopares tipo k, sensores de flujo HSF-3 OMEGA, entre otros, fue posible conocer y comparar el uso de este sistema de vegetación contra un muro sin protección.

En el estudio, se demuestra que con el uso de este sistema es posible reducir el flujo de calor que entra a una superficie expuesta en orientación oeste en el hemisferio norte (Latitud: 32.6469, Longitud: -115.446 32° 38' 49") en un 49%. Lo que contribuye al ahorro de consumo eléctrico correspondiente a 1375.3 kWh/año y además disminuye la cantidad de 972 kg de CO₂ equivalente, emitido por el uso de aire acondicionado para el confort de los espacios interiores.

CAPITULO 1. PRELIMINARES

En este capítulo, se colocan los aspectos preliminares del proyecto de investigación con la intención de que se presenten las pautas y razonamiento que se llevaron a cabo para la conclusión del trabajo.

1.1 INTRODUCCIÓN

Las superficies verdes verticales (SVV) aparecen por primera vez en la historia en Babilonia, conocidas mundialmente por ser jardines flotantes. En los últimos años han sido introducidos como la solución para la reincorporación de áreas verdes en las zonas urbanas.

Existen muchas definiciones para una superficie verde vertical, así como nombres, tales como: muros vivos, muros verdes, jardines verticales, por mencionar algunos. *Patrick Blanc (2008)* botánico francés es el primero en implementarlos y los define como "aquella vegetación dispuesta de manera vertical, capaz de sobrevivir en condiciones controladas"; otros como *Manso y Castro Gómez (2015)* la definen como "término común que se le da a la vegetación que crece en una superficie vertical". O bien, como lo hacen *Alarcón, Buraglia y Triana (2007)* como un "conjunto de plantas que se agrupa en formas geométricas ubicadas sobre un elemento vertical, donde es posible manipular su naturaleza gracias a la tecnología de riego". Para efectos de este trabajo se tomará la clasificación realizada por *Manso y Castro-Gómez (2015)*, quienes los han clasificados en dos principales:

- Fachadas verdes: Aquellas que son a través de especies trepadoras.
- Paredes vivas: Aquellas que utilizan especies que se adaptan con facilidad a pequeños espacios.

Estas clasificaciones a su vez tienen más ramificaciones que dependerán del tipo de construcción (materiales y estructura), el método de riego (por goteo, gravedad e hidropónico) y los materiales que se utilizan en los contenedores (plástico, fieltro, malla, etc.).

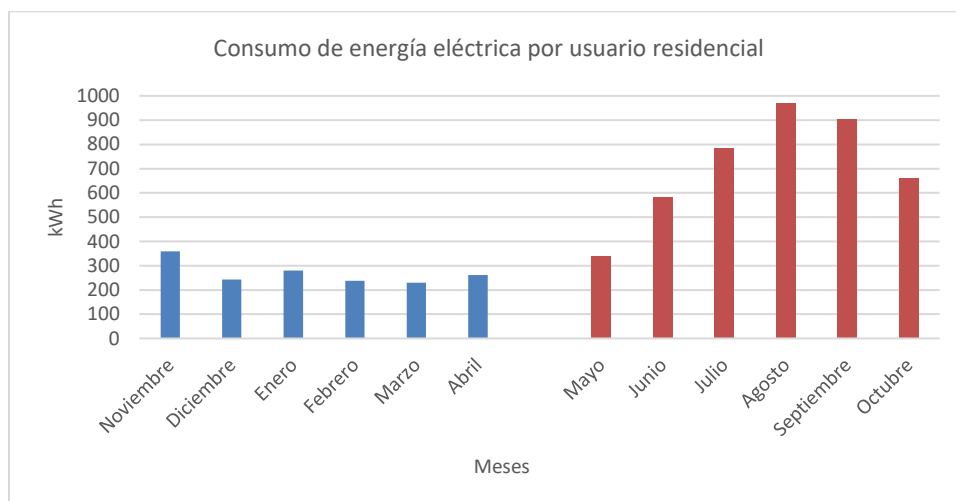
La arquitectura sustentable ha recurrido a su uso para fines de adaptación bioclimática, pero sobre todo estético. Siendo una solución viable por la falta de espacio en los centros urbanos, donde existe poca área verde en proporción con el área de materiales pétreos como lo es el concreto. Normalmente las empresas desarrolladoras de estos sistemas procuran venderlos como la solución a los problemas de consumo energético, debido a que en algunos estudios como los realizados por *Perini, Ottelé, Fraaij, Haas & Raiteri (2011)*, *Shi, Yan, Zou & Tao (2016)*, *Wong & Baldwin (2016)*, entre otros, se ha demostrado su gran efectividad.

Además de ello, los beneficios de las áreas verdes se agrupan en tres: sociales, ambientales y económicos (*Peña, 2011*). Las áreas verdes rinden una valiosa contribución para mejorar el clima urbano, debido a que el proceso de evapotranspiración en las plantas ayuda a refrescar el aire y de la misma manera la superficie de las hojas forma una protección natural contra el sol y el calor (*Grub, 1986*), es decir, que actúan como reguladores térmicos. Esto provoca una baja en la demanda de sistema de aire acondicionado, dando como resultado un ahorro de energía. Además, pueden aportar algunas soluciones sociales, pueden considerarse espacios positivos, lugares donde se desarrollan actividades que resuelven problemas y contribuyen a generar y mantener nuevos espacios naturales (*Moreno, 2008*).

Sin embargo, la efectividad de las SVV depende de muchos factores y no únicamente del proyecto, como pretenden las empresas desarrolladoras imponer. Desde el material de construcción, mantenimiento, especies vegetales, orientación y muchas otras características que se desglosarán en el presente documento.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El entendimiento básico del clima y de las condiciones locales juegan un papel preponderante en la evaluación energética de una edificación (Galindo, 2012). Mexicali, es una ciudad que se encuentra en una zona árida al noroeste de México. Sus condiciones climáticas son extremas al encontrarse en una zona desértica. Donde el consumo eléctrico es 45% mayor durante verano que en invierno (gráfica 1), derivado del uso de climatización artificial (Galindo, 2012).



Gráfica 1. Consumo de energía eléctrica por usuario residencial (Galindo, 2012).

Mexicali se encuentra rodeada de una gran zona agrícola, como se aprecia en la figura 1, la superficie agrícola representa el 43.8% (INEGI, 2007), donde la superficie de vegetación es mayor a la de construcciones.

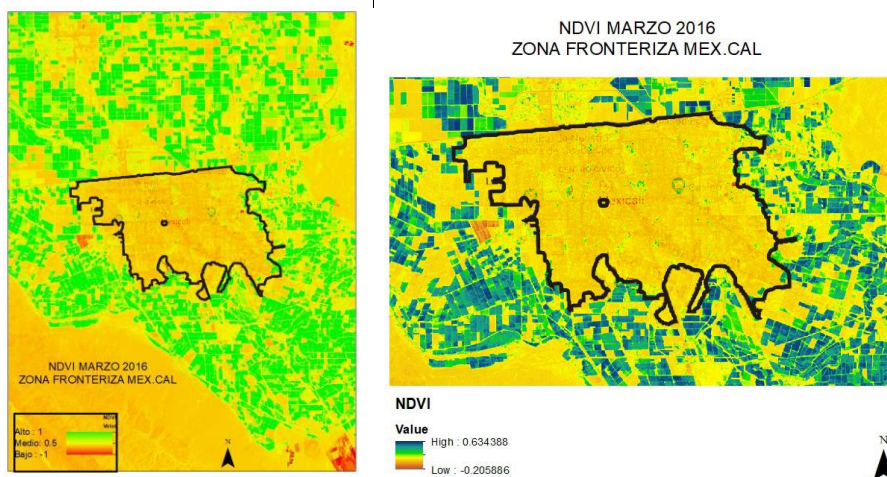


Figura 1. Imagen satelital NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), elaboración propia en Arcgis, imagen Lantsat, 2016.

A diferencia de su valle, la ciudad es una zona escasa de áreas verdes en la que se tiene una proporción de solo 7.74% del 53.87% que se encuentra destinado para ello (PDUCP 2025, 2005). Lo anterior, es solo de las áreas verdes horizontales, existen otras áreas verdes como son las verticales (enredaderas, muros vivos, etc.) y las que se desarrollan en techos verdes, que no se consideran por no tener un registro claro sobre su existencia, por lo que, se puede concluir que la ciudad cuenta con una gran área de oportunidad en comparación con ciudades mayormente urbanizadas, como en el caso de CDMX, Guadalajara y Monterrey.

Particularmente, las superficies verdes verticales pueden compensar parcialmente la pérdida de áreas verdes al incorporarse sobre las superficies impermeables, es decir, aquellas donde el suelo natural se cambió por materiales constructivos (concreto, adoquín, pavimentos), al contribuir a un aumento de la vegetación a nivel urbano (*Brenneisen, 2005, 2006*). Con base en esto, se infiere que los muros no requieren mayor espacio en la superficie construida, puesto que disponen de elementos arquitectónicos ya existentes, como lo son las fachadas.

Dado que las temperaturas del aire en la ciudad son típicamente mayores que en los alrededores de las zonas rurales, se presenta un fenómeno descrito como la isla de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés) (*Arnfield, & Grimmond, 1998; Oke, 1982*). Un estudio realizado por *García-Cueto, Jauregui, Toudert & Tejeda-Martínez (2007)* demostró que en la ciudad de Mexicali existe una isla de calor urbano que se da con mayor intensidad en las temporadas de transición con una diferencia de temperaturas promedio de 4.5°C en otoño y 4.2 °C en primavera.

Las UHI ocurren en todas las áreas urbanas, este fenómeno se mide en la capa de dosel urbano (1 – 2 m sobre el suelo), donde el aire es típicamente más cálido; la principal causa de la UHI son el cambio de cobertura de suelo, porque de ser suelos naturales y con vegetación, pasan a ser suelos secos e impermeables, también el calor antropogénico y el efecto de invernadero lo promueven (*Stewart & Oke, 2012*).

Ciudades donde las áreas verdes son parte fundamental de su estructura, han demostrado una mejor respuesta en contra de la isla de calor, como lo es la ciudad de Letchworth, en Inglaterra, con un 51.8% de área verde. En 1928 con la ideología de Ciudades-Jardín desarrollada por *Howard (1902)* donde se estructura a la ciudad como un modelo pre-urbano culturista, donde el autor fomenta hacer una mezcla entre área urbana y áreas verdes, que hasta hoy sigue funcionando.

En una edificación, sus superficies exteriores (verticales: sur y oeste; horizontal: techo) son las más sensibles al calor por asoleamiento, ya que desde el punto de vista energético, presentan un gasto superior a los 900 W/m², aspecto por el cual, almacenan considerablemente el calor (*Kreider & Rabl, 1994*). Esto provoca que en lugares como

Mexicali, donde la radiación solar presenta valores mayores a 900 W/m², mientras que temperatura de aire llega a promedios máximos de 42.1 °C en verano, lo que provoca incremento en el consumo de energía eléctrica, dando como resultado elevados costos y aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero derivado del uso de aire acondicionado para mantener un confort térmico en los espacios interiores, si se compara con el resto de las ciudades dentro del mismo Estado, el consumo eléctrico en Mexicali es mayor.

Por una parte, en estudios anteriores como los de *Pérez, Rincón, Vila, González & Cabeza (2011)* en Lleida, España, *Djedjig, Bozonnet & Belardi (2016)* en La Rochelle, Francia; *Rossi et al. (2015)* en Atenas, Grecia han demostrado que un (5-30%) de la radiación solar pasa al interior de las edificaciones por medio de sus fachadas (*Perini et al., 2011*). Dicho fenómeno depende de la orientación de estas, pero principalmente aquellas orientadas al Sur y Oeste que son las que reciben mayor cantidad de radiación solar, al estar expuestas una cantidad mayor de horas que las orientadas al Norte y Este.

Los jardines pueden ser los amplificadores de la señal ecológica (*Battle, 2011*). Lo "lógico" con relación al paisaje es "ecológico" y a su vez "bonito" (*Battle, 2011*), con este pensamiento se intenta retornar la vegetación a la vida cotidiana, de tal manera que se considere como algo normal el tener lo "verde" en cada rincón.

Para mejorar la comprensión de los servicios ecológicos proporcionados por las superficies verdes y cómo se pueden optimizar, se necesita obtener una mejor comprensión de la relación entre la variabilidad del medio ambiente espacial y temporal en las superficies verdes verticales (SVV) y las respuestas de diferentes especies de plantas (*Buckland-Nicks, Heim & Lundholm, 2016*).

1.3 JUSTIFICACIÓN

Las áreas verdes sin importar su localización pueden ser los amplificadores de la señal ecológica, por medio de la vegetación al ser productores de alimentos o al menos moderadores del microclima (*Battle, 2011*).

Las SVV son una de las más antiguas y conocidas técnicas para reducir los efectos negativos de la urbanización y han sido reconocidas como una de las estrategias que mitigan las islas de calor urbano (*Berardi & Ghaffarian, 2014*). Debido a la protección solar, contribuyen a disminuir el consumo de energía de edificios, mientras que, a través de procesos de calor latente, disminuye la temperatura de la superficie de los techos y reduce la liberación de calor sensible a la atmósfera (*Karachalioua, Santamouris & Pangalou, 2015*).

Estudios como los realizados por Elgizawy (*2016*), demuestran que la vegetación urbana puede desempeñar un papel importante en el desarrollo urbano sostenible y reducir las islas de calor urbanas (*Bowler et al., 2010; Gago et al., 2013; Perini et al., 2011*).

La vegetación dispuesta en superficies verticales absorbe parte de la radiación solar (18%) y disminuye la temperatura de las superficies (*Manso & Castro-Gomes, 2015*). Dependiendo de las condiciones climáticas externas, por ejemplo Flores, Filippin & Lesino (*2015*) redujo 10 °C la temperatura de superficie de muro en su experimento, ubicado en La Salta, Argentina. Ellos simularon las condiciones del exterior utilizando el programa EnergyPlus, comprobando que al cubrir una superficie (en su caso vidrio) con vegetación se consigue bajar la temperatura. Gracias a la sombra proporcionada por la vegetación se impide que exista una incidencia solar directa.

El empleo de vegetación para el sombreado de las superficies donde se reciben los rayos del sol favorece el ahorro de energía eléctrica en un 26% (*Perini et al., 2017*), ya que disminuye la carga térmica en las habitaciones (*Galindo, 2012*). Al comportarse como una barrera que absorbe la radiación, debido al follaje, solo un mínimo porcentaje (alrededor del 40%) pasa hacia la superficie del muro (*Flores et al., 2015*).

En otros países, como el caso de Al Ain (*Haggag, Hassan & Elmasry, 2014*) y Abu Dabhi (*Afshari, 2014*) en Emiratos Árabes, con climas similares al de Mexicali, el uso de superficies verdes verticales ha sido probado para reducir el consumo energético con éxito. Han recurrido al uso de plantas nativas, pero también inducidas. El resultado se da, gracias al sombreado que provoca el follaje de la vegetación utilizada.

El proceso de evapotranspiración de las plantas requiere energía, favoreciendo el llamado "enfriamiento evaporativo" (2450 J por cada gramo de agua evaporada), resultando en una disminución de las temperaturas en todo el edificio (*Pérez et al., 2011*).

1.4 ANTECEDENTES

A partir de 2008, cuando el botánico francés Patrick Blanc patentó la bolsa de fieltro que se utiliza comúnmente en la implementación de jardines verticales, ha surgido un gran auge de ellos. Desde entonces se han estudiado en diferentes sitios con diferentes climas los beneficios que traen se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Antecedentes de aplicación de SVV

Lugar	Sitio	Autor	Año	Clima (Köppen-Geiger)
Hong Kong	Edificio departamentos	Wong	2016	Tropical (Cwa)
Atenas	Escuela	Vijayaraghavan	2016	Sub-tropical (Csa)
Portugal	Escuela	Manso & Castro Gómes	2016	Mediterráneo (Csa)
Holanda	Gobierno	Perini	2011	Continental húmedo
Shangai	Escuela	Yang	2018	Sub-tropical (Cfa)
Bari, Italia	Módulos	Vox	2018	Mediterráneo (Csa)
Genoa, Italia	Gobierno	Perini	2018	Mediterráneo (Csa)
España	Local Comercial	Pérez	2011	Mediterráneo (BSk)
Al Ain, Arabia	Escuela	Haggag	2014	Desértico (BWh)
Indonesia	Comercial	Othman	2014	Tropical (Af)
Inglaterra	Escuela	Cameron	2014	Mediterráneo (Cfb)
China	Módulos	Chen	2013	Tropical (Cfa)
Abu Dabi	Módulos	Afshari	2017	Desértico (BWh)
Italia		Mazalli	2013	Mediterráneo (Csa)
Chile	Módulos	Victorero	2015	Semiárido (Csc)

Como es posible visualizar, la mayoría de casos analizados se ubican en sitios de climas húmedos, donde la vegetación no tiene ningún problema de adaptación y las temperaturas no son mayores a los 30 °C.

Para visualizar un antecedente con características similares a las que se cuenta en la región bajo estudio, se muestra lo realizado en la ciudad de Al-Ain localizada en los

Emiratos Árabes Unidos; la ciudad de Al-Ain se localiza geográficamente en 24° 26' latitud norte, 55° 36' de longitud Este, y una altitud de 292 msnm. La ciudad tiene un clima cálido seco y presenta temperaturas mínimas de 35 °C a máximos de **50 °C** en **verano** y mínimas de 25 °C a máximos de **35 °C** durante **invierno**.

El experimento (Haggag, Hassan & Elmasry, 2014) se realizó en las instalaciones de una escuela primaria (figura 2), donde se seleccionaron dos aulas de clases con características físicas idénticas y en una misma orientación. Las aulas tienen una planta cuadrada de 5 m de largo, por 7 m de ancho y una altura de 3.5 m. La construcción está realizada a base de block de concreto de 8" con un emplaste de estuco por ambos lados del muro de 2 cm.

A una de estas aulas se le colocó un sistema de jardín vertical con una orientación hacia el este. Compuesto con un sistema modular de caja, donde se colocaban las especies vegetales en una bolsa de geotextil, el autor no hace mención de la especie vegetal implementadas. Contaba además, con un sistema de riego por goteo, donde aprovechaban para colocar los nutrientes necesarios para la supervivencia de las especies.

El experimento contempló principalmente la medición de 4 variables, que son:

- Temperatura ambiental a 1 m del muro.
- Temperatura de superficie externa del muro.
- Temperatura de superficie interna del muro.
- Temperatura de aire interior a 1 m del muro.



Figura 2. Escuela en Al-Ain (Haggag, 2014)

La medición se realizó durante los meses de Julio a Agosto del 2012 (verano), y se observó una reducción del efecto por transferencia de calor de los muros expuestos. Se realizó una comparación de temperatura interna de las aulas. En aquella donde se colocó el jardín vertical hubo una reducción de hasta 6 °C durante el día y 2 °C durante la noche, en verano, lo que da como resultado un ahorro de energía, debido a que se redujo el consumo energético de 1.35 MWh a 1.07 MWh, es decir, un 20.5%.

1.5 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

¿Son las superficies verticales verdes capaces de mitigar la carga térmica en las edificaciones en clima desértico-árido?

¿Cuál es el impacto energético, económico y ambiental del uso de superficies verticales verdes en clima desértico-árido, en muros a base de block de concreto?

1.6 HIPÓTESIS

Con el diseño adecuado a las condiciones bioclimáticas, una SVV adaptada debe ser capaz de reducir la carga térmica en una edificación que, por ende, reducirá el consumo energético, resultando en una menor cantidad de CO₂ (dióxido de carbono) emitido a la atmósfera por el uso de A/C.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General

Evaluar una SVV en su capacidad de mitigación de carga térmica en un edificio a base de concreto ubicado en una ciudad de clima seco-árido.

1.7.2 Objetivos Específicos

- Construir un prototipo de SVV con las especificaciones resultantes de la investigación teórica.
- Medir in situ y analizar las variables temperatura de superficie, temperatura de aire, humedad relativa y flujo de calor.
- Comparar resultados entre el prototipo de SVV y un sitio testigo sin SVV.
- Calcular el ahorro energético y las emisiones de CO₂ equivalentes que se dejan de emitir derivados del uso de una SVV.

1.8 Alcance y limitaciones

El estudio está considerado para proyectos en clima árido-seco, desarrollado en muros de orientación oeste, en consideraciones de un alto nivel de urbanización, es decir, suelos no naturales, edificaciones circundantes a base de concreto, escasa vegetación (menor a 3%). Además de una tipología particular de especie vegetal, particularmente arbustos trepadores perenne no mayores de 3 m, en específico Bugambileas.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se recapitula los elementos teóricos literarios en los que se basa el proyecto de investigación.

2.1 Ecología urbana

El término "urbano" nace durante el movimiento de la Arquitectura Moderna, en la década de los años 20's, a pesar de que la humanidad ya tenía miles de años ocupando la superficie terrestre. Después de la primera guerra mundial, para rescatar las ciudades europeas destruidas por los bombardeos, los arquitectos de este movimiento rediseñaron las ciudades y se enfocaron en cubrir las necesidades básicas, sobre todo de movilidad y de residencia adecuada, aspectos de los que carecían las grandes ciudades, resultado de su crecimiento acelerado. Aunque no existe una definición concreta del término, se considera que proviene de la combinación de raíces latina/griega *Urbe, Polis y Civitas* que denotan la idea de ciudad (García D. , 1974).

Posteriormente los pioneros de la arquitectura moderna pugnaron la industrialización de la construcción urbana, los objetivos de las tendencias dominantes en la arquitectura están marcados por el alejamiento gradual de la naturaleza (Ley, 2011). Las ciudades pasaron de estar insertadas en la naturaleza a ser lo que hoy conocemos coloquialmente como "la jungla de concreto" (Childers et al., 2014). Donde la proporción de áreas verdes son prácticamente nulas y hay una predominante cantidad de áreas construidas con concreto (Burder, 1990).

Los vecindarios, durante el movimiento moderno, fueron diseñados como composiciones funcionales, de abundantes espacios abiertos, bloques con redes internas de transportación (Sharifi, 2016), dando lugar a la función y dejando de lado las características únicas de la composición (Ley, 2011; Liu, He, Zhou & Wu, 2014). Las urbes tienden a perder sus particularidades y se convierten en una serie de patrones de diseño rítmico que utilizan materiales comunes sin importar el lugar en el planeta donde se emplacen (Childers et al., 2014).

Se debe considerar la geomorfología superficial del paisaje la cual dictamina la mejor distribución de infraestructura (Childers et al. , 2014). La misma naturaleza dota de los materiales adecuados para la construcción en sitio, pero la vida moderna, ha dejado de lado ese aspecto, gracias a los beneficios que ha encontrado la humanidad en la industrialización (Palacios, 2006).

Después del crecimiento acelerado de la segunda mitad del siglo XX, en 2010, la ocupación urbana global estaba cercana al 3% de la superficie terrestre, entre 0.7 a 0.9 millones de km², de la cual, Norteamérica tiene un 0.8 a 0.9% (Liu et al, 2014), pero tienen un tremendo impacto ambiental, desde pérdidas de áreas verdes naturales (400 ha/año), sobreexplotación de ríos (decremento del 21.7%), entre otros. (Dewan & Yamaguchi, 2009).

Reportes de Naciones Unidas, más del 50% del mundo vive en ciudades; se espera un incremento del 66% para el 2050 (*Victorero et al., 2015*). En México, hasta el 2010, el país contaba con 135 urbes (*CONAPO, 2012*) y una densidad de población de 57.3 hab/km² (*INEGI, 2017*). Por lo que tiene una ocupación urbana de 1.3 millones de km² de los 5.1 millones de km² de extensión territorial. Es decir, en México la ocupación urbana es del 25.5%, por arriba del porcentaje que autores como *Liu et al. (2014)* señalan.

Los niveles de urbanización en México son muy inferiores comparados con países europeos o Estados Unidos, donde los factores individuales o sociales que inciden en la actividad humana señalan un brusco incremento en la urbanización que propician un desarrollo descontrolado, carente de servicios urbanos y una ausencia del concepto de seguridad en las políticas de desarrollo urbano (*García, 2012*). Es decir, que nuestros centros urbanos no se encuentran bien planificados y además causan el mismo daño o quizá mayor que los que son a conciencia planificados y desarrollados.

Las comunidades urbanas, adicionalmente a lo anterior, son vulnerables a los impactos negativos del cambio climático (*Thornbush, Golubchikov & Bouzarovski, 2013*), derivado del cambio de suelo que ocurre en ellas o de eventos atmosféricos a mayor escala, que inciden sobre las ciudades, como olas de calor, tormentas invernales e inundaciones, entre otros. La mayor parte de las ciudades tienen menos del 10% de su área total destinada como espacio verde (*Qiuyu, Baofeng, & Xiaohu, 2013*). La carencia de espacios verdes se presenta como una circunstancia del deterioro ambiental (*Ley, 2011*) y del desarrollo de urbanización sin control. Al restarle importancia a las áreas verdes, estamos cortando en un principio con círculos de vida de muchas especies, que habitaban en las superficies que modificamos para uso urbano (*Espin, 2013*). Adicionalmente, se contribuye a otros impactos ambientales, como la reducción en el manto freático (*Coras, 2006*) y aumento de CO₂ (*Amaya et al. 2018*), entre otros.

Las ciudades son importantes generadores de emisiones de dióxido de carbono, por ejemplo, las ciudades latinoamericanas tienen mayores emisiones de carbono per cápita, comparadas con ciudades europeas (*Thornbush et al., 2013*). En respuesta a una gran cantidad de variantes, desde la cantidad de emisiones proveniente del uso de automóviles derivado de la mala infraestructura de movilidad urbana, hasta las malas costumbres consumistas que rigen a la población (*Espin, 2013*).

Las ciudades de América Latina pueden no ser capaces de adoptar la modernización ecológica como un marco adecuado para abordar sus problemas ambientales debido al énfasis en el cambio industrial y tecnológico que pasa por alto el contexto social y político de un cambio ecológico (*Thornbush et al., 2013*). La mayor parte de los países en América Latina tienen una economía dependiente de la industria, por lo que no cuentan con legislaciones adecuadas para la protección de sus recursos naturales (*Victorero et al., 2015*).

En el trascurso de la historia, han existido movimientos a favor de la conservación de los recursos naturales, sobre todo por la inserción de las áreas verdes en las ciudades, algunos de ellos se mencionan a continuación. La ecología urbana como disciplina contribuye a la sustentabilidad de las ciudades (*Childers et al., 2014*). La idea de sustentabilidad hace referencia a la planeación de las ciudades a través del quehacer multidisciplinario, enfatizando la inclusión social, institucional, construcción y los componentes biofísicos de los ecosistemas urbanos (*Burder, 1990*).

La sustentabilidad es un proceso que no tiene metas aisladas, sino transversales (*Childers et al., 2014*). Es decir, no es algo que se dedique solo para conseguir un objetivo en específico, sino que se busca generar una tipología de vida con ello. La iniciativa de vecindarios sustentables puede ser retomada como una continuación de las tendencias de planeación y diseño urbano en la búsqueda de soluciones habitables y amigables con el medio ambiente (*Sharifi, 2016*).

El concepto de ambiente sustentable ha sido frecuentemente usado y difundido durante las tres pasadas décadas desde la aparición del reporte Brundtland (*Sharifi, 2016*). El primero que sugirió la inserción de la naturaleza fue *Howard (1909)* al desarrollar el concepto de dos ciudades jardines piloto en el área suburbana de Londres: Letchworth and Welwyn (*Sharifi, 2016*). Ciudades que existen hasta hoy en día y conservan la idea de Howard donde el humano puede vivir en conjunto de la naturaleza y proveerse de esta misma (*Burder, 1990*).

En Japón se desarrolló un movimiento basado en las ideas de Howard denominado Den'en toshi. Estas ciudades fueron planeadas con un alto componente residencial y comercial, sin embargo, a diferencia del proyecto inglés estas ciudades no eran autosuficientes (*Sharifi, 2016*).

Al surgir el movimiento denominado Nuevo Urbanismo en 1979, aprovechó el incremento de la clase media y los problemas de los vecindarios para hacer cambios sociales y físicos en el diseño. Según los principios de los diseños sustentables, las edificaciones deben cumplir con ciertas funciones ecológicas, además de proveer hábitat a los usuarios, deben responder al movimiento del sol, purificar el aire circundante y reutilizar el agua (*Raghd, El-Shimy & Raghd, 2016*). Este movimiento desarrolló principios comunes que tomaban en consideración desde los automóviles, el usuario, así como el ambiente.

Estos proyectos intentan adoptar y aprovechar los problemas comunales, generaliza soluciones físicas e identifica características divergentes sociales, culturales y económicas (*Sharifi, 2016*). Proyectos complejos de ciudades sustentables se han concebido con esta ideología, que visualiza el comportamiento urbano como un solo ente y lo divide en tres importantes principios:

- Ambiental: En ello, hace consideraciones desde el uso de recursos para el desarrollo comunal hasta la producción de desechos y su disposición.
- Económico: Propone el uso de suelo mixto para compactar los recorridos de movilización, pero también habla de generar sus propios recursos dentro de la ciudad, para reducir la huella de carbono.
- Social: Incluir a la comunidad en la consciencia ecológica y el buen uso de los recursos es la clave para la sustentabilidad.

Las ciudades son los microcosmos del cambio ambiental global y ofrecen oportunidades para el enriquecimiento de la ecología (*Thornbush et al, 2013*). Fomentar cambios en la conducta de la población ayudaría al mejoramiento de la ecología. Actualmente las políticas climáticas como la mitigación y la adecuación, son consideradas partes integrales de una estrategia urbana comprensible (*Thornbush et al., 2013*).

2.1.1 El Espacio arquitectónico urbano

El diseño urbano sigue siendo un campo amplio para tratar, ya que cubre una amplia gama de escalas y aspectos. Visto en estos términos, el diseño urbano puede abarcar pequeños detalles del paisaje urbano, la tipología de los edificios, distribución de áreas verdes y actividades, redes de infraestructuras e incluso ciudades enteras (*Rauber & Kaftka, 2018*).

Kevin Lynch (2008), menciona que las ciudades son el resultado de superposiciones de imágenes individuales del usuario, por lo que cada sección estaría compuesta de muchas de ellas, pero conforme el usuario recorre y reconoce estas adquieren sentido en un conjunto.

El espacio urbano en la arquitectura se divide en 4 elementos definidores, de tal manera que ellos están presentes en todas las ciudades y en algunos casos dan identidad única y distintiva a la misma. Por lo que él mismo *Lynch (2008)* propone los siguientes elementos:

- Sendas: Definidas como los conductos, las sendas constituyen las líneas de comunicaciones y transporte dentro de la ciudad. Se refiere a todo elemento urbano que pueda llevar a un usuario de un punto A a un punto B.
- Bordes: Constituyen los límites entre dos fases, los bordes son el espacio transitorio existente entre el espacio público y privado, pero también definen el alcance de algunos espacios, ya sea por otro espacio transitorio (un vestíbulo) o un elemento arquitectónico (un muro, un cerco, etc.).
- Barrios: son secciones de tamaño “grande” dentro de la ciudad. Generalmente definido por su tipo de uso de suelo, aunque estén a su vez divididos por los dos anteriores.
- Nodos: Son los puntos estratégicos de una ciudad, mejor conocidos como puntos de referencia, si bien, regularmente no se trata de un espacio habitable, es más bien un

elemento fácil de reconocer y que el usuario es capaz de ubicarlo sin importar el punto donde se encuentre de la ciudad.

Las ciudades y los usuarios cambian, un ejemplo claro son las sendas, durante siglos, las sendas representaban un espacio público habitable, pero hoy, en las ciudades modernas, solo son un medio de paso (*Alexander, 1977*).

Por lo que, *Alexander (1977)* propone otro elemento adicional, el centro. El centro, es el encargado de soportar y dar identidad a las propiedades simétricas de las ciudades. Mientras que *Rauber & Krafta (2018)* creen que la configuración se da a través de un sinnúmero de centros que focalizan en elementos claves como lo son: las calles y la forma de los edificios.

Si comparamos las tres teorías, podemos resumir que lo más práctico para describir el espacio urbano es a través de la configuración de calles (o sendas) y barrios (o centros), que en una ciudad se intentan agrupar por tipología de uso de suelo.

2.2 Asoleamiento

El Sol es el centro de nuestro sistema solar. La distancia media de la tierra al sol es de 1.50×10^8 km (Monteith & Unsworth, 1973). La vida en la Tierra depende en gran medida de la energía que nos aporta. Prácticamente toda la energía que produce variación y movimiento en la atmosfera viene a nosotros del Sol como radiación (Olgay, 1957).

La energía luminosa del sol al transformarse en energía química por la fotosíntesis vegetal, permite directa o indirectamente satisfacer las necesidades del funcionamiento de los organismos vivos (Ley, 2011), que a su vez alimentan a otros organismos en un proceso de cadena trófica para satisfacer las necesidades básicas del mundo.

La energía que llega desde el Sol, no solo es aprovechada por la vegetación. A través de la historia, la humanidad siempre ha considerado y usado los recursos naturales locales, tanto como dar forma a las edificaciones hasta para el desarrollo de herramientas (Murgul, Vatin & Zayats, 2015).

Civilizaciones antiguas, como la Sumeria o los Mesopotámicos utilizaban sus conocimientos sobre la simetría solar para su aplicación en la vida cotidiana (Kittler & Darula, 2013). Después, algunos griegos como Gnomático, Erátostenes y Cleomedes aprovecharon las proyecciones de las sombras de los objetos para generar instrumentos básicos para la vida, como el reloj solar. Así como el romano Vitrubio, en su escrito "Los 10 libros de la Arquitectura" en el Capítulo VII (Alba, 2004), menciona de la importancia de conocer los equinoccios de primavera y otoño debido a que por medio de la proyección de sombras es posible conocer la latitud y longitud de un lugar.

En cualquier punto de la superficie de la Tierra, el ángulo entre la dirección del Sol y el eje vertical depende de la latitud del sitio, y de la hora del día (Monteith et al., 1973). La fecha en la que existen declinaciones más pronunciadas entre el Sol y la Tierra son llamadas solsticios; en el hemisferio Norte el de invierno en diciembre 21, aproximadamente, los de primavera y otoño alrededor de 21 de marzo y 21 de septiembre respectivamente, y el de verano el 21 de junio (Olgay, 1957).

Las aportaciones de energía debido a la radiación solar, requieren datos del lugar específico, ya que, dependiendo de las características geográficas, de localización e incluso de emplazamiento puede variar en cada sitio. Por ejemplo, en la ciudad de Santiago de Chile, los niveles de radiación durante verano pueden llegar a 1000 W/m^2 (Victorero et al., 2015).

En el mundo de la urbanización, la arquitectura debe ser capaz de responder al clima y al medio ambiente, debido a que su diseño resulta significativo para las condiciones de confort (Philokyprou, Michael, Malaktou & Savvides, 2017). Los datos climáticos, tales como temperatura de aire, humedad relativa y precipitación son las guías para el apropiado diseño de edificaciones, por ejemplo, la orientación del edificio determinará la cantidad

de radiación que recibe (*Raghd et al., 2016*), así como el tamaño de sus ventanas la cantidad de luz y ventilación dentro de la misma. La arquitectura de cada lugar (vernáculo) por lo general recurre a utilizar ciertos elementos arquitectónicos para su adaptación climática, desde techos en dos aguas, pórticos, entre otros.

En el caso particular del asoleamiento, por ejemplo, los pueblos de la Nueva España desarrollaron un diseño de trazo urbano, para aprovechar en invierno la insolación y lograr que ésta entrara en las casas para calentar los espacios mientras que en verano utilizaban las sombras provocadas por las mismas para proteger los callejones de la radiación directa que ocurre de 9 am a 3 pm. Este efecto era aprovechado sobre todo en el centro de las ciudades y las áreas comerciales (*Murgul et al., 2015*).

El aprovechamiento del clima ayuda a potencializar la utilidad de los elementos arquitectónicos, no solo como simples objetos de la estética de la edificación, sino como protector de los agentes climáticos, a su vez, dan firmeza a la construcción, tal es el ejemplo del muro (*USDE, 1981*).

Los muros son parte esencial del ambiente urbano. Se han convertido en el paisaje escénico de la vida comunal, dominan la experimentación sensorial y el campo del dialogo entre el análisis pragmático y la interpretación sensorial (*Olgay, 1957*). En ocasiones es a través de ellos que se puede tener una idea de cómo es un barrio, desde sus dimensiones y su mantenimiento.

Al estar siempre expuestos a los agentes exteriores, los muros son los que reciben y almacenan la radiación solar, pero también dependerá de las características de los materiales con los que están realizados (*Raghd et al., 2016*), resultante de la facilidad con la que algunos materiales absorben o retrasan la transferencia de calor.

Las fachadas convencionales de las edificaciones no están diseñadas para la adaptación optima de su contexto (*López, Rubio, Martín & Croxford, 2017*), refiriendo esto a los materiales comerciales (generalmente acero, concreto y vidrio) utilizados en la comunidad, provocando problemas que implican la creación de otros elementos o adaptaciones, que generan un costo adicional a los usuarios.

Los muros son un filtro entre las condiciones externas e internas (*Olgay, 1957*). Por lo que brindan protección a los espacios y al usuario mismo. Algunas superficies de los muros están más expuestas que otras, debido a su orientación. Por lo que, es normal que, en el hemisferio norte, los muros orientados al sur y al oeste se encuentren expuestos a la radiación solar la mayor parte del día; esta exposición es nombrada periodo de sobrecalentamiento.

El periodo de sobrecalentamiento (overheated) se da durante el transcurso del día cuando los rayos del sol son "molestos", es decir, no pueden ser evitados; este momento

se presenta aproximadamente en un horario de 12 pm a 3 pm. Por lo que, durante este periodo de tiempo, la insolación tiende a ser más directa (USDE, 1981).

Es durante el mismo periodo que el efecto de sombreado es necesario, para conseguir espacios habitables, ya que 60% del total de calor solar es acumulado durante un periodo de 4.3 horas durante el día (Olgay, 1957). Como se mencionó anteriormente, los muros sur y oeste (hemisferio norte) son los que por efecto de sobrecalentamiento acumulan calor, que pasará por conducción a los espacios interiores, elevando la temperatura del espacio y obligando a los usuarios a recurrir a métodos de enfriamiento mecánico.

2.2.1 Factor de vista de cielo

El paisaje del cañón urbano se considera importante para mejorar la temperatura del medio ambiente y se ha convertido en un tema clave de investigación en arquitectura del paisaje (Li, Ren & Zhan, 2019). Considerando al Factor Vista de Cielo (SVF, por sus siglas en inglés) como el índice de regulación para la morfología del paisaje urbano. El SVF es esencial para describir la climatología urbana en escalas menores a 100 m (Dirksen, Ronda, Theeuwes & Pagani, 2019). El SVF sirve para analizar la incidencia solar en la geometría del cañón urbano (Polo-López et al., 2016).

Estudios previos (Chen et al., 2012; Oke, 1982) mostraron que existe una clara relación entre la morfología urbana, la radiación solar local y la temperatura del aire, donde el SVF juega un rol clave (De Moraes et al., 2018). Los asentamientos urbanos densos y compactos proporcionan un complejo entorno, donde la disponibilidad de luz solar tiene implicaciones en el microclima urbano (Polo-López et al., 2016).

El SVF puede ser calculado de diferentes maneras, una de ellas es utilizando fotos “fish eye” (Gál et al., 2007; Middel et al., 2018), método que se recomienda cuando se analizan espacios pequeños (menores a 100 m²). El SVF es importante para determinar el balance de radiación superficial (Theeuwes et al., 2017; Zeng et al., 2018). El cielo puede estar cubierto de relieves importantes o vegetación (que varía de una estación a otra), desde elementos de mobiliario urbano y también por nuevos edificios. Los SVF se pueden usar también para indicar la contribución ó ausencia de radiación solar (Polo-López et al., 2016).

La radiación de onda corta dentro de un terreno abierto llega a la superficie sin ser bloqueado, mientras que, dentro de un terreno más complejo, la radiación de onda larga es absorbido o reflejado por la superficie (Dirksen, et al., 2019). El SVF describe el impacto del patrón espacial del cañón urbano en su entorno físico, desde la perspectiva de la transferencia de energía, y es un importante indicador cuantitativo que describe la forma geométrica de una ciudad (Li et al., 2019).

El SVF no tiene una magnitud de medición, sino que es medido por valores que pueden ir de 0 (sin obstáculos) a 1 (cobertura total), o bien, en porcentaje de cobertura (Polo-López et al., 2016). Resultados bajos en SVF derivado de la densidad de la vegetación o la

proximidad de las edificaciones indican efecto de enfriamiento, a consecuencia del bloqueo de radiación hacia la superficie y la ventilación natural (*Zhan et al., 2019*).

2.3 Uso de agua en plantas adaptadas al clima desértico-árido

El agua es un recurso vital para el planeta. Es un líquido incoloro, inodoro e insípido, esencial para la vida (*Snoeyink, 1990*); ocupa la tercera parte de la Tierra. Sin embargo, no está distribuido de manera equitativa, dependerá de la localización geográfica de cada lugar (*Castañón, 2000*). Todos requerimos de este vital líquido, para realizar desde actividades básicas de convivencia, como limpiar y bañarse, hasta el desarrollo de la industria (*Ley, 2011*).

Una cuarta parte del planeta es desierto (*Tohyama, 1995*). Por lo que su cantidad de agua es inferior que en otras partes del mundo. Sin tomar en cuenta los factores climáticos; los humanos decidieron establecerse en ellos. Los desiertos se localizan en dos rangos de latitudes, al norte y al sur del ecuador, entre 20 y 30 grados (*Tohyama, 1995*). A pesar de eso, algunas condiciones geográficas permiten generar vida, como lo es alrededor de los ríos.

El desierto consiste de piedras, grava y arena, pero no son los únicos componentes, también existe fauna y flora que puede sobrevivir a grandes periodos de aridez, y también se presenta una densa población humana (*Tohyama, 1995*). La ciudad de Mexicali, es un ejemplo de ello.

En una tierra, donde en teoría no está poblada por organismos vivos, las aguas naturales formadas por las interacciones agua-aire-tierra fluirían de nuevo hasta el océano llevando los diversos constituyentes disueltos (*Snoeyink, 1990*). Es de esta manera como los sedimentos que provenientes de la parte alta del Río Colorado son arrastrados y depositados en la región del valle de Mexicali. Esto hace que el contenido de nuestro suelo sea rico en minerales, a pesar de ser un desierto. Gracias a ello, la agricultura en la zona Sur de Estados Unidos y Norte de México, específicamente el Valle Imperial y el Valle de Mexicali, ha sido tan prolifera. Surgiendo de estas actividades hasta nuevas ciudades, que después transformarían su actividad de agrícola a industrial (*Walther, 2000*).

El promedio anual de precipitación mundial es de alrededor de 740 mm (*Tohyama, 1995*). Baja California tiene solo 200 mm de lluvia anualmente (*INEGI, 2019*). Según el *INIFAP, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (2003)* el promedio de precipitación pluvial en Mexicali es de 72 mm, comparando el dato con el promedio mundial, la ciudad se encuentra por debajo del promedio, por lo que el riego por temporal es una opción poco viable para la sobrevivencia de especies adaptadas. A pesar de ello, Mexicali tiene características únicas para el desarrollo de la agricultura (*Tohyama, 1995*).

Durante la precipitación pluvial, el agua cae sobre la superficie de la tierra y establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo; se llevan a cabo reacciones químicas que modifican aún más la composición del agua (*Snoeyink, 1990*). De manera natural, el suelo debería servir como un filtro que ayudara a limpiar los componentes ácidos del agua

(Kolmans & Vásquez, 1999), sin embargo; en las ciudades que presentan alta contaminación y la poca cantidad de áreas verdes el agua se encuentra muy acidificada por lo que difícilmente el suelo logra filtrar tantos elementos ácidos (Valles, 2008).

La vegetación nativa depende de la cantidad de lluvia de la zona donde se localiza, en los desiertos el rango de lluvia es de 25 mm o menos, estos lugares tienen un promedio de 3 gramos de herbáceas y 70 gramos de arbustos enanos por m² (Tohyama, 1995).

El rango de evaporación es especialmente alto en los trópicos, a diferencia de los lugares donde la incidencia solar es fuerte, como en el desierto donde la evaporación potencial es de 3 m por año; el aire templado sube, resultante de la evaporación en los trópicos, a la atmósfera se enfría rápidamente, y regresa a la superficie como un chubasco. La masa de aire seco que queda después de las lluvias en los trópicos se convierte en un frente de alta presión que desciende alrededor de la latitud 30°. Resultando en un alza de la temperatura, reduciendo la humedad relativa y evitando que llueva (Tohyama, 1995), este fenómeno favorece que los desiertos se asienten en esta latitud.

La composición de la superficie terrestre y el grado de actividad biológica, así como su naturaleza varían de un lugar a otro, se puede esperar que de estas reacciones se produzcan aguas de muy diversas composiciones (Snoeyink, 1990). Los desiertos tienen importantes recursos que permiten el crecimiento de la vegetación, uno de ellos es la radiación solar (Villagra et al., 2011). Esto permite a los cultivos una mejor producción gracias a que la fotosíntesis aprovecha la radiación para la transformación química de los elementos en el suelo en azúcares y ser aprovechados para la planta (Tohyama, 1995).

La cantidad del agua tiene una importancia primordial en las condiciones del riego, depende de las sustancias disueltas o en suspensión, ya que nunca se dispone de agua completamente pura (Castañón, 2000). Su composición química, dependerá del origen de la misma y de la estructura del suelo.

A pesar de que aparentemente el suelo se encuentra con una alta cantidad de minerales, la textura de suelo en los desiertos, complica su absorción a las raíces, por lo que muchas veces el agua se queda de manera superficial y no es aprovechada por la vegetación (Kolmans & Vásquez, 1999). Los suelos arcillosos, por ejemplo, retienen el agua de manera superficial (Villagra et al., 2011). Mientras las arenas, permiten el paso libre del agua, lo que favorece su filtración, pero esto impide que las plantas puedan aprovechar los nutrientes del suelo (Tohyama, 1995).

Apropiadamente controlado, la arena puede ser tan fértil como cualquier suelo (Tohyama, 1995). El control está basado no en el suelo sino en el riego, el cual, con cantidades controladas y horarios de disposición favorece un crecimiento en la vegetación.

Las plantas tienen diferente demanda de agua; por eso es necesario no mezclar plantas con alta demanda con plantas de baja demanda (Minke, 2012). Un sistema de irrigación implementado por Perini, Bazzocchi, Croci, Magliocco & Cattaneo (2017) utilizó un aproximado de 2.51 l/m² por día. La cantidad de agua se mide bajo la demanda de la especie, pero también el clima influye en ello.

El agua en la vegetación solo es necesaria en las raíces. En los climas cálidos, la irrigación es más efectiva cuando se utiliza riego profundo, ya que es una manera eficiente de ahorrar agua, de esta forma la irrigación es precisa y controlable (Tohyama, 1995). Al colocar el agua solo en las raíces, se evita el efecto de evaporación superficial y se controla mejor su cantidad que cuando se realiza por inundación (Villagra et al., 2011). Pero la gran cantidad de variables que influyen en la distribución del agua y su asimilación por las plantas es sometido a su entorno climático variable (Castañón, 2000).

El tipo de riego mencionado, permite que los niveles de humedad en las raíces sean adecuados, la USDA (United State Department of Agriculture, 1972) recomienda que la humedad en las raíces debe ser de al menos el 40%. Las raíces de las plantas no son capaces de absorber la humedad contenida en el suelo, pero es necesaria para la absorción bajo presión osmótica y atracción capilar interna (Kolmans & Vásquez, 1999). La presión osmótica es el principio por el cual el agua con poco contenido de sal fluye hacia el agua con mayor contenido de sales, este principio es el mismo por el cual las células absorben nutrientes y agua (Tohyama, 1995). Es la manera en la que las plantas absorben los nutrientes necesarios para lograr su supervivencia.

El agua es un bien caro y escaso (Castañón, 2000), sobre todo en los desiertos, donde la precipitación es muy baja, por lo que se depende de las cuencas existentes en las cercanías (Tohyama, 1995). En regiones de alto consumo, como en el caso de las zonas agrícolas, los avances tecnológicos de todo tipo ofrecen técnicas, aparatos o sistemas muy sofisticados, tratando de resolver los problemas que se pueden presentar en un riego eficiente (Angaleeswari et al, 2019).

Es necesario hacer una adecuada selección del sistema de riego, tomando en cuenta múltiples variables que influyen en el tipo, la frecuencia y la cantidad de agua que se suministrará a las especies vegetales.

El riego por aspersión y el riego localizado, permiten un mejor control de sus condiciones, llegando a reducir el papel del suelo a mero soporte estructural de las plantas (Castañón, 2000). Debido a que se focaliza la humedad en un área pequeña y existen menores pérdidas por escurrimientos, lo que se traduce a un mejor rendimiento del sistema y menor consumo de agua (Tohyama, 1995).

2.3.1 Evapotranspiración.

La evaporación representa el paso del estado líquido al estado de vapor (*Castañón, 2000*). Es un proceso muy sutil y poco perceptible al ojo humano. En cambio, la transpiración es un fenómeno físico de evaporación del agua de los organismos hacia la atmósfera. Por lo que, se entiende por evapotranspiración a la combinación de ambos procesos donde el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y otra parte mediante transpiración de la planta (*Allen, Smith, Perrier & Pereira, 1994*).

Aunque no es un fenómeno universal, si está presente en muchos niveles de la cadena trófica. En las plantas, por ejemplo, se produce en las hojas, la mayor parte se efectúa a través de las estomas en la parte inferior de las hojas no expuestas a los rayos solares, aunque también se produce a través de la cutícula. La transpiración representa aproximadamente un 60% de la evaporación (*Castañón, 2000*).

Para cambiar el estado de las moléculas de agua líquida a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esa energía (*Hernández & Santana, 2008*). La transpiración foliar depende de la demanda evaporativa de la atmósfera, que está en función de la humedad relativa del aire, de la temperatura ambiente y del viento (*Castañón, 2000*). Es decir, a mayor temperatura, menor humedad, que dará como resultado una mayor demanda de transpiración. Por lo que, la evapotranspiración es una extracción de agua importante en el balance hídrico, particularmente en regiones áridas y semiáridas (*Walker, García & Venturini, 2019*).

La absorción de agua no se puede separar de la transpiración: permite a la planta obtener en el suelo el agua que necesita para dicha transpiración (*Castañón, 2000*). Por lo que es necesario se encuentre, sin importar el clima, con un porcentaje óptimo de humedad el suelo y no someter a la planta a un estrés hídrico. El Departamento de Agricultura de Estados Unidos (*USDA, 1972*) recomienda que el nivel de humedad en el suelo no sea menor en un 40%, en la zona de las raíces, lo anterior, garantizará la sobrevivencia de las especies vegetales.

El desarrollo de las plantas está ligado a una circulación de agua, la mayor parte se usa para transpirar y para transportar los elementos nutritivos extraídos del suelo, una pequeña parte se almacena en ella, menos del 1% del volumen absorbido por las raíces es utilizado en la fotosíntesis (*Castañón, 2000*). Por lo que el agua, es más bien el conducto por el cual las plantas llevan los nutrientes a todo su sistema (*Harris & Dines, 1998*).

El movimiento del agua en la planta según *Castañón (2000)* se efectúa de dos formas: difusión y convección.

El flujo por difusión es debido a la respuesta a diferentes gradientes en el potencial del agua, que consta de los conocidos componentes de presión, gravitatorio y osmótico; a lo largo de las paredes de las células el agua se mueve, por convección, la difusión

predomina en el transporte entre células, a través de las membranas, en los tejidos vivos (Villagra et al., 2011).

Esto es gracias al xilema, que es un sistema vascular relevante para el transporte del agua en la planta, además existen varios mecanismos, a micro y nano escala, entre los que se incluye el flujo de difusión que ayuda a las plantas a estabilizar el transporte de energía (Hong, Yan, Gao & Liu, 2018).

Existe una relación directa entre consumo hídrico por la planta, transpiración y producción de materia seca (Castañón, 2000). En consecuencia, interesa conocer la máxima cantidad de agua que puede absorber una planta, dependerá de:

- El camino recorrido por el agua en el suelo.
- Humedad del suelo.
- Cantidad de sales contenidas en el agua.

Para determinar la evapotranspiración de la vegetación, ésta se realiza midiendo en campo o estimándola matemáticamente. Para la medición se utilizan diferentes métodos, siendo los más empleados los micrometeorológicos; mientras que para la estimación utilizan el transporte de vapor de agua o el balance de energía, el más utilizado es el de Penman (Castañón, 2000).

La máxima cantidad de agua que un suelo puede contener es siempre limitada, una demanda atmosférica diurna que supere la cantidad de agua disponible para el cultivo provoca estrés hídrico (Castañón, 2000). La evaporación remueve cerca de 100 W/m^2 de calor, en promedio (Charoenkit & Yiemwattana, 2016). Sin embargo, esta liberación de energía dependerá de las condiciones climáticas y de la estructura del suelo del lugar.

El estrés hídrico está relacionado tanto a la planta como al suelo (Villagra et al., 2011), debido a las fuerzas de absorción de humedad de ambos donde por lo general, el suelo tiene una mayor fuerza matricial que las raíces por lo que el agua a ciertos niveles ya no es extraída por las plantas, y en ese caso extremo las plantas mueren (Tohyama, 1995).

Las plantas perennes suelen desarrollar mucho más su sistema radicular que las anuales. Esto es debido a sus condiciones físicas de siempre tener hojas, que da como resultado una mayor superficie de transpiración (USDA, 1972).

La evapotranspiración no es simple de medir. Para determinarla experimentalmente se requieren aparatos específicos y mediciones precisas de varios parámetros físicos (Kolmans & Vásquez, 1999). Los métodos experimentales de campo, son en general costosos, exigiendo precisión en las mediciones. Por otro lado, una gran cantidad de ecuaciones empíricas se han desarrollado para determinar la evapotranspiración del

cultivo de referencia utilizando datos meteorológicos, como en el caso de la ecuación de Penman-Monteith (ecuación 1) (Hernández & Santana, 2008).

$$E_o = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (\text{Ecuación 1})$$

En 1948, Penman combinó el balance energético con el método de la transferencia de masa y obtuvo una ecuación para calcular la evaporación de una superficie abierta (E_o) de agua a partir de datos climáticos estándar de insolación solar (horas sol), temperatura, humedad atmosférica y velocidad de viento. Este método fue desarrollado posteriormente y ampliado a las superficies cultivadas por medio de la introducción de factores de resistencia (R_n) implementados por Monteith (1990) al considerar que era necesario agregar los factores de vapor (E_a) tanto el real como el saturado.

2.4 Especies vegetales adaptadas

Las superficies verdes verticales son muros exteriores que cuentan con plantas en la cobertura, que pueden ser usados de manera estética y ecológica. El original concepto de vegetación vertical proviene de los jardines colgantes de Babilonia, donde eran utilizados para proveer sombra a las fachadas externas (Wong, 2016). Hoy en día, estos sistemas han proliferado, y existen diferentes técnicas para desarrollarlos.

La estrategia más recurrida en las ciudades para el manejo del medio ambiente es la naturaleza (Spilková & Vágner, 2016). El diseño del paisaje tiene un rol crucial en el juego de la ecología sustentable y promueve una solución para los problemas ambientales (Elgizawy, 2016). La inserción de vegetación a través de estos sistemas ayuda a colocar especies vegetales en lugares donde las dimensiones son limitadas o donde las superficies están cubiertas por materiales sólidos y poco permeables (Blanc, 2008).

Jardines al frente y patios ajardinados, pero sobre todo techos y fachadas ajardinadas, podrían mejorar decididamente el clima contaminado de las ciudades: el aire se purificaría, se reducirían variaciones de temperatura y porcentajes de humedad aumentarían (Minke, 2012).

La transformación de las viviendas residenciales, con tendencia de cada vez menores espacios han reducido el área verde destinado en las casas de un 12.3% a 9.5% (Spilková et al., 2016). Anterior a la década de los 60's, las casas tenían mayores extensiones de espacio, en los 80's con la llegada del Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (por sus siglas, INFONAVIT) las dimensiones de los terrenos cambiaron significativamente, reduciendo el espacio de estos y destinando solo una pequeña porción a espacio exterior (INEGI, 2017). Con el cambio de ritmo de vida, donde los automóviles requieren mayor espacio, es el espacio exterior el que se destina para ello, por lo que los jardines y áreas verdes se han reducido significativamente, o en algunos casos, hasta desaparecidos por completo.

Este fenómeno no es solo a nivel residencial, se da también a nivel urbano. Donde los espacios exteriores han pasado a ceder sus áreas a estacionamiento (mayoritariamente) u otro tipo de ocupación (Cristo-Cabo, 2016). Y se cambian las superficies naturales a superficies cubiertas. Resultado de ello, el grave problema de Islas de calor urbano (UHI, siglas en inglés). Las superficies verdes verticales tienen un significativo efecto en reducir las temperaturas en el cañón urbano (Sheweka & Mohamed, 2012).

Los sistemas de superficies verdes forman partes de estrategias sustentables de la rehabilitación urbana, estas superficies contribuyen a la inserción de la vegetación en el contexto urbano sin necesidad de recurrir a dimensiones amplias de ocupación espacial (Manso & Castro-Gomes, 2015). Este tipo de sistemas facilitan la inserción de vegetación, porque recurren a utilizar espacios remanentes de las edificaciones (Blanc, 2008).

Antes de colocar cualquier especie vegetal en uno de estos sistemas, existen algunas consideraciones que se deben tomar en cuenta (*Minke, 2012*). Las plantas son componentes de las fachadas que responden al medio ambiente en una forma complicada (*Flores et al., 2015*). Al tratarse de organismos vivos recurren a instintos básicos de adaptación climática, al igual que lo hacen los animales (*Blanc, 2008*). El estrés ambiental es el mayor factor limitante de la distribución de las plantas en el planeta, como consecuencia, las plantas desarrollan diferentes estrategias para adaptarse a los cambios (*Navarro-Reig, Tauler, Iriondo-Frías, Juamot, 2019*).

Se debe realizar una selección cuidadosa de vegetación, que dependerá de las condiciones particulares de la tipología del sistema de cobertura verde, las condiciones climáticas externas y las particularidades de la edificación (*Wong et al., 2016*). Consideraciones que responde mayormente a aspectos físico-biológicos del espécimen que estéticos, lo anterior, ayudará a garantizar la sobrevivencia de la especie que se trate y por lo tanto del sistema de superficie verde (*Blanc, 2008*).

Toda especie viva, no solo las plantas, recurre a métodos o instintos de adaptación climática, para garantizar la sobrevivencia (*Villagra et al., 2011*). A diferencia de los animales, las plantas al no poder moverse requieren desarrollar modificaciones físicas en su estructura biológica. Las plantas responden a estímulos externos, este mecanismo es llamado tropismo (*López et al., 2017*).

La adaptación de las especies es un proceso evolutivo, donde un organismo sufre cambios para vivir bajo condiciones diferentes a su hábitat regular y lograr establecerse en otros (*López et al., 2017*). A diferencia de las edificaciones, los organismos vivos, en este caso las plantas, responden al medio ambiente y se adaptan a los cambios de condiciones climáticas y de su entorno inmediato (*Villagra et al., 2011*). La relación existente entre el clima y la distribución de las especies vegetales en la Tierra, tiene una fuerte conexión para la selección de plantas (*López et al., 2017*). Al ser las plantas endémicas (ó nativas, según sea el caso) las mejor adaptadas para las condiciones del lugar (*Tohyama, 1995*). Sin embargo, en ocasiones por cuestiones de estética no son seleccionadas. Lo cual lleva al uso de plantas adaptadas, proveniente de otras regiones con diferente clima (*Blanc, 2008*).

Las plantas para adaptarse al clima donde la humedad es baja, como en el caso de los desiertos, transpiran para mantener un nivel de temperatura, dicha humedad proviene de sus hojas (*Villagra et al., 2011*), este proceso se conoce como evapotranspiración, el cual es el beneficio más importante de las fachadas verdes en áreas urbanas, el agua evaporada de la vegetación incrementa la humedad de 1 a 2 kg/m³ de aire seco (*Sheweka et al., 2012*). Es a través de estas características biológicas de la vegetación que se aprovecha para reducir la cantidad de calor que entra a las edificaciones (*Wong, 2016*). La vegetación xerófila (nativa ó adaptada) se caracteriza por el poco consumo de agua, esta

reducción de requerimiento de irrigación es importante, debido a que facilita el control del vital líquido, además estas especies tienen una mayor tolerancia al estrés del ambiente urbano (Benvenuti, 2016).

La radiación solar puede ser absorbida por la vegetación, lo cual afecta sus funciones biológicas (Tohyama, 1995). Considerables cantidades de radiación son utilizadas para los procesos de fotosíntesis, transpiración, evaporación y respiración (Perini et al., 2011).

La fotosíntesis, es el proceso por cual las plantas usan la energía de la luz solar y la transforman en azúcares utilizando agua y dióxido de carbono. La luz es absorbida por la clorofila en las hojas de las plantas, y al unirse con el agua la divide en hidrógeno y oxígeno; el hidrógeno es usado para convertir el dióxido de carbono en azúcar y almidón, entonces el oxígeno es regresado a la atmósfera (Tohyama, 1995). Por lo cual, la planta al absorber la radiación necesaria para su proceso de alimentación bloquea su paso hacia la superficie del muro expuesto, por lo tanto, el calor generado por dicha radiación, no pasará al espacio interior.

Este tipo de mecanismo deben ser considerado cuando se trata de desarrollar un sistema de superficie verde (Blanc, 2008). La evapotranspiración es un complejo fenómeno físico e interacciona entre un edificio y el clima urbano (Afshari, 2017). Aprovechar un fenómeno de comportamiento natural en la vegetación es conocido como Biomimética, la cual, es una disciplina que ha sido utilizada en varios campos de la ciencia, como la medicina, ingeniería y en la arquitectura. El término viene del griego *bios*, que significa "vida" y *mimesis*, que significa "imitar", por lo que Biomimética se define como "la abstracción del buen diseño proveniente de la naturaleza" (López et al., 2017). Que es el principio de este tipo de sistemas de superficies verdes. Dicha disciplina, permitiría conocer el nivel de adaptabilidad de las especies y utilizarlas como una solución natural de sombreado para las fachadas expuestas de las edificaciones (López et al., 2017). Las plantas utilizadas deben cumplir ciertas características, al igual que el muro debe contar con una estructura capaz de soportarlas, además de un suelo apropiado y un sistema de riego (Othman & Sahidin, 2016), y así, garantizar la sobrevivencia de la planta y del sistema mismo.

El primer factor a considerar es, la región climática, donde se desarrollará el sistema (Minke, 2012). Los lugares donde el clima propicia el crecimiento vegetal, tienen la facilidad de tener una mayor cantidad de vegetación en la selección, debido a que tendrán una gama amplia, que irá desde flores y pequeñas especies (menores a 60 cm) a arbustos (Blanc, 2008). Por ejemplo, las plantas herbáceas y los arbustos enanos son las especies más comunes en la vegetación desértica (Tohyama, 1995). El conocimiento de requerimiento de la especie vegetal permitirá aprovechar el sistema y ajustarlo a las necesidades del cliente ó edificación (Perini et al., 2011).

La vegetación, como principal elemento de estos sistemas, depende de las condiciones climáticas, las características de construcción y las condiciones circundantes de la pared donde se insertará (*Manso et al., 2015*). Las superficies verdes verticales están basadas en la aplicación de plantas trepadoras (generalmente), estas plantas crecen con facilidad en superficies verticales (*Manso et al., 2015*) sin necesidad de soporte adicionales. Sin embargo, no son las únicas utilizadas en este tipo de elementos, también es posible utilizar plantas de pequeña especie, gracias al desarrollo de contenedores (*Blanc, 2008*).

Las plantas seleccionadas para las superficies deben cumplir apropiadamente varios parámetros para su colocación, como son la absorptividad de la hoja, dimensión foliar, índice foliar, coeficiente de atenuación de radiación y la conductancia estomática de las plantas (*Hunter et al., 2014*), esto para que no sufran alteraciones durante los cambios estacionales y modifiquen las condiciones del sistema de superficie verde (*Blanc, 2008*). Se deben considerar también otros factores, como el tamaño de los contenedores, la distancia entre cada planta, la cantidad de riego y mantenimiento (*Minke, 2012*).

Las plantas también reducen las variaciones de humedad. Particularmente cuando el aire está seco evaporan una considerable cantidad de agua y elevan así la humedad relativa del aire (*Minke, 2012*).

Las plantas de especie *cissus* ó trepadoras son consideradas muy agresivas, debido a la forma en cómo sus raíces se sostienen de los muros, complicando su mantenimiento y retiro (*Elgizawy, 2016*). Sin embargo, las enredaderas son especies que provocan una mayor cantidad de sombra sobre muros si se le compara con los arbustos (*Sheweka et al., 2012*). Por lo cual, su empleo en superficies verdes verticales se vuelve común. Es a través de elementos constructivos y mantenimiento adecuado que se pueden utilizar estas especies sin comprometer el estado adecuado de las edificaciones (*Blanc, 2008*).

Además de que las plantas trepadoras se utilizan para beneficios de la arquitectura, con el desarrollo de sistemas de soporte de contenedores, así como sistemas de riego para la vegetación que en general se encuentra bajo estas condiciones, permitió que especies de talla pequeña (menor a 60 cm) se puedan utilizar (*Blanc, 2008*).

La capacidad de las hojas para reflejar, absorber y transmitir radiación solar varía considerando tipología de especie, morfología y diferencias fisiológicas; además de factores como grosor de las hojas, edad de la planta, contenido de agua del suelo y textura superficial de la hoja (*Hunter et al., 2014*). Y por supuesto, todo aquello que corresponda a los componentes físicos de la edificación.

Las hojas son las responsables de la evapotranspiración (*Navarro et al., 2019*), como se menciona anteriormente, estos flujos se evalúan en el follaje utilizando un esquema de resistencia que se opone a la transferencia de calor y vapor que incorpora la resistencia

aerodinámica, la resistencia estomática, difusión de calor desde la superficie del suelo (Djedjig *et al.*, 2016). Es por eso, que el fenómeno es difícil de medir.

Las hojas son parte de las características que influyen de mayor manera en la mitigación de calor (Koyama, Yoshinaga, Hayashi, Maeda & Yamauchi, 2013), su índice de área superficial está alrededor 3.0 a 3.5 sin embargo, eso depende de la especie utilizada (Tohyama, 1995). Este índice es una variable adimensional en una escala que va de 0-100, que se define como el área total de una cara del tejido fotosintético por unidad de terreno (Aguirre-Salado *et al.*, 2011). En los lugares de clima cálido, las superficies foliares son menores, la mayoría de las plantas endémicas no presentan hojas, o bien, sus hojas son delgadas y pequeñas, al igual que aquellas que se adaptan al clima (Tohyama, 1995).

Pero no sólo la estructura de la planta juega un papel fundamental, sino también otros componentes, como lo es el suelo o sustrato (Minke, 2012). Sus propiedades físicas y químicas son críticas para el crecimiento adecuado de las plantas, influye en parámetros como el índice de crecimiento, el área de ocupación y la salud de la planta (Hunter, 2014).

La evolución y adaptación de los organismos vivos a su medio ambiente ocurre en tres principales formas (López *et al.*, 2017):

1. Morfológica o estructural: Relacionado con la particularidad física de cada especie.
2. Fisiológica o funcional. Relacionado con los procesos químicos de un organismo, y su respuesta individual a los estímulos externos en orden del mantenimiento homeostático.
3. Comportamiento. Relacionado a como un organismo actúa, es decir, las acciones que un organismo realiza para sobrevivir.

En la selección de plantas se debe tener en cuenta, que estas resistan las condiciones locales del clima, así como el sustrato y la proximidad con otras plantas (Minke, 2012).

2.5 Balance Radiativo

Se conoce como balance radiativo, al equilibrio que existe de la energía proveniente del Sol que entra y sale de la Tierra (*Antonio, 2010*). Los flujos de energía en la superficie de la Tierra determinan, en gran medida, las condiciones térmicas (*Gilgen & Ohmura, 1999*). Los cambios y variaciones de flujo entrante de energía, dependen no solo de la cantidad de radiación que llega, sino de la capacidad de absorción de esa radiación por los cuerpos situados antes del receptor final (*Eslava, 1993*).

Según el principio de la conservación de la energía, enunciada por primera vez en 1847 por James Prescott Joule, “la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma”. De toda la energía radiante que llega procedente del Sol, aproximadamente un 30% es reflejado al espacio (albedo), el 50% es absorbido por la superficie y el 20% restante es absorbido por la atmósfera (*Antonio, 2010*).

La energía emitida como radiación se transmite en forma de ondas electromagnéticas que pueden tener diferentes longitudes. La radiación solar es una emisión de ondas cortas, estas penetran en el suelo donde cambian sus características cualitativas y calientan la superficie, mientras que las ondas de longitudes mayores a 3 μm se consideran convencionalmente onda larga, como la radiación de la Tierra, con intensidades máximas de 10 $\text{W/m}^2\mu\text{m}$ (*Heuveldop et al., 1986*). El balance de radiación neta (ecuación 2) cercano a la superficie terrestre está representado por la suma algebraica de las componentes entrante y saliente de la radiación de onda corta y de onda larga (*García-Cueto et al., 2015*), que se formula en la ecuación 2:

$$Q^* = K \downarrow - K \uparrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde Q^* es la radiación neta (W/m^2), $K \downarrow$ representa la radiación entrante de onda corta, $K \uparrow$ es la radiación saliente de onda corta, $L \downarrow$ representa la radiación entrante de onda larga y por último $L \uparrow$ es la radiación saliente de onda larga (*García-Cueto et al., 2015*). Las fórmulas teóricas se derivan generalmente del espectro de emisión de los gases radiantes y solo se puede utilizar cuando se conocen los perfiles verticales de temperatura y humedad de la atmósfera, hasta una altura alrededor de los 7 km (*Ritter, De Garay & Ruiz, 1986*).

Todos los cuerpos que tienen una temperatura mayor a 0 °K emiten radiación, por lo que toda partícula contenida en la atmósfera, emite calor (longitud de onda larga) generándose así una radiación térmica que también se orienta hacia la tierra y se llama radiación atmosférica (*Heuveldop et al., 1986*).

Los estudios de radiación neta total en superficies naturales, representa la cantidad de energía disponible para los procesos fotosintéticos y de transferencia de calor latente, así como sensible (*Ritter, De Garay & Ruiz, 1986*). La radiación neta es una variable fundamental que determina el clima de las capas inferiores de la atmósfera y depende

de la física y la química de la atmósfera, así como la presencia de nubes (*Santillán-Soto et al., 2015*).

2.5.1 Balance de energía

Esta energía pasa por una serie de procesos y transformaciones en el interior del sistema climático que suele presentarse mediante un modelo de balance energético, el cual corresponde a la suma algebraica de 5 componentes, ecuación 3 (*Carmouze, 1991*):

1. El balance de radiación de onda corta (Q_s).
2. El balance de radiación de onda larga (Q_l).
3. Intercambio por procesos de conducción en masa (Q_l).
4. Intercambio por procesos de convección en la interface atmósfera-suelo (Q_c).
5. Intercambio por evaporación (Q_e).

$$Q_s + Q_t = Q_l + Q_c + Q_e \quad (\text{Ecuación 3})$$

El balance térmico está sujeto a las condiciones exteriores impuestas, es decir, la radiación solar y el estado atmosférico, en reacción por la respuesta térmica del medio mismo (*Carmouze, 1991*). Estas condiciones térmicas son las que afectan cada sitio, dependiendo de otras condiciones físicas y geográficas dan lugar a los diferentes tipos de clima (*Antonio, 2010*). Además de lo anterior, a nivel local existen otros factores que cambian las condiciones térmicas, las urbes son un gran reflejo de ello, causando el llamado “efecto de isla de calor urbana” (*Oke, 1982*). Para hablar de los mecanismos generales del clima, es necesario hablar de la transferencia de calor, de los cambios y variaciones del flujo entrante de energía y su almacenamiento, de la influencia de los factores climáticos en la producción o modificación de las propiedades o condiciones atmosféricas que definen al clima (*Eslava, 1993*).

La presencia de un núcleo urbano modifica el comportamiento de la atmósfera y de la capa límite atmosférica, desde el punto de vista dinámico (vientos) e higrotérmico (humedad y temperatura) (*Perico-Agudelo, 2009*). Los materiales con los que se construye y modifican las características físicas y químicas de los suelos, cambian sus propiedades térmicas y almacenan grandes cantidades de energía durante el día, liberándolas por la noche (*Dettwiller, 1970*).

Las características básicas del paisaje urbano son la heterogeneidad espacial de sus superficies, horizontales y verticales, diferencias que conducen a la no uniformidad de transmisión y distribución de radiación y energía (*García-Cueto et al., 2015*).

2.5.2 Comportamiento térmico de superficies verdes verticales.

La urbanización ha transformado drásticamente el medio natural, con la idea de facilitar el desarrollo de la vida comunitaria dentro de las ciudades. El medio ambiente habitable debe ser confortable para los humanos (*Tohyama, 1995*); sin embargo, en los lugares donde

el clima es árido, las superficies urbanas provocan el aumentando las temperaturas de aire y, por ende, la de los espacios interiores (*Perinni, 2011*).

Básicamente, hay cuatro mecanismos fundamentales (*Pérez et al., 2011*), que caracterizan a las superficies verdes como un sistema pasivo de ahorro de energía:

1. La intercepción de la radiación solar.
2. Sombreado producido por la vegetación.
3. El enfriamiento evaporativo que ocurre gracias a la evapotranspiración de las plantas y el sustrato.
4. La variación del efecto del viento sobre el edificio.

Los cerramientos exteriores transmiten por conducción, convección y radiación, importantes cantidades de calor al espacio interior de acuerdo con la latitud, orientación, estación del año y tipo de cerramiento (*Puppo et al, 1976*). Si bien, el techo es el que recibe de manera directa la radiación solar, los muros también se encuentran expuestos a ella (*Perinni, 2011*). A nivel comercial, existen productos que ayudan a reflejar un porcentaje de la radiación, esto con el uso del albedo de algunos colores (*Stewart & Oke, 2012*), sin embargo, estos productos solo se aplican en cubiertas.

La vegetación en los muros puede ser usada para reducir la temperatura del aire y superficie de las fachadas donde se encuentren instaladas, debido a que reducen las cargas de transferencia por calor conductivo (*Susorova, Angulo, Bahrami & Stephens, 2013*). A través del sombreado de las fachadas se puede alcanzar en los apartamentos una disminución de la temperatura de 2 °C (*Minke, 2012*) en climas del mediterráneo, ya que varía dependiendo de la zona climática.

Al ubicarse en una posición anterior a la superficie de los muros, la radiación directa llega primero a la planta, y solo una porción que no es ocupada por ella es la que llega al muro. Algunas especies trepadoras han demostrado tener un factor de transmisión de luz alrededor de los 15% a 41% (*Mazalli et al, 2013*), este factor se refiere a la cantidad de luz que pasa directo de la radiación solar al muro por medio del espacio sin cobertura en una SVV. Por lo que, comparado con un muro expuesto sin vegetación, la cantidad de radiación recibida es menor y, por ende, el calentamiento de la superficie deberá ser menor.

La sombra producida por la vegetación de manera natural tiene una demanda principalmente estética (*Olgyay, 1957*); sin embargo, con el adecuado cálculo para proyectarla sobre elementos arquitectónicos, puede ayudar a la mitigación de la radiación solar. La proporción de radiación solar absorbida por la vegetación se encuentra en un promedio de 46% (*Charoenkit et al. 2016*), pero dependerá de las características físicas de la planta, principalmente de la densidad del follaje.

Las superficies verdes provocan enfriamiento a través del sombreado y la evapotranspiración, factores que son importantes para la mitigación del efecto de Isla de Calor Urbana (Spilková et al., 2016). El factor de sombra se refiere a la fracción de incidencia de la radiación solar que se encuentra bloqueada por obstáculos (Pérez, 2011), en este caso por la vegetación. Como otras formas de infraestructura verdes, las SVV incrementan el albedo (reflexión de la radiación solar) proveyendo un aislante térmico natural (Hunter, 2014). Como resultado, la sombra que provoca la vegetación contribuye al ahorro energético, pero su magnitud depende del follaje (Sheweka, 2012; Köhler, 2007).

Estos mecanismos se dan de manera natural en cualquier región, por lo que, este tipo de superficies no requieren de sistemas adicionales para lograr el funcionamiento adecuado (Hunter, 2014). Sin embargo, las condiciones climáticas y geográficas modifican el comportamiento de las superficies, debido a que dictaminan el tipo de especie vegetal que es posible utilizar respecto a la orientación de la superficie verde (Minke, 2012). Es importante considerar que para una operación eficiente de estos sistemas se requiere conocer el comportamiento de las diferentes condiciones climáticas locales, porque los resultados finales varían dependiendo de la zona climática (Pérez, 2011).

Algunos estudios (Perini, 2011; Shi, 2016; Wong, 2016) reportan reducciones en la temperatura de superficie inmediata detrás de la vegetación de rangos que van de 1.9 a 8.3 °C, lo cual conlleva una reducción en el uso de energía (Susorova et al., 2013). La temperatura de los espacios interiores es reducida en un máximo de 1.1 °C, lo que significa que la temperatura de los espacios cubiertos por vegetación es 20% menor que el exterior (Qiuyu, Baofeng & Xiaohu, 2013).

En climas cálidos con períodos de baja humedad del aire, estos sistemas se pueden usar como enfriadores evaporativos naturales y obtener reducciones en la temperatura del aire (Sheweka, 2012). Esto se logra mediante un proceso de saturación adiabática evaporativa en el cual el SVV actúa como un intercambiador de masa y calor, disminuyendo la temperatura y aumentando la humedad (Pérez-Urrestarazu, Fernández-Cañero, Franco & Egea, 2016).

La transmitancia de las SVV es de 0.2 y la absortancia de 0.5 (Sheweka et al., 2012). Mientras que la de un muro de bloque de concreto con aislante de poliestireno, como es el sistema común en Mexicali, su transmitancia es de 0.46 (Pérez M. , 2007) y su absortancia es de 0.24, según la N-CMT-2-01-001-02. Es decir, el bloque tiene una mayor capacidad de transmitancia por lo que conduce el calor más rápido hacia el interior que las superficies verdes, y absorben menos agua, por lo que la evaporación es menor.

El flujo de calor en el cañón de la calle toma lugar de manera separada en la recirculación de la zona, los flujos de calor se definen desde la pared y las superficies del suelo hasta las zonas de aire en la subcapa del cañón urbano (Djedjig et al., 2016). Es decir, en la zona

habitable, por lo que el efecto es percibido de inmediato por los usuarios. Las SVV no solo ayudan a los espacios interiores, también a los exteriores, como se menciona anteriormente, inyectan humedad al ambiente y mejoran la sensibilidad térmica.

Las superficies verdes verticales bloquean la incidencia solar, que es el principal contribuidor de la ganancia de calor en los edificios (*Perini et al., 2011*). Es claro que durante las horas del día la temperatura exterior de los muros es mayor que la del interior y ese calor regresa a la temperatura del aire durante la noche (*Qiuyu et al., 2013*). Algunos estudios realizados por *Mazalli et al. (2013)* mostraron que el flujo de calor proveniente del exterior de los edificios se reduce con la aplicación de SVV en una tercera parte, en promedio.

La radiación y la convección ocurren de manera conjunta una con otra, sin embargo, los flujos de calor convectivo y radiativo son independientes el uno del otro, y se pueden calcular de manera independiente. Sin embargo, *Mazalli (2013)* simplificó el cálculo mediante la ecuación 4 en:

$$q = h\Delta T \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde h es, de acuerdo con el caso, el coeficiente de transferencia de calor superficial interno y externo ($\text{W/m}^2 \text{ K}$) y ΔT es el diferencial de temperatura entre la superficie externa e interna. Partiendo de ello, para adaptarlo a las SVV se le incluyeron los respectivos componentes convectivos y radiativos (*Mazalli, 2013*), modificando la ecuación 4 a la ecuación 5:

$$q = h\Delta T + \alpha_v SR \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde α_v es el coeficiente de absorción solar, y SR es la radiación solar que incide sobre la superficie externa.

Algunas mediciones realizadas en climas Mediterráneos, demuestran que la energía consumida para enfriar un espacio representa el 60% del total de la energía consumida por toda la edificación (*López et al., 2017*). Por lo que esto representa una gran demanda de consumo eléctrico, por ende, una mayor inversión económica.

El efecto del sombreado eficiente de la vegetación debe ser planeado estratégicamente, respecto a la trayectoria solar y la orientación (*Olgay, 1957*). De tal manera, que el sombreado natural proporcionado por la vegetación, ayude a la mitigación de acumulación de calor en los elementos expuestos, además de proporcionar un remate visual estético (*Perini et al., 2011*).

Los beneficios funcionales de la eficiencia de un sistema de sombreado en las edificaciones podrían reducir el sistema de enfriamiento mecánico y aumentar la captura de energía durante invierno (López et al., 2017).

2.5.3 Flujo de calor en Superficies Verdes Verticales.

La energía que pasa por una superficie durante un determinado periodo de tiempo es conocido como flujo de energía y se mide en unidades de energía (W/m²), tiempo (h) y área (m²) (Arya, 1988). El sol, es la principal fuente de energía del planeta, el humano ha aprovechado esa energía al igual que las plantas para el desarrollo de las actividades.

La arquitectura, a través de la historia humana ha protegido al hombre de los factores ambientales externos, uno de ellos la incidencia solar. En lugares donde las condiciones climáticas son adversas, la radiación que llega a las edificaciones da lugar a elevación de temperatura en los espacios interiores, por lo que, existen elementos arquitectónicos que permiten aminorar la incidencia solar en la edificación.

El almacenamiento de energía a micro escala, se estudia a partir del análisis energético del exterior hacia el interior de la edificación, a través del análisis del flujo de calor en los materiales de construcción.

Algunos materiales que se utilizan tienen la facultad de retrasar el flujo de calor, o bien, a través de elementos arquitectónicos en la ornamentación de edificaciones que provocan sombreado. Las SVV difieren de otros sombreados de materiales hechos por el hombre, en que la vegetación es un componente vivo, y su evapotranspiración desvía una porción de calor sensible hacia el flujo de calor latente (ecuación 6), por lo tanto, la temperatura superficial de la hoja se reduce en comparación con el aluminio, comúnmente utilizado en ventanas (Yang, 2018).

$$qr = \frac{\sigma(\Delta T)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{1,2}} + (1-\varepsilon_2)/\varepsilon_2} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Esta radiación ingresa a través de las edificaciones como flujo de calor, efecto físico de conducción de los materiales expuestos (ecuación 6). Donde qr es el flujo de calor entre el muro verde y el muro testigo, σ es la constante de Stephan-Boltzmann, ΔT es el diferencial de temperatura del exterior y el interior del muro, $F_{(1,2)}$ es el factor de vista de cielo y la emisividad (ε) que es una propiedad de la materia que indica la medida de eficiencia con la que una superficie emite energía en relación con la de un cuerpo negro, con valores en el rango de $0 \geq \varepsilon \leq 1$ (Incropera & DeWitt, 1999) y calculada por la Ley de Kirchhoff (ecuación 7):

$$\varepsilon_\lambda = 100\rho_\lambda \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde ε_λ es la emisión superficial y el espectro emisivo ρ_λ de la onda larga. Permite conocer el comportamiento de los materiales ante el espectro de radiación de un cuerpo negro, por lo que facilita conocer ε , hoy en día existen tablas que indican los valores.

La radiación solar sobre las SVV (en la componente vertical) se puede aproximar usando la ecuación de Gauss, debido al comportamiento que presenta la radiación por ser un fenómeno cíclico, por lo que se considera que la radiación solar va de 0.5 a 2.5 kWh/m² día, considerando el exterior del muro con temperatura de aire de 27 °C y la temperatura del aire en el espacio interior de 22 °C (Arkar, 2018), donde las temperaturas dependerán de las condiciones climáticas del área de estudio.

Otro factor importante para la mitigación del calor que proporcionan los SVV es el sombreado, el cual dependerá del porcentaje de la cobertura verde (tamaño de las hojas) de cada especie. Algunos estudios, como los realizados por Koyama et al. (2013) demostraron que la cobertura verde y la transmitancia solar de la hoja son los dos factores que más influyen en la mitigación del calor, debido a que proporcionan el sombreado sobre el muro y absorben la radiación solar para ser aprovechada por la planta.

El aire que pasa por la cavidad existente entre los muros y la SVV influye fuertemente en el coeficiente de calor convectivo del muro. En general, las plantas siempre verdes, dependiendo de la orientación de la fachada y la distancia entre el muro (Yang, Yuan, Qian, Zhuang & Yao, 2018) a través del efecto de chimenea (explicado en la sección 2.6.2), extraen cierta cantidad de calor del muro, con ayuda del viento. Para su cálculo se utiliza la ecuación simplificada de Holman (ecuación 8):

$$h = 1.42 \sqrt[4]{\frac{\Delta T}{L}} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde h se refiere al coeficiente de transferencia de calor convectivo, 1.42 es la constante de viscosidad cinématica del aire, ΔT es el diferencial de calor entre el aire contenido en el cóncavo de SVV y el aire externo, y L es el largo de la placa (que en este caso será la SVV). La aportación de calor convectivo depende principalmente del diferencial de temperatura entre el ambiente y la pared, al tratar a la SVV como una superficie plana, es posible hacer estos acercamientos.

Todas las superficies irradian energía, dependiendo de sus características y de la temperatura de la superficie, donde la densidad de flujo está dada por la ecuación de la ley de Stefan-Boltzmann $R_L = -\varepsilon\sigma T^4$. Donde R_L es la radiación de onda larga, ε es la

emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann y T se refiere a la temperatura (Arya, 1988).

2.5.4 Fachadas de doble piel

Las fachadas son importantes contribuidores de calor; debido a que las propiedades de sus materiales responden a las condiciones ambientales de calor, frío, ventilación y luz natural. Esto juega un rol dominante en la demanda energética.

Una de las estrategias más recurridas para disminuir la ganancia de calor en edificaciones son las fachadas de doble piel. Éstas se refieren a las edificaciones donde en uno o más niveles sus fachadas presentan materiales separados por una capa de aire (Ghaffarianhoseini et al., 2016), este espacio entre los materiales genera un sombreado y permite la entrada del viento.

Las edificaciones que cuentan con una fachada de doble piel son propuestas como una solución eficiente para controlar la interacción del medio ambiente exterior (Ghaffarianhoseini et al., 2016). El sobrecalentamiento de una superficie expuesta a la radiación solar puede ser reducida implementando una superficie que refleje o absorba la radiación (Rossi, 2015). En las fachadas con doble piel, se trata de dos muros de diferentes materiales separados por una cavidad de aire, sobre la misma fachada.

Estas edificaciones son predominantemente influenciadas por tres parámetros clave a saber, el parámetro de la fachada (atributos técnicos de la cavidad y capa externa), el parámetro de construcción (formación física del edificio) y el parámetro del sitio (condición ambiental exterior) (Ghaffarianhoseini et al., 2016). En conjunto, los tres parámetros dan información acerca del comportamiento térmico de la edificación.

El caudal de aire y las características de los materiales afectan al aumento de la temperatura de absorción de los dispositivos de sombreado internos en un edificio (Ghaffarianhoseini et al., 2016). La tasa de intercambio de aire en esta cavidad es importante para la función del enfriamiento, ya que el paso del viento influye fuertemente en la transferencia de calor convectiva externa en la superficie de un edificio (Hunter et al., 2014).

El calor, debido a su naturaleza actúa por diferencia de temperatura entre el área sombreada y la expuesta. Esta última, presentará mayor temperatura al estar directamente afectada por la radiación, mientras que el caudal, gracias al sombreado generado por la primera capa de la fachada, expone una menor temperatura. El aire del canal en movimiento en el espacio intermedio, que se da debido a la diferencia de temperatura, puede absorber la energía térmica de la luz solar por lo que se disminuye la ganancia de calor (Ghaffarianhoseini et al., 2016). En consecuencia, el muro interno de la fachada recibe en menor proporción la radiación y por lo tanto hay una menor ganancia de calor.

Las SVV funcionan como fachadas de doble piel, creando una cavidad de aire entre la superficie construida y la vegetación (*Manso et al., 2015*). El espacio creado entre la vegetación y el muro actúa como una capa aislante (*Wong et al., 2016*). La vegetación en las cavidades de las edificaciones de doble piel puede conducir a otros beneficios, como aislamiento, reducción del ruido, mejora de la calidad del aire, producción de oxígeno y mejora de la estética (*Ghaffarianhoseini et al., 2016*).

La gran capacidad de las edificaciones de doble fachada, que contienen una cortina verde, de producir sombra y reducir la radiación solar en los muros ha sido estudiada en casos reales, donde se ha verificado el microclima generado entre la pared y el área verde, dando como resultado que el sombreado en los muros reduce las temperaturas del muro interno entre un 0.5 a 2 °C (*Coma, 2014*).

El efecto chimenea depende del diferencial de temperatura entre el aire interno (dentro del caudal del muro) y el aire externo (medio ambiente), más específicamente, la cavidad proporciona un sombreado que influye en la temperatura de superficie del muro interno (*Pomponi, Piroozfar, Southall, Ashton & Farr, 2016*). La cavidad facilita la creación de un flujo de aire convectivo que trabaja mecánicamente reduciendo la ganancia de calor a través de la piel interna del edificio (*Pomponi et al., 2016*).

Según Pomponi et al. (2016) las fachadas de doble piel deben cumplir con al menos tres factores fundamentales:

1. La configuración espacial de las fachadas de doble piel.
2. La anchura de la doble piel.
3. La ventilación entre muros.

Los aislantes que son aplicados en los exteriores son más efectivos que los interiores, especialmente durante los meses de verano, el calor transferido en los muros de concreto es significativamente menor cuando tiene una cobertura vegetal antecediéndola (*Wong et al., 2016*). Las fachadas de doble piel pueden introducir significantes beneficios en la demanda de reducción de energía de los edificios, debido a que han sido definidas como una de las mejores opciones para el manejo eficiente de energía en la interacción exterior/interior de los espacios (*Pomponi et al., 2016*).

2.6 Pruebas estadísticas de datos

Los métodos estadísticos se utilizan para analizar los datos a fin de que los resultados y las conclusiones sean objetivos y no de carácter apreciativo (Montgomery, 2004). Las técnicas estadísticas, aunadas a un buen conocimiento técnico o del proceso y al sentido común, suelen llevar a conclusiones razonables (López & González, 2014).

Con frecuencia se encuentra que los métodos gráficos simples desempeñan un papel importante en el análisis e interpretación de datos (Montgomery, 2004). Los diagramas de puntos, histogramas y los diagramas de cajas son útiles para resumir la información de una prueba de datos (Montgomery, 2004).

- Diagrama de caja y bigotes: En él se muestra el mínimo, máximo, los cuartiles inferiores (percentil 25), superior (percentil 75) y la media (en una caja más pequeña). La caja se extiende del cuartil inferior al cuartil superior; se trazan dos líneas (o bigotes) que se extienden de los extremos de la caja hasta los valores mínimo y máximo.
- Gráficas de probabilidad normal: Es una técnica para visualizar si los datos muestrales se ajustan a una distribución normal con base en un examen visual subjetivo de los datos. No es una prueba concluyente por lo que es necesario aplicar una prueba objetiva.
- La prueba de normalidad de Shapiro-Wilk: En ella la hipótesis nula que se evalúa es que los errores siguen aproximadamente una distribución normal, y la alternativa es que no siguen esa distribución. Es necesario recordar que si el valor P ($Pr < W$), donde W es la corrección de coeficientes tabulados y Pr el contraste de la distribución teórica frente a los observados, es mayor que el nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), entonces concluimos que no se cuenta con evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, los errores siguen una distribución normal (López & González, 2014)).
- La prueba de Kolmogorov–Smirnov (K-S) es un contraste no paramétrico que tiene como objetivo determinar si la frecuencia de dos conjuntos de datos distintos siguen la misma distribución alrededor de su media. Se trata de una prueba de bondad de ajuste, sirve para verificar si las puntuaciones que hemos obtenido de la muestra siguen o no una distribución normal. Permite medir el grado de concordancia existente entre la distribución de un conjunto de datos y una distribución teórica específica. Su objetivo es señalar si los datos provienen de una población que tiene la distribución teórica especificada. En este caso, la hipótesis nula (H_0) establecerá que la distribución empírica es similar a la teórica.

2.6.1 Prueba de diferencia de medias, ANOVAS

El análisis estadístico de datos derivados de un experimento tiene como propósito proveer información referente a la manera en que las unidades experimentales

responden a los tratamientos aplicados (*Villapaldo et al., 2001*). La media muestral ($\bar{y}$) es un estimador puntual de la media proporcional (μ) y la varianza muestral (S^2) es un estimador puntual de la varianza poblacional (σ^2) (*Montgomery, 2004*).

- Prueba t de dos muestras: En ella las muestras se toman de poblaciones independientes que pueden describirse con una distribución normal, que las desviaciones estándar o las varianzas poblacionales son iguales y que las observaciones son variables aleatorias independientes.
- Análisis de varianzas (ANOVA). Es un proceso aritmético y estadístico que consiste en descomponer la variación total en fuentes o causas de variación (*López & González, 2014*).

Un valor (P) transmite mucha información acerca del peso de la evidencia en contra de la hipótesis nula y, por consiguiente, el responsable de la toma de decisiones puede llegar a una conclusión con cualquier nivel de significación (α) especificado. El valor p mide la probabilidad de que el resultado se deba al azar, tiene una relación con la fiabilidad del estudio, por lo que indicará la probabilidad de obtener un valor semejante si se realiza el experimento bajo las mismas condiciones (*Molina, 2017*). Esto no significa que el valor p valide la hipótesis nula (H_0) para conocer con certeza si es aprobada o rechazada es necesario realizar otros métodos estadísticos, como lo son:

2.6.2 Prueba de rango múltiple Duncan

Un procedimiento muy utilizado para comparar todos los pares de medias es la prueba de rango múltiple desarrollada por Duncan, este método genera comparaciones múltiples de parejas de medias (*Villapaldo et al., 2001*). En esta prueba se requiere una diferencia observada más grande para detectar pares significativamente diferentes de medias. Para su ejecución es necesario que el nivel de significancia sea mayor o igual a (α) (*Montgomery, 2004*).

Con la aplicación de esta prueba, se llega a resultados más elaborados y se discrimina con mayor facilidad entre los tratamientos (*López & González, 2014*).

2.7 Normas aplicables a las Superficies Verdes Verticales

Al abordar temas relacionados con urbanización, es importante conocer la documentación oficial, debido a que nada debe escapar de sus términos. Pero en la mayoría de los casos se encuentra que, al no ser temas penales, se tienen poco contemplados. Este es el caso de las áreas verdes a nivel urbano.

Con la idea de enmarcar los reglamentos que ayuden a considerar la inserción de áreas verdes a nivel urbano, se acudirá a enunciarlas, de manera tal que facilite su consulta.

A nivel internacional, existen Organizaciones y también tratados, desde los 80's hacia la actualidad, donde los gobiernos que son parte de la ONU, como México, se comprometen a cuidar y actuar por un mejor medio ambiente.

Particularmente la Organización Mundial de la Salud (OMS) en su publicación “Guía de Calidad del Aire en el 2005”, hace observaciones sobre las condiciones en las que se encuentran las ciudades debido a la contaminación provocada por factores como tráfico, industrialización y la misma urbanización. Esta misma, propone una cantidad mínima de áreas verde de 9m² por persona.

En cuanto a los tratados internacionales, relacionado con el medio ambiente, México tiene 59 tratados bilaterales firmados con diversos países, mayormente con los que comparte frontera. Sin embargo, de ellos, solo cinco tratan sobre mejoramiento de medio ambiente, estos son:

1. Convenio entre los Estados Unidos Mexicanos y los Estados Unidos de América sobre Cooperación para la Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente en la Zona Fronteriza (Convenio de La Paz).
2. Acuerdo de Cooperación Ambiental entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el Gobierno de Canadá.
3. Acuerdo entre el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos y el Gobierno de los Estados Unidos de América sobre el Establecimiento de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF) y el Banco de Desarrollo de América del Norte.
4. Convenio para la Protección de la Flora, de la Fauna y de las Bellezas Escénicas Naturales de los Países de América.
5. Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

Dentro de los mismos, no todos sus artículos están destinados específicamente a las áreas verdes, por ello, se desglosarán cada uno para conocer la parte involucrada.

El Convenio de La Paz, firmado en 1983, establece en su artículo 7, que es competencia de las naciones firmantes realizar acciones que ayuden a mitigar los efectos ambientales adversos y señala en su artículo 8 que estas acciones, propuestas, y proyecto es competencia de la Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología. Tanto a nivel federal,

como estatal y municipal. De esta Secretaría se desprende a su vez la Ley de Desarrollo Urbano de los estados y su relativo municipal que es el Plan de Desarrollo Urbano, que se retomará más adelante.

Respecto al Acuerdo de Cooperación Ambiental USA-México-Canadá (ACAAN, 1990) que se desprende del TLC, en su Tercera Parte dice que existirá una Comisión en conjunto de los tres países para la cooperación ambiental. En su artículo 9 habla de que esta comisión debe estar integrada por profesionales competentes y ad hoc sobre los temas ambientales. En su artículo 10 inciso (h) menciona que la comisión será encargada de establecer el listado de especies exóticas vegetales que consideren dañinas y en su inciso (p) habla de los enfoques y cumplimientos de las leyes ambientales.

En cuanto a la COCEF (1993), se establecen los programas y proyectos bilaterales que competan al ámbito del medio ambiente, desde uso, reuso, protección y aprovechamiento de los recursos.

Dentro de la Convención para la Protección de la Flora, Fauna y de las Bellezas Escénicas de los Países de América, solo se encontró referencia hacia la terminología de conceptos de extensión espacial de áreas verdes.

Y por último, respecto a las Normas Internacionales, el Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, que tuvo su primera aparición en 1992, surgiendo de ello, el protocolo Kyoto. En su artículo 1ero, en sus incisos iv, v, vi y vii; menciona que es necesario fomentar y adoptar medidas que reduzcan las emisiones de carbono con tecnologías ecológicamente racionales.

En el ámbito Nacional la principal autoridad es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, donde se tomarán en cuenta dos artículos principalmente:

- Art. 4. Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. Toda familia tiene derecho a disfrutar de vivienda digna y decorosa.
- Art. 27. Lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para ordenar los asentamientos humanos. Planear y regular la fundación, conservación, mejoramiento y crecimiento de los centros de población; para preservar y restaurar el equilibrio ecológico.

De estos artículos parten los reglamentos y planes de gobiernos que tienen como prioridad ejecutar los dos artículos antes señalados, como lo son los reglamentos internos de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), de los cuales se desprenden subsecretarías, comités, departamentos y políticas.

- Artículo 7, inciso X menciona que es la dependencia encargada de que los planes y responsabilidades establecidas en el protocolo de Kyoto se lleven a cabo en el país.
- Artículo 12 inciso XVIII dice que será la encargada de establecer el Plan Nacional de Desarrollo, del cual se basarán los organismos públicos, federales, estatales y municipales para el desarrollo de cada entidad.

Del artículo 27 de la Constitución Mexicana se desprende la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), donde en su sección IV sobre la Regulación Ambiental de los Asentamientos Humanos, en sus artículos referidos a inserción de áreas verdes menciona:

Artículo 23.- Para contribuir al logro de los objetivos de la política ambiental, la planeación del desarrollo urbano y la vivienda, además de cumplir con lo dispuesto en el artículo 27 constitucional en materia de asentamientos humanos, considerará los siguientes criterios:

I.- Los planes o programas de desarrollo urbano deberán tomar en cuenta los lineamientos y estrategias contenidas en los programas de ordenamiento ecológico del territorio.

V.- Se establecerán y manejarán en forma prioritaria las áreas de conservación ecológica en torno a los asentamientos humanos.

IX. La política ecológica debe buscar la corrección de aquellos desequilibrios que deterioren la calidad de vida de la población y, a la vez, prever las tendencias de crecimiento del asentamiento humano.

Artículo 36. Inciso II. Considerar las condiciones necesarias para el bienestar de la población y la preservación o restauración de los recursos naturales y la protección al ambiente.

Pero también el Plan de Desarrollo Nacional tiene consideraciones hacia la implementación de áreas verdes, en su Punto 4, México Próspero, en su Objetivo 4.4 hace referencia a “Impulsar y orientar un crecimiento verde incluyente y facilitador que preserve nuestro patrimonio natural al mismo tiempo que genere riqueza, competitividad y empleo”. Dentro de su línea de acción menciona:

- Estrategia 4.4.1 Impulsar la planeación integral del territorio, considerando el ordenamiento ecológico y el ordenamiento territorial para lograr un desarrollo regional y urbano sustentable.

- Estrategia 4.4.3
 - Ampliar la cobertura de infraestructura y programas ambientales que protejan la salud pública y garanticen la conservación de los ecosistemas y recursos naturales.
 - Promover el uso de sistemas y tecnologías avanzados, de alta eficiencia energética y de baja o nula generación de contaminantes o compuestos de efecto invernadero.
 - Focalizar los programas de conservación de la biodiversidad y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, para generar beneficios en comunidades con población de alta vulnerabilidad social y ambiental.
 - Recuperar los ecosistemas y zonas deterioradas para mejorar la calidad del ambiente y la provisión de servicios ambientales de los ecosistemas.

Para objeto de este tema se considerará no solo lo estipulado sobre áreas verdes urbanas, sino también aquellos temas que se consideren de relevancia, como la parte de envolvente de las edificaciones y la energía, en este ámbito se encontró:

NOM-008-ENER-2001: Busca establecer los criterios que debe tener la envolvente de los edificios para lograr el uso eficiente de la energía.

NOM-020-ENER-2013: Tiene como propósito principal lograr la comodidad de los habitantes de edificios residenciales con el consumo mínimo de energía. A través de criterios de diseño adecuados a la región y limitar las ganancias de calor de los edificios para uso habitacional a través de su envolvente, con el objeto de racionalizar el uso de energía en los sistemas de enfriamiento.

En cuanto lo establecido a nivel regional, partiremos de revisar primero la reglamentación en el Estado de Baja California, para comprender sus estrategias, alcances y limitantes.

El Reglamento Interno de Asentamientos Humanos y Obras Públicas del Estado de Baja California, en su artículo 5, sólo hace mención que es la misma secretaría la que tiene las atribuciones sobre el Desarrollo Urbano, Obras Públicas, suministros y servicios relacionados con el ejercicio.

La ley de edificaciones del Estado en su artículo 50, considera que los materiales de techos y muros exteriores deberán garantizar los niveles mínimos aceptables de bienestar térmico en sus espacios interiores. La misma ley no menciona ninguna acción en términos de adecuación ambiental o de reglamentación de las características térmicas de la envolvente de los edificios residenciales

En la Ley de Desarrollo Urbano del Estado de Baja California se menciona:

- Art. 3. La regulación de los asentamientos humanos y en su primera sección menciona que a través de los elementos naturales debe haber un aprovechamiento por parte de la sociedad para asegurar el equilibrio ecológico y mejoramiento de las condiciones ambientales.
- Art. 11. Es responsabilidad de los ayuntamientos municipales inciso XVII de participar en la creación y administración de las zonas sujetas a conservación ecológica para el crecimiento urbano, a través de Leyes, Programas y Declaratorias.
- Art. 12. Es responsabilidad de la Secretaría de Asentamientos Humanos que dependerá directamente de la Administración Pública Estatal En su inciso VIII otorga autorización sobre todo tipo de acción de urbanización.
- Art. 21. Corresponde a la Dirección General de Ecología del Estado, la planeación y regulación ecológica de los asentamientos humanos.
- Art. 30, Inciso VI. Es un objetivo del Plan de Desarrollo Urbano Estatal, salvaguardar los recursos naturales, mantener el equilibrio ecológico y mejorar las condiciones ambientales de los centros de población.
- Art. 53, Incisos II y V. Fomentan la preservación y mejoramientos de las áreas poblacionales y forestales.
- Art. 72. Las acciones de los Programas Sectoriales de Desarrollo urbano y sus acciones específicas en materia de vivienda y recursos naturales.
- Art. 111. Corresponde a los programas el ordenamiento ecológico de los asentamientos humanos y asegurar la calidad de vida de la población.
- Art. 141. Cualquier área dentro de un centro de población estará sujeta a régimen jurídico en materia urbana que dictaminan las autoridades estatales.
- Artículo 145. Las acciones en materia de vivienda en su inciso IV dice que promueve los costos de la vivienda en materiales básicos.
- Art. 214. Establece que toda obra debe cumplir lo estipulado en la Ley de Urbanización del Estado.

En cuanto a la Ley de Obras Públicas, en su Artículo 17, menciona que las dependencias y entidades serán encargadas de elaborar sus programas de obra públicas, en su Inciso IV menciona que las obras públicas deben tener características de adaptación en sus características ambientales, climáticas y geográficas de la región.

El Reglamento de Fraccionamiento del Estado, es el único que menciona un porcentaje que debe ser destinado exclusivo para áreas verdes, en un mínimo de 3% del total del área del fraccionamiento, sin importar el tipo de fraccionamiento. En su artículo 91 dice que esta superficie destinada debe ser donada y no podrá ser inferior al porcentaje señalado.

En el ámbito municipal, se tienen programas e instituciones públicas. En el Reglamento Interno del Instituto Municipal de Investigación y Planeación Urbana del Municipio de Mexicali (IMIP), se menciona:

- Art. 5. Inciso XI y XIV. Es la institución encargada de proponer al Ayuntamiento las zonas sujetas a reserva ecológica, promover y planear la creación de áreas verdes organizando su desarrollo y distribución.
- Art. 10. Inciso I. Coordinar los proyectos en materia de desarrollo urbano, equilibrio ecológico y protección ambiental que genere el Instituto para la implementación de edificaciones. Inciso VII. Desarrollar proyectos de normas en materia de diseño urbano y paisajístico, equilibrio ecológico y protección ambiental, para la implementación de edificaciones y acciones de urbanización.

En el Reglamento General de Acciones de Urbanización para el Municipio de Mexicali, menciona:

- Art. 3 Inciso IX. Las acciones de urbanización cuya autorización y ejecución se norma por medio del presente Reglamento, son los componentes del paisaje urbano, como arboledas, jardines, mobiliario urbano y señalización.
- Art. 54 Inciso II. El urbanizador o promotor inmobiliario estará obligado a transmitir gratuitamente al Municipio para equipamiento, la propiedad de la superficie equivalente al diez por ciento del área vendible.

En el Reglamento de Protección al Ambiente para el Municipio de Mexicali, menciona

- Art. 4. Es atribución de la Oficina Municipal de Ecología sección IX inciso c y d, promover la creación de parques urbanos y demás áreas análogas; participar en el manejo y cuidado de las áreas verdes, de competencia municipal, en la preservación de la flora.
- Art. 132. El ayuntamiento participará con la Dirección de Ecología en materia de conservación del patrimonio natural, en la determinación de zonas que tengan valor escénico o paisajístico dentro del municipio.
- Art 134. La Oficina Municipal de Ecología vigilará que las especies de flora que se empleen en la habilitación y restauración de parques urbanos, así como en la forestación y reforestación del territorio municipal, sean compatibles con las características de la zona.
- Art. 138. El Ayuntamiento promoverá la realización de programas de forestación, reforestación y preservación de áreas verdes dentro del territorio municipal.

En el Reglamento de Edificaciones para el Municipio, se menciona solo la recomendación de uso de área verde en:

- Art. 9. En el uso de tipología especial, la zona de distribución o almacenaje de combustibles deberá guardar una distancia de 15 m con respecto al uso habitacional. En la zona de separación, los primeros 3 m colindantes con el uso habitacional deberán acondicionarse como área verde, excepto cuando sobre esta zona se construyan edificaciones de servicios complementarios.

- Art. 11. Los usos o destinos de infraestructura que represente un posible impacto negativo, como es el caso de cárcamo de bombeo, deberán contar con una franja de amortiguamiento de 5 m en su perímetro para dedicarse a uso de área verde.

El Reglamento de Áreas Verdes en el Municipio de Mexicali para la implementación de áreas verdes en las zonas urbanas, menciona:

- Art. 1. Este reglamento tiene como objeto el aprovechamiento, creación y mantenimiento de las áreas verdes del municipio.
- Art. 2. La aplicación de ello, corresponde al departamento de áreas verdes y jardines.
- Art. 4. Corresponde a la Dirección, a través del Departamento, promover la construcción de las áreas verdes, conservar y mantenerla, así como promover acciones encaminadas al ahorro y optimización en el consumo de agua.
- Art. 7. Los fraccionamientos habitacionales deberán presentar un proyecto de las zonas destinadas como áreas verdes.
- Art. 11. En los estacionamientos al aire libre se exige la plantación de un árbol por cada seis cajones.
- Art. 15. La creación de áreas verdes deberán ser diseñadas por el Departamento en coordinación con la Dirección de Ecología.
- Art. 39.- A efecto de conocer las especies que, por su probada adaptación al clima, belleza y economía en el consumo de agua, son recomendadas, para el Municipio, son recomendadas para su plantación las que establece la Guía de Forestación para el Municipio de Mexicali, Baja California, misma que podrá ser obtenida a petición del interesado, mediante lo establecido en el Capítulo VIII, referente al Acceso a la información.
- Art. 40.- Queda prohibido de acuerdo con los listados de la Federación, la introducción de variedades exóticas que puedan ser portadoras de plagas ó enfermedades, ó bien afectar con su auto producción la flora del Municipio.

Enunciar estos artículos sirve para conocer las consideraciones legales que existen en todos los niveles que correspondan a su aplicación, como se actúa sobre ello y quien se encarga de cada objetivo. Pero también se puede conocer el déficit y lagunas legales que existen en las normas sobre el tema.

2.8 Normas para instrumentos de medición

Para realizar cualquier experimento, es necesario utilizar instrumentos que además de contar con sus óptimas condiciones físicas, deben cumplir con normas establecidas que cumplen ciertos criterios, como lo son, la calidad de sus materiales, las dimensiones, una adecuada calibración, entre otras.

Para objeto de este capítulo se analizarán algunos reglamentos correspondientes a los instrumentos de medición, como lo son los de temperatura en superficie (termopares tipo K) de flujo de calor (Sensor HFS-3) de temperatura del aire y humedad (Sonda HMP-45C), radiación solar (Radiómetro Neto NR-01), además del instrumento adquirente de datos (Datalogger CR3000). Con el objetivo de conocer mejor la normativa que las rige.

De manera general la NMX-AA-166/1-SCFI-2013 define las características y rangos generales que una estación meteorológica debe de tener, así como el funcionamiento mínimo de los instrumentos que están conectados a ella, da a conocer períodos mínimos de medición que se deben cumplir para considerar una base de datos adecuada. En ella se incluye desde su programación hasta la colocación en sitio.

2.8.1 Termopar Tipo K

La NOM-CH-73-1986 dice que se le considera termopar a todo aquel Instrumento para la medición de temperatura cuyo principio de funcionamiento se basa en el efecto Seebeck, que se presenta cuando dos alambres en hojas de metales diferentes (termoelementos) se unen en sus extremos y cuando las uniones se mantienen a diferentes temperaturas, fluye una corriente debido a la absorción de calor en la junta.

Los termopares tipo K, para su diseño y fabricación, y algunas marcas que lo desarrollan, consideran la norma europea DIN EN – 60584 – 1. En ella se describen las especificaciones de los materiales utilizados, dimensiones (especialmente espesor), pureza de material (porcentaje de aleación), materiales empleados para el aislamiento, uniones (tipo y consideraciones especiales) y tolerancias que debe tener el instrumento desde el momento que sale de fabricación como lo son: el rango de temperatura, la tolerancia de los cables, la calibración de los mismos y las condiciones donde es necesaria una calibración externa.

Para respaldar cualquiera de las normas surgidas en los diferentes países, se estableció la norma internacional IEC 60584-1 que establece al igual que las anteriores los valores de medición y tolerancia que deben cumplir estos.

Mientras que la norma IEC 60584-3 habla del código de colores que deben tener los cables, según su tipo y su material. Además de señalar ajuste en caso de requerirse aumentar el diámetro del mismo.

2.8.2 Sensores de Flujo de Calor HSF-3

A nivel internacional la norma IEC 60751:2008 regula los valores de tolerancia de los componentes conocidos como termo resistencia de película delgada. Que de manera general se trata de un sensor que mezcla una película de cerámica y un cable delgado, generalmente, platino. Siendo tres sus principales características:

- Rango de temperatura que va desde los $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta los $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Elevada resistencia contra vibraciones.
- Diseño de dimensiones muy reducidas.

Dependiendo de la cantidad de cables contenidos en el sensor, le clasifican por categoría, mismo que rige la norma DS IN0017, donde los Sensores HSF-3 al tener dos cables entran en la categoría b, los cuales tienen una tolerancia de ± 0.3 hasta $+0.005\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.8.3 Sonda de temperatura y humedad relativa HMP-45C

La sonda de temperatura y humedad es un instrumento de medición perteneciente a una estación meteorológica la cual, se rige bajo la norma ISO/IEC 17025, la cual propone una serie de requisitos para laboratorios interesados en demostrar que están operando de acuerdo con los requerimientos establecidos en la misma norma.

Es importante indicar que, en nuestro país, la evolución de los aspectos técnicos y administrativos específicamente para los laboratorios de calibración, se presentó con el documento SNC-02-1994.

2.8.4 Radiómetro neto NR-01

Utilizado principalmente para estudios de balance energético y flujo superficial, mide las 4 componentes del balance de radiación superficial, compuestas por piranómetros y pirgeómetros.

Un piranómetro mide la radiación solar recibida por una superficie plana desde un ángulo de visión de 180° , expresada en W/m^2 , a la cual llaman radiación solar “hemisférica”. El espectro se extiende aproximadamente de 285 a $3000 \times 10^{-9}\text{ m}$. Mientras que el pirgeómetro mide la onda larga o infrarrojo lejano (FIR siglas en inglés), radiación recibida por una superficie plana en W/m^2 .

El manual del NR-01 Campbell se refiere particularmente a 3 normas aplicadas en el producto:

- ISO/TR 9901:2018 Capítulo 3.5 Piranómetro. Define los rangos de mediciones de radiación de onda larga en un rango aproximado entre $0.3\text{ }\mu\text{m}$ a $4\text{ }\mu\text{m}$.
- WMO-No. 8. Capítulo 7.4 Mediciones de radiación de onda larga y corta. Especifica las variaciones en el espectro en un rango entre 2 a 10%.

- ASTM G183-05 Apoyado en las otras dos normas, pero adicional incluye especificaciones en su capítulo 5.6.1 Mediciones de radiación solar según condiciones de cielo. Donde establece un ángulo de error de $\pm 1^\circ$, para cielo claro. Y con cielo nublado de $\pm 10^\circ$.

2.8.5 Cámara Termográfica FLIR T620

La cámara termográfica FLIR en su modelo T620 es considerada un dispositivo LE-LAN (dispositivo red de área local exento de licencia, siglas en inglés) al ser un instrumento de uso generalizado para la industria o bien, el área científica. Sin embargo, se requiere de una certificación expedida por el Departamento de Economía y Ciencia (Canadá), la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC siglas en inglés) y las regulaciones de exportación de Estados Unidos para su uso.

Para su uso la cámara está basada en las siguientes normas:

- RSS-247. Esta norma nos indica que su banda de operación, que está entre 5150 – 5250 MHz, utilizará al menos 75 canales de salto. El máximo ancho de banda de 20 dB del canal de salto será de 1 MHz.
- ETSI EN 301 893. Menciona los requerimientos esenciales para este tipo de dispositivos, la potencia de salida máxima conducida no deberá exceder de 1 W, y no deberá exceder de 4 W, excepto algunos dispositivos particulares.
- ANSIC63.10. La norma menciona los procesos permitidos para dispositivos LE-LAN, así como los requisitos para la obtención de la certificación.

Para sus mediciones, cada elemento de la cámara se rige bajo una norma diferente, de la cuales se harán mención:

- Emisión. EN61000-6-3. Componentes eléctricos generales, radio equipamento y datos de ancho de banda.
- Laser. EN 60825-1. Requerimiento de seguridad. Cobertura esencial y directa. Espectro de radio.
- Seguridad. EN 50360:2001, EN 50566, IEC 60950-1:2005, EN 60950+A11:2009. Exposición humana, manejo de público general, información técnica de instrumentos con láser y documentación técnica de instrumentos con láser.

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Las SVV al igual que cualquier elemento urbano, no se encuentra solo. Al ocupar un espacio en la urbe, es parte de un gran conjunto. Y como tal, es afectado por elementos de su entorno cercano (1 km circundantes) y no tan cercano (características de emplazamiento de la ciudad). Para efecto de este trabajo, se retomaron algunos de estos elementos del emplazamiento, sin embargo, es imposible considerar todo a su alrededor, por lo cual, se recurrió a dividir estos elementos en dos grupos:

- Contexto urbano: Se consideraron los siguientes factores climáticos: viento, radiación solar y temperatura de un sitio representativo de la ciudad, después se ubicó el análisis en una zona más cercana al sitio de experimentación (1 km alrededor) donde se examinaron las zonificaciones climáticas derivadas del entorno.
- Contexto local: Aquello que se encontró dentro del área de estudio, es decir, todo lo que afecta directamente a la SVV.

3.1 Contexto urbano

Todas las urbes están separadas por zonas, lo que permite a los diseñadores urbanos configurar el uso de suelos, que organiza las actividades que se desarrollan dentro de la misma urbe. Por las características de las construcciones y los materiales que comercialmente se utilizan, al cubrir el suelo de materiales poco permeables, se cambia la superficie natural del suelo, es decir, al suelo natural se coloca un material diferente (generalmente concreto), por lo que se altera el intercambio energético.

Estos cambios que se realizan afectan el balance energético que se da entre la superficie terrestre y la baja atmósfera (*Oke, 1978*). Como consecuencia se desarrollan los microclimas o LCZ (Zonas climáticas locales, por sus siglas en inglés) (*Stewart & Oke, 2012*); dentro de una ciudad se presentan diferentes tipos de microclimas, derivado de la composición física y de materiales del espacio, que afectan la temperatura del aire. Para la evaluación del comportamiento de los microclimas, se analiza la ciudad desde un ámbito general. Para ello, se divide el proyecto en tres zonas:

1. La primera, y más general, el contexto de la urbe.
2. Local, es decir, todo lo que se encuentra en un diámetro de un kilómetro desde el sitio.
3. El sitio en el que se realizó el experimento.

3.1.1 Clima en Mexicali

Mexicali, localizada al Noroeste de México, centro de actividades eminentemente agrícolas hasta mediados del siglo pasado se transformó radicalmente. A mediados de la década de los 60's, Mexicali recibió un fuerte impulso con el Programa de Industrialización de la frontera norte, por lo que su actividad económica principal pasó a ser industrial que hasta el 2012 había crecido anualmente 2.5% (*Mungaray et al., 2014*), que

reforzado por el movimiento comercial y de servicios, incrementó de manera importante la mancha urbana.

Al encontrarse sobre el desierto de Sonora, el clima de Mexicali, según la clasificación Köppen modificada por *García (1981)*, tiene un clima BW (h') hs (x') (e'), es decir, un clima seco y muy árido, con un invierno lluvioso y una oscilación anual de temperaturas mensuales promedio muy extremas (*García, 1981*). Conocer las generalidades de la ciudad, es importante para el proyecto, para ello se recurrió a caracterizar dos factores climáticos:

- La temperatura del aire, se recurrió a graficar los datos y se realizó la estadística básica desde 2000 hasta 2016, datos obtenidos de la estación meteorológica que se encuentra en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California. Estos datos, son datos promedio diario.
- Dirección y velocidad de los vientos: a través de rosas de vientos y de estadística básica, que va desde el 2000 hasta el 2016, se dividió en dos periodos, el primero correspondiente a los meses de verano (junio, julio y agosto) y el segundo a invierno (diciembre, enero y febrero). Para conocer el comportamiento, se procesaron los datos por medio del programa Hydrognomon (*Versión 4.0, 2018*), en donde se consideraron los datos referentes a la velocidad y dirección de viento diezminutales.

3.1.2 Análisis Urbano

Para conocer el contexto urbano se recurrió al mapa desarrollado por el Instituto Municipal de Investigación y Planificación Urbana (figura 3) (*IMIP, 2015*) como base, donde se visualizan los usos de suelo. Dentro de la ciudad de Mexicali, se desarrollan microclimas, debido a las características urbanas que alteran los balances energéticos y de radiación, que provocan aumento en las temperaturas, conocido como Isla de Calor Urbano (UHI) (*Oke et al., 1982*).



Figura 3. Adaptación Uso de Suelos, Mexicali (IMIP, 2015); Google Earth (2017).

Fotografía Google Earth, 2017.

Pero las condiciones de superficies dentro de la ciudad varían de lugar a lugar, por lo que es necesario conocer las características que rodean al sitio de experimentación, particularmente se analizó la urbanización correspondiente a 1 km de diámetro circundante a la zona de estudio. Lo anterior, con la intención de conocer a mayor detalle lo que rodea al sitio, derivado de la influencia de la zona urbana, descrito como barrio (Lynch, 2008).

- Comercial.
- Habitacional.
- Infraestructura (Educativa)
- Áreas verdes.

- Utilizando una imagen satelital, obtenida de Google Earth (2017), se superpuso contra el mapa proporcionado por IMIP (Mapa uso de suelo Mexicali, 2015).
- Se realizó un recorrido por el área seleccionada para corroborar la información del mapa.
- Utilizando la misma simbología del mapa de IMIP, y con el programa de Adobe Photoshop CC (Versión 12, 2017), se colorearon las áreas correspondientes a cada uso de suelo.

3.1.4 Zonificación urbana

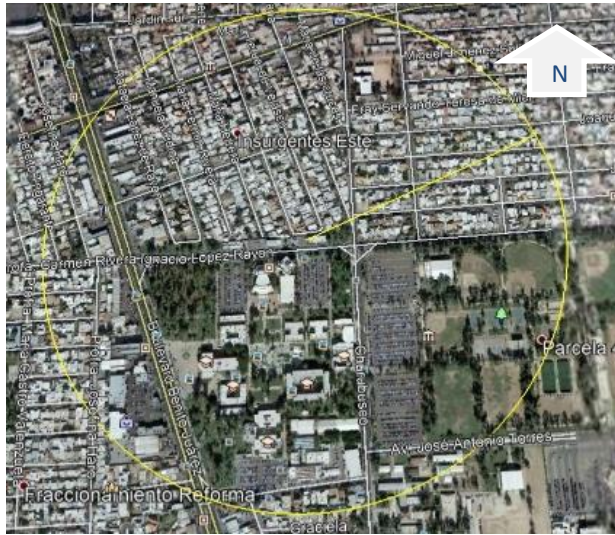


Figura 4. Sitio de estudio, Mexicali. Google Earth, 2017.



Figura 5. Puntos de toma de datos. Google Earth, 2017

Teniendo como base la metodología desarrollada por Oke & Stewart (2012) sobre las zonificaciones climáticas, se seleccionó un área de 1km alrededor del sitio de experimento (figura 4).

Para ello, se desarrollaron fichas técnicas que describen las condiciones en cada punto de medición (15 en total) dentro del área seleccionada, las cuales se realizaron de la siguiente manera:

- Dentro de cada uso de suelo se subdividió en tres puntos, esto con la intención de conocer si las características dentro del mismo uso de suelo coincidían y así unificar las zonas, figura 5.
- Por cada punto de medición se generó una ficha de zona climática.
- Cada ficha climática describe las condiciones y características climáticas, urbanas y físicas.
- Dentro de las condiciones del lugar se describieron las características de niveles de urbanización, tales como, distancia entre calles, flujo vial y materiales de construcción.
- Las características del cañón urbano (tamaño de edificaciones circundantes, distancia entre edificaciones, existencia de

vegetación, etc.) describen los materiales de construcción, horizontabilidad que resulta de la división de la altura de los edificios y el ancho de los estos, verticalidad que corresponde a la cantidad de niveles (pisos) de los edificios.

- Densidad de población, dependiendo del área se tomaron los datos proporcionados del catálogo del sistema nacional (CONAPO, Catálogo Sistema Urbano Nacional, 2012), cuando se trataba de zonas residencial y comercial; mientras que cuando se trató de la zona escolar los datos se tomaron del Registro Estadístico Poblacional, UABC, Unidad Mexicali (Escolar, 2016).
- Los análisis climáticos que se consideraron para las fichas son el factor vista de cielo, donde se tomaron fotos con un lente fish eye y siguiendo el análisis de las imágenes conforme a la metodología desarrollada por Polo-López (2016).

Con la información de cada ficha, se clasificó según el sistema de *Oke y Stewart (2012)* Tabla 2, donde cada característica anteriormente señalada pertenece a un grupo específico de zona climática que depende del nivel de urbanización.

Tabla 2. Consideraciones asociadas a LCZ Stewart & Oke, 2012

Tipo de Edificación	Tipo de cobertura	Otros factores
1. Compacto rascacielos	a. Densidad de árboles	Porcentaje de Vista de cielo
2. Compacto media escala	b. Arboles dispersos	Porcentaje de vegetación
3. Compacto baja escala	c. Arbustos y matorrales	superficie considerada
4. Abierto rascacielos	d. plantas bajas (césped)	Densidad de población
5. Abierto media escala	e. Concreto y pavimento	Tipo de uso de suelo
6. Abierto baja escala	f. Suelo desnudo o arena	Flujo de tráfico
7. Ligero de baja altura	g. Cuerpos de agua	Materiales de construcción
8. Largo baja altura		Configuración de calle
9. Edificación espaciada		Distancia entre calles
10. Altamente industrializado		

3.2 Características del Sistema de SVV

3.2.1 Sitio de análisis

El primer punto antes de iniciar el proceso de construcción de la SVV, fue la selección del área de estudio. Para ello, el área seleccionada debió cumplir con ciertos criterios, los cuales son:

- Su orientación debe ser sur u oeste. Debido a que en estas orientaciones es donde encontramos mayor asoleamiento durante el verano. La superficie debe estar asoleada, al menos, durante las horas críticas del día, cuando se presentan las mayores magnitudes de asoleamiento solar, entre las 12:00 a 16:00 horas.
- No debe existir ningún tipo de interrupción del asoleamiento en la superficie. Que puede ser desde árboles, postes, elementos decorativos que proyecten sombra sobre ella. Debe ser accesible y seguro.
- Se buscó un área dentro del Campus UABC Central a la vista de la comunidad, pero también que estuviera restringido el acceso y con sistema de vigilancia para proteger el equipo de medición.
- Debe tener acceso a servicios básicos. Principalmente agua, para facilitar el riego, así como el mantenimiento de los contenedores y las especies vegetales.
- La construcción de la edificación seleccionada debe ser con el método común existente en la ciudad, es decir, a base de block, ladrillo o concreto.

Para localizar el sitio ideal, se realizaron recorridos a través de varios Campus de UABC (figuras 6-8), seleccionando finalmente el ubicado en tesorería, Vicerrectoría Mexicali.



Figura 6. Tesorería, Vicerrectoría Mexicali.



Figura 7. Biblioteca, Campus Cs. de la salud

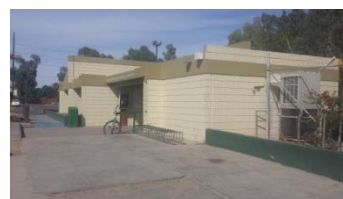


Figura 8. Acceso Unidad Deportiva.

3.3 Período de Estudio

En el estudio realizado por *Scarpa, Mazzalli y Peron (2014)*, quienes consideraron no solo la estación de verano para realizar el análisis de SVV sino que amplían 1 semana antes de la entrada de la estación, a diferencia de lo realizado en otros estudios (*Perini et al, 2011; Afshari, 2017; Haggag et al, 2014*), quienes consideraron para analizar un período de estudio correspondiente solo a los meses de verano. El estudio de *Scarpa et al. (2014)* se amplió, abarcando los meses completos de junio a septiembre, de donde se tomaron para la simulación los datos del día con mayor y menor radiación respectivamente.

Para poder seleccionar el período de estudio, se tomó como base el periodo de estudio de *Scarpa et al. (2014)*, ajustando ciertos detalles ya que el presente estudio no presenta las mismas condiciones que el de *Scarpa et al. (2014)*, Las cuales fueron:

- Se realizaron tres campañas de medición, dos en verano y una en invierno.
- Se graficaron las temperaturas de aire en la ciudad y de la radiación solar global, así como su análisis estadístico básico.
- De las gráficas resultantes se seleccionaron los meses donde se observaron las mayores y menores temperaturas.
- Al presentarse en las temporadas de transición (primavera y otoño) temperaturas mayores a 30 °C y radiación global mayor a 900 W/m² (gráfica 2 y gráfica 12), se decidió ampliar el período de estudio antes de cada cambio de estación, quedando de Mayo a Octubre.

La ampliación del periodo de estudio de verano y el periodo de estudio invernal tienen la intención de conocer el funcionamiento de la vegetación como un sistema de aislamiento natural, y ver de manera gráfica-estadística como la vegetación se adapta a las condiciones microclimáticas.

3.4 Diseño de SVV

3.4.1 Anteproyecto

Una vez seleccionado el sitio (figura 6), fue necesario la colocación de las SVV y un muro testigo que se encuentre bajo las mismas condiciones de temperatura y exposición a la radiación, por lo que se recurrió a:

- Se hizo una división del muro Oeste, donde se consideraron tres módulos en el área: en dos de ellos se sembró vegetación, y el último se trató del muro desnudo, el cual funcionó como área testigo.
- Selección de la vegetación para cada contenedor.
- Se hizo un fotomontaje que presentara una propuesta visual-arquitectónica para la elaboración de planos con las dimensiones de los contenedores.
- Mano de obra y montaje de contenedores. Que correspondieron a lo descrito en los planos.

3.5 Condiciones del sitio estudio.

3.5.1 Factor Vista de Cielo

De la misma manera que durante el desarrollo de las fichas de zonas climáticas, se realizó el estimado de Factor de Vista de cielo, para el cálculo se describen los pasos que se consideraron:



Figura 9. FVC Sitio experimentación, 2016.

- A través de un levantamiento fotográfico en la perimetro de estudio. Utilizando un lente de fish eye.
- Las fotografías fueron tomadas durante el período correspondiente a verano en un horario entre las 12:00 a 16:00 horas.
- En la circunferencia correspondiente a la fotografía, se monta una malla de 100 cuadros utilizando el programa Adobe Photoshop CC. Dicha malla, se utilizó para cuantificar el porcentaje de vista libre en las imágenes.
- Todo lo que dentro de la fotografía no corresponda al cielo diurno, se obscurece.
- Se contabilizan los cuadros que quedan sin obscurecer para conocer el porcentaje correspondiente de abertura.

3.5.2 Asoleamiento

Para realizar el análisis de asoleamiento en el sitio de estudio, fue necesario los siguientes pasos:

- Se recurrió a una gráfica de Movimiento Solar especialmente diseñada para Mexicali (A. Luna, comunicación personal, 11 noviembre del 2017), figura 10. En ella se detalla la proyección solar con el huso horario y la temporada del año.
- Se ubica al centro el elemento, en este caso el muro, donde se encuentran los prototipos y las líneas curvas, al centro nos indican el horario de exposición solar en diferentes meses del año.

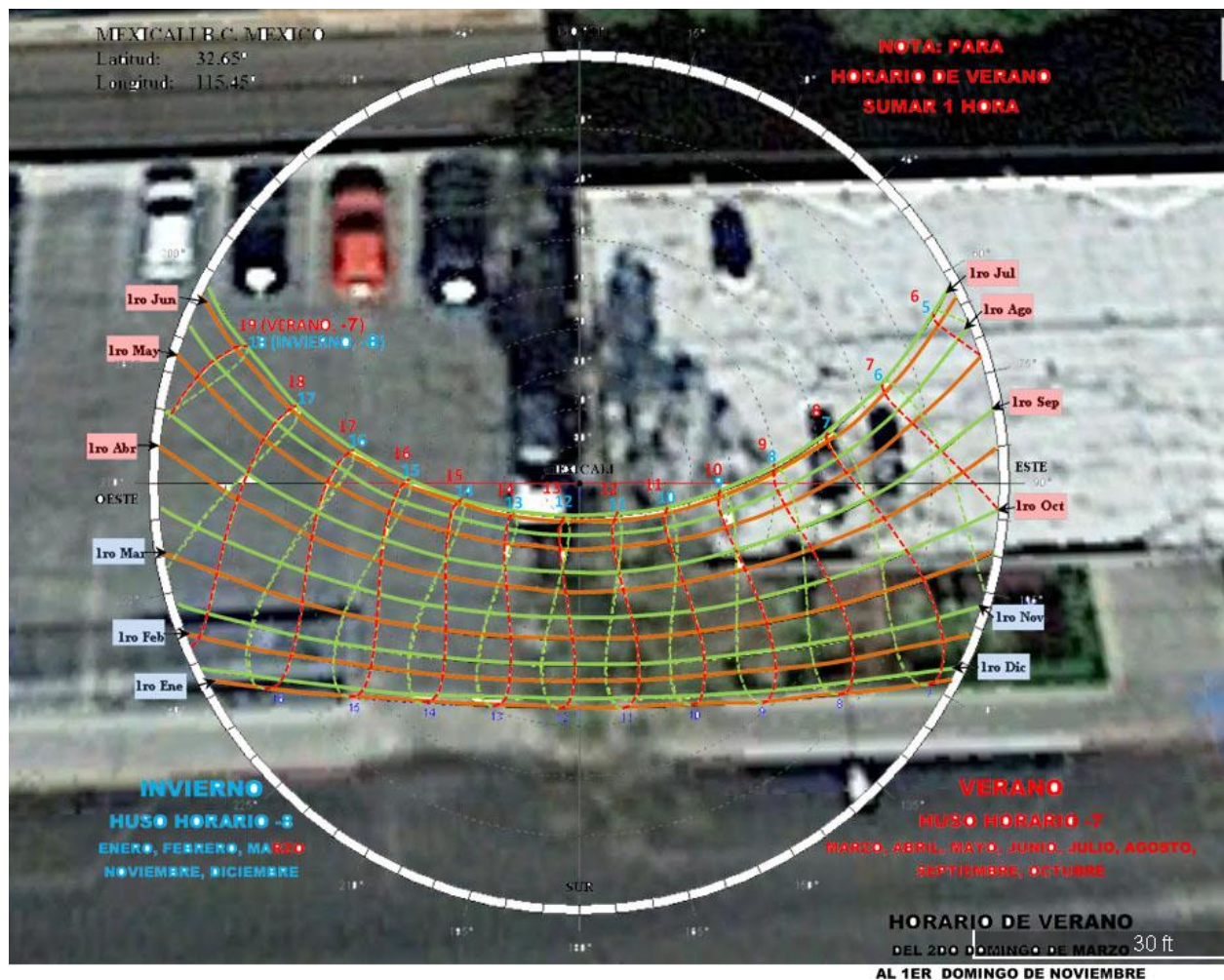


Figura 10. Asoleamiento Sitio, Google Earth, 2017.

3.5.3 Variables climáticas

Dentro del sitio, se colocó un equipo de almacenamiento de datos, el cual consiste en un Datalogger CR3000 (Campbell scientific), un par de probetas de temperatura y humedad relativa HMP-45C (Campbell scientific), así como termopares tipo T, adicional a estos equipos se colocó un radiómetro neto (NR-01) de manera vertical (paralelo al muro), que midió la radiación vertical directa al muro. Se montaron los equipos en los contenedores de la manera siguiente:



Figura 11. HMP-45C Campbell en SVV

- En el caso de la sonda HMP-45C, se colocó una frente a los contenedores y la otra detrás de la vegetación. La sonda de temperatura y humedad relativa permitió medir la temperatura del aire y la humedad relativa existentes antes y después de la SVV Figura 11.
- Se utilizó un Radiómetro NR-01 Campbell scientific, el cual se colocó de manera vertical a una altura de 2 m frente al módulo de SVV (Figura 12).
- Además, se recolectaron los datos de la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería, para referenciar y comparar las mediciones obtenidas en sitio.
- Se realizó comparación de los datos obtenidos por las mediciones de cada superficie. Se extrajeron los datos con el programa PC200W y se exportaron a Excel, mediante el cual, fue posible graficarlos para una comparación visual. Posteriormente, por medio del programa Statistical Version 12.0 se procesaron los datos de manera estadística.



Figura 12. Sitio de experimentación.

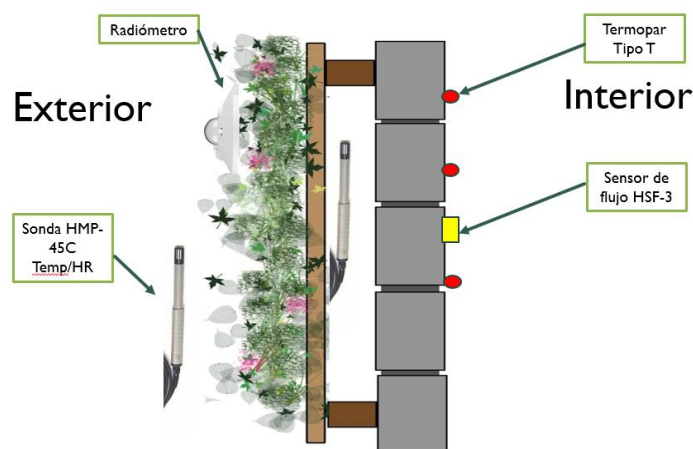


Figura 13. Diagrama de sección de muro, colocación de instrumentación en sitio de experimentación, sin escala.

3.5.4 Mediciones de flujo de calor

Además, fue necesario programar el datalogger, para ello se utilizó el programa PC200W (proporcionado por <https://www.campbellsci.es/pc200w>), el cual registró los datos promedio cada 10 min, acompañado por otro sistema de almacenamiento de datos datalogger utilizando el software DaqLab 14.0 (<https://www.mccdaq.com>) con sensores de flujo de calor HFS-3 Omega que de la misma manera midieron y registraron promedios cada 10 minutos.

- Mientras que los sensores de flujo de calor Omega HFS-3, se colocaron uno sobre cada área, es decir, uno sobre la pared cubierta por SVV y otro en MT.
- Para conocer la temperatura de las superficies, se emplearon termopares Tipo T, se colocaron tres en cada superficie. En un área aproximada de 1 m², dentro de cada módulo, así como en lo seleccionado como muro testigo (cuadro rojo figura 12) se ubicaron estos sensores.
- Se tomó un día soleado de verano para hacer la visualización de los datos obtenidos por los termopares contra lo fotografiado por una cámara térmica, que de la misma manera se graficaron y se compararon. Con ello se pretende inferir las influencias externas que afectan al sitio de estudio.

3.6 Vegetación

3.6.1 Selección de Vegetación

Para la selección de vegetación, se tomó en cuenta, principalmente:

- Los factores de asoleamiento, orientación y clima.
- Además, se toma en cuenta una tabla de vegetación para SVV (*Campos, 2016*). La cual recomienda especies vegetales capaces de vivir bajo las condiciones las SVV.
- Las especies en existencia de manera comercial.

3.6.2 Fisonomía

Para conocer la fisonomía de las especies, se desarrollaron fichas de vegetación (capítulo 4.3.2). En ellas:

- Se recopiló información de anteriores fichas existentes desarrolladas por *Peña (2000)*, *Venegas (1991)* y *Chong (1989)*. Estas fichas consideran las condiciones de ciertas plantas en la ciudad.
- Además de incluir información de la Sociedad de *Magnolia (2007)* y *Vogel (2002)*. Debido a que las plantas no son endémicas, sino adaptadas, era necesario conocer su lugar de origen y otros datos.
- Se buscó vegetación que soporte radiación mayor a 900 W/m^2 , debido a la orientación en la que serían ubicadas, además que soporte temperaturas mayores a los 30°C .
- Una de las características fisiológicas que se buscó, es el tamaño foliar. Debido a que es a través de las hojas como se retiene la mayor parte de la radiación, motivo por el cual, no era posible recurrir a especies endémicas, ya que la mayoría de ellas producen hojas pequeñas.
- También se recurre a especies medianas, principalmente por dos motivos, que fuera posible mantener una poda a un tamaño promedio de 2 m; y que el crecimiento de sus raíces no afectara los contenedores.
- Otra de las características que se buscó es el ancho del arbusto, esto para que dentro del largo del contenedor poder colocar varias especies sin comprometer el crecimiento.
- Aunque idealmente se definió que no requiriera una alta cantidad de agua, era difícil encontrar especies con foliar grande y de pleno sol que cumplan este requisito.

3.6.3 Estrés hídrico

Para conocer las necesidades de agua de la vegetación, se realizaron varias pruebas en laboratorio:

- Bouyoucos. Indica la estructura del suelo (*Naghdi, Solgi & Ilstedt, 2016; AS 09-NOM-021-REC NAT-2000*). Para su realización fue necesario recolectar 100 gr de suelo, tamizarlo en malla de 2 mm, colocar sólo 50 gr de suelo en un vaso precipitado, agregando adicionalmente 50 gr de Na_3PO_3 y una parte de agua destilada hasta aforar 1 l, dejar reposar 24 h. Posteriormente, colocar el contenido en una copa de dispersión que se agitó por 5min, inmediatamente después se vació el contenido en una probeta de 1250 ml, tapar con tapón hule, y agitar volteando de arriba hacia abajo 20 veces, después tomar mediciones en el segundo 40 y a las 2 horas, lo que indica la proporción de suelo en la estructura.
- Secado de crisoles (*AS-02-NOM-021-REC NAT-2000*). Tomar 100 gr de suelo, 2 horas después del riego, después pesar el crisol con el suelo, y anotar el resultado. Después de esto, colocar el crisol en un horno de secado durante 24 h. Pasado este tiempo, sacar el crisol y dejar reposar durante 24 horas más, una vez transcurrido ese tiempo pesar nuevamente y comparar los resultados. Con ello se obtiene el porcentaje de humedad en el suelo.
- Medición de riego. Durante 2 semanas se cuantificó el agua que se vierte durante el riego.
- Simulación en Chemfloo 2000. El programa simula el movimiento de líquidos en una estructura de suelo no saturado (*Herrada, Gutiérrez-Martin & Montanero, 2014*). Para ello, se colocaron los datos de riego, como lo son, cantidad de agua (20 l en este caso) estructura de suelo obtenida de la prueba de Bouyoucos (franco-arcillo-arenoso en proporción 1:3) y tiempo (24 h), adicional se asignó un rango de piso de 0.20 cm (*USDA, 1972*), que representa la profundidad de donde toman el alimento las plantas.

3.7. Flujos de calor internos del edificio

3.7.1 Calor antropogénico

La aportación de calor no depende únicamente de las condiciones meteorológicas de la ciudad, también está relacionado con los materiales de la edificación, el tipo de usuario y las actividades que se realizan en la edificación. Además las características físicas del usuario, actividades realizadas, género y tipo de vestimentas.

Sin embargo, para efectos de este trabajo, al ser un edificio de oficina, solo se consideran usuarios en un rango de edad de 18-65 años, complexión media, con ropa cómoda, actividad baja (oficinista), y jornada laboral de 8 horas de lunes a viernes, para su análisis. Para el cálculo de aportación de calor, se utilizaron los datos de flujo de calor proporcionado por *ASHRAE (2007)*, de los cuales se extrajeron los datos numéricos, seleccionando únicamente aquellos que cumplían con las características del experimento, por el tipo de usuario y el tipo de trabajo desarrollado.

3.7.2 Equipo de oficina

Además de los usuarios, también se levantó un inventario de los equipos eléctricos y electrónicos dentro de dichos espacios. Los datos numéricos se tomaron de *NOM-007-ENER-2014*, considerando que se trató de un edificio de oficinas. Se consideró el tiempo de uso (jornada laboral de 8 horas)

3.7.3 Comportamiento térmico edificio

Para el análisis de este trabajo, solo se consideró el espacio inmediato próximo a los contenedores de la edificación (señalado con líneas diagonales, figura 14). Este espacio de 37.6m², se trata de dos cubículos destinados a almacenajes de archivos y oficina.

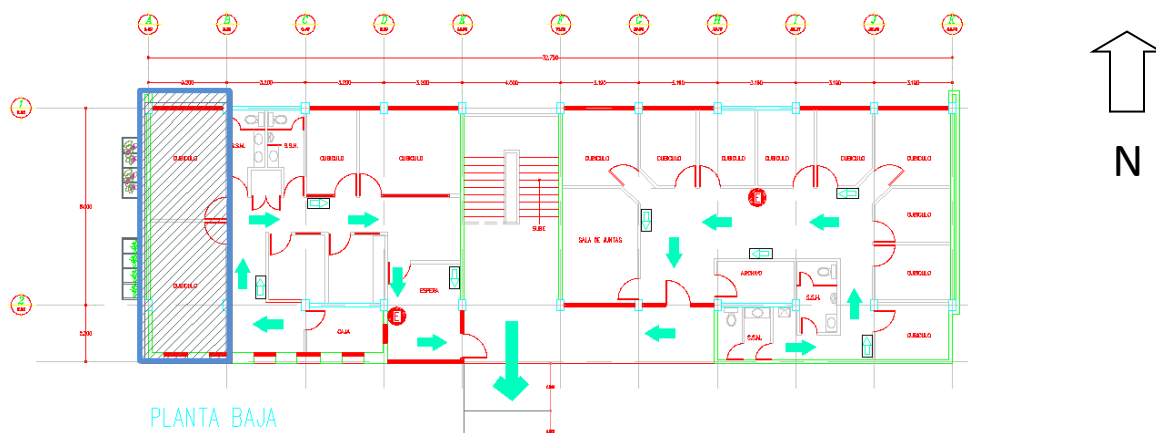


Figura 14. Plano Edificio de Tesorería, UABC.

3.8 Análisis estadístico

Para analizar los datos y poder discutirlos, se utilizaron pruebas de medias y varianzas (ANOVA) comparando las medias cuadráticas de los datos obtenidos (promedios horarios diurnos), a través del uso del programa Statistica. Para ello, se realizó la prueba Kolmogorov Smirnov, Hotteling y la Shapiro-Wilk, elaborando gráficas de probabilidad normal, cajas y bigotes y gráficas de comportamiento. Adicional, se realizaron la prueba Duncan para conocer la diferencia entre pares y determinar la magnitud de las diferencias.

Con los resultados obtenidos del análisis de varianza (ANOVA), se compararon las medias entre instrumentos, es decir, se hace la comparación entre termopares, sensores de flujo, sondas de temperatura y radiómetros. Para conocer las diferencias estadísticas entre cada uno.

Una vez obtenidos los datos, se tomaron promedios horarios de la temporada para realizar una prueba Duncan, con las que se conocen la diferencia cuantitativa en las medias entre el muro testigo y los SVV. Además de graficar los datos promedio horarios de la temporada.

Con los datos obtenidos de las mediciones de variables en sitio (específicamente con los flujos de calor), se hizo un comparativo entre MT y SVV, lo que dió como resultado una diferencia entre el flujo de calor (MT-SVV), con la que fue posible calcular en kWh la energía térmica que no ingresa al interior de la pared si se utiliza la SVV y que no es necesario contrarrestar con el equipo de aire acondicionado, lo que permitió además calcular las cargas evitadas de CO₂eq.

3.9 Cámara termográfica

Se utilizó una cámara termográfica como una técnica de contraste puntual para conocer el comportamiento de contrastes térmicos para un solo día, tanto en el área SVV y MT. A través del uso de una cámara termográfica, fue posible visualizar la diferencia entre las superficies.

Para ello se utilizó una cámara marca FLIR modelo T620, a una distancia de 8 m frente al módulo de SVV y el MT, de tal manera, que en la toma aparecen las dos superficies. Se tomó una foto cada hora durante el asoleamiento (12:00 a 19:00 h) y, a través del programa FLIR RESEARCH STUDIO, se procesaron las imágenes.

El instrumento tiene como ventaja, que estima un promedio de temperatura del área seleccionada, la cual es seleccionada por el usuario a través del programa FLIR RESEARCH STUDIO. Por lo que, en una sola imagen fue posible comparar ambas superficies.

Sin embargo, el instrumento tiene la desventaja de que al ser las superficies del follejo poco homogenicas y no encontrarse de manera perpendicular al lente de la cámara, no se puede considerar representativo.

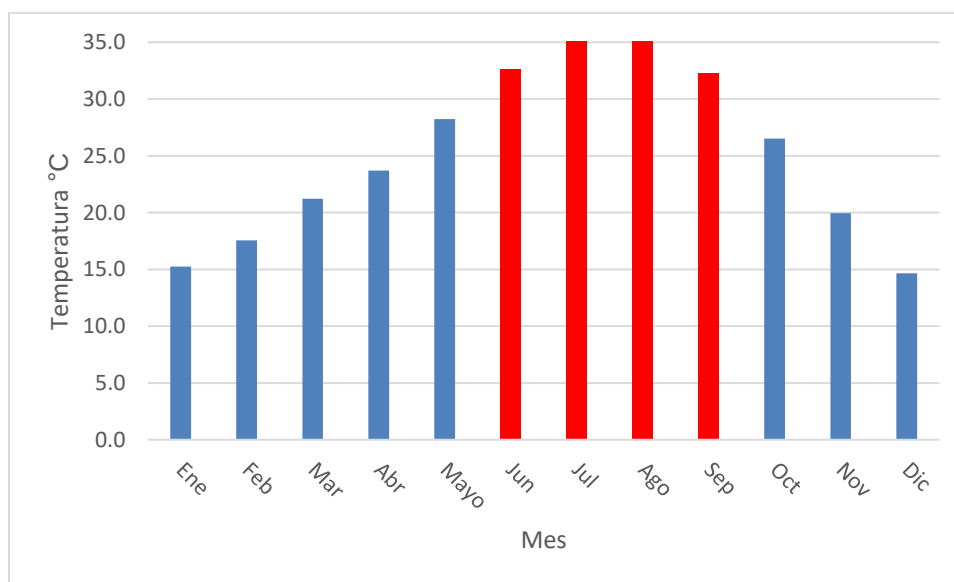
CAPITULO 4. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tanto de los análisis estadísticos y del procesamiento de los datos proveniente de los instrumentos de medición utilizados.

4.1 Factores externos

4.1.1 Temperatura del aire

A continuación, se presenta la gráfica 2, correspondiente a los resultados de los promedios mensuales del periodo del 2001 al 2016 de temperatura de aire obtenida de la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería en la UABC. En la Gráfica se observa que las temperaturas correspondientes a los meses de junio a septiembre son superiores a los 30 °C. Adicionalmente se presenta la siguiente tabla 3 con los promedios diarios del mismo periodo de 16 años.



Gráfica 2. Temperatura del aire promedio mensual 2001-2016.

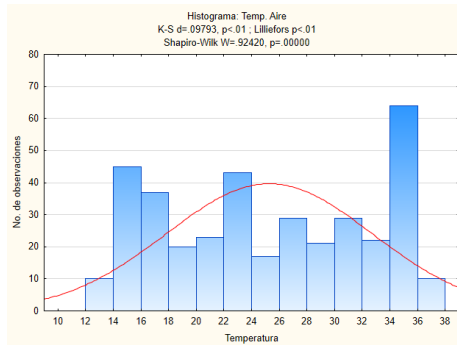
Tabla 3. Temperatura del aire promedio diario 2001-2016

Año 2001-2016												
Temperatura del Aire Promedio Diario												
Día	Ene	Feb	Mar	Abr	Mayo	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	12.9	16.8	17.6	22.9	26.1	32.4	35.4	34.9	35.8	30.8	23.9	15.3
2	13.8	16.4	18.0	22.1	26.4	31.7	35.8	34.6	35.4	30.0	23.0	15.8
3	14.4	16.7	18.4	22.1	27.1	31.7	35.1	35.6	35.8	29.9	22.1	16.3
4	14.0	17.6	18.6	22.4	27.2	31.9	34.9	35.9	34.7	28.1	22.2	15.5
5	14.4	17.9	18.8	22.2	26.5	31.2	34.2	35.5	33.7	26.1	21.8	15.2
6	14.8	17.5	19.1	22.3	25.9	31.1	34.4	36.0	33.9	26.0	22.0	16.0
7	15.0	17.0	18.8	22.7	26.1	31.4	35.0	35.8	33.3	26.7	21.9	16.7
8	15.9	17.4	19.5	21.6	26.5	31.1	35.6	34.9	33.0	27.7	21.5	16.5

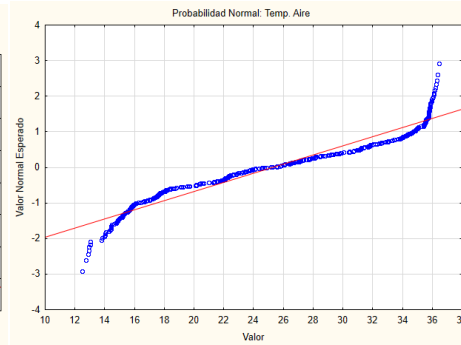
Año 2001-2016												
Temperatura del Aire Promedio Diario												
9	16.1	17.6	20.3	22.1	27.1	30.4	35.7	35.0	32.3	28.1	20.6	15.5
10	15.3	17.0	21.0	22.4	27.3	30.7	35.9	35.4	31.8	27.5	20.1	15.7
11	15.4	17.2	21.3	22.7	27.8	31.2	35.8	35.8	32.6	26.8	19.7	15.7
12	15.2	17.3	21.4	22.9	28.7	31.4	35.9	35.8	33.4	26.6	19.1	15.2
13	14.6	17.6	22.0	23.9	29.5	31.9	36.1	36.0	33.0	27.1	19.7	15.2
14	14.9	17.7	22.4	23.7	29.6	32.5	36.0	35.8	32.7	27.8	20.4	14.9
15	14.9	18.1	22.0	22.4	28.5	33.0	35.8	35.5	32.9	28.2	20.5	14.5
16	15.0	17.6	22.1	23.3	29.0	33.1	36.3	35.5	32.2	27.2	20.1	14.0
17	15.4	18.1	22.3	23.4	29.2	33.8	36.3	35.6	31.8	27.1	20.3	14.0
18	15.8	18.2	21.5	23.9	29.3	34.1	36.3	35.5	31.8	26.6	20.1	13.8
19	15.2	17.8	21.4	24.1	29.8	34.2	35.8	35.2	32.0	26.4	20.1	14.1
20	15.6	17.7	22.1	24.5	29.7	33.5	35.7	34.8	31.8	26.4	20.1	14.4
21	15.7	17.7	22.6	24.6	28.8	33.3	36.1	34.6	30.9	25.9	19.3	14.3
22	15.9	18.0	22.4	23.7	27.7	33.8	36.2	34.5	30.7	25.9	18.7	14.4
23	15.9	17.3	21.7	23.5	27.4	34.3	35.8	35.0	30.7	25.8	18.4	14.8
24	15.8	17.5	22.1	24.4	28.0	34.0	35.6	35.5	31.2	25.6	18.1	14.8
25	15.9	17.6	22.9	24.9	28.2	34.3	35.5	35.4	31.1	25.2	18.2	14.4
26	15.6	18.1	22.6	24.7	28.4	34.9	35.8	35.7	31.0	24.1	17.6	12.9
27	15.7	17.7	22.3	25.6	29.0	34.0	36.1	36.1	30.5	23.5	17.2	12.5
28	15.7	18.3	22.8	26.1	29.3	34.2	35.6	36.5	29.9	23.8	17.4	12.7
29	16.1	17.8	23.0	25.8	29.1	34.0	34.7	35.9	31.4	23.9	16.9	13.0
30	15.9		23.4	25.3	30.5	33.5	34.7	34.7	31.3	23.3	17.0	13.0
31	16.0		23.2	28.2	31.7	27.9	34.4	35.1	27.0	23.7	20.6	12.9
Promedio mensual	15.3	17.6	21.2	23.7	28.2	32.6	35.6	35.4	32.2	26.5	20.0	14.6
Desviación Standar	0.7	0.5	1.7	1.5	1.4	1.6	0.6	0.5	1.8	1.9	1.8	1.2
Mediana	15.4	17.6	22.0	23.5	28.4	33.0	35.8	35.5	32.0	26.6	20.1	14.8
Minimo	12.9	16.4	17.6	21.6	25.9	27.9	34.2	34.5	27.0	23.3	16.9	12.5
Maximo	16.1	18.3	23.4	28.2	31.7	34.9	36.3	36.5	35.8	30.8	23.9	16.7
Varianza	0.6	0.2	2.9	2.2	2.0	2.5	0.4	0.3	3.3	3.6	3.3	1.3
Sesgo	-1.3	-0.7	-0.8	1.0	0.2	-0.8	-0.9	-0.2	-0.2	0.2	0.1	-0.2
Curtosis	1.8	0.3	-0.7	1.4	-0.4	0.9	-0.2	-0.7	1.4	0.0	-0.5	-0.8

En la tabla 3, se aprecia que, a partir de los dos últimos días de mayo, se presentan temperaturas promedio superiores a 30 °C y de la misma manera los primeros días de octubre. Adicionalmente se presentan los resultados de estadística básica, donde se colocaron los datos de los promedios mensuales, de donde la media anual es 25.28 °C.

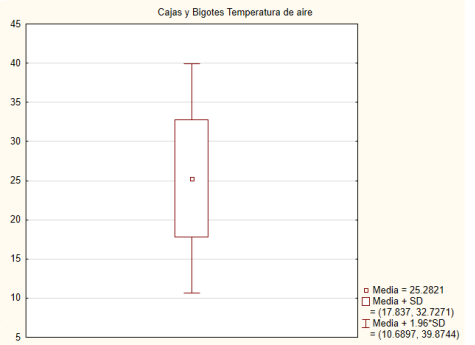
Se realizó también el análisis estadístico, que se muestra en las gráficas 3 a 6, con una prueba de Kolmogórov-Smirnov con una $d= 0.97$ y $p<0.01$ indicando que los datos en la muestra están distribuidos de manera no paramétrica.



Gráfica 3. Histograma Temp Aire.



Gráfica 4. Probabilidad normal Temp Aire.



Gráfica 5. Cajas y bigotes Temp Aire.

4.1.2 Caracterización de vientos predominantes

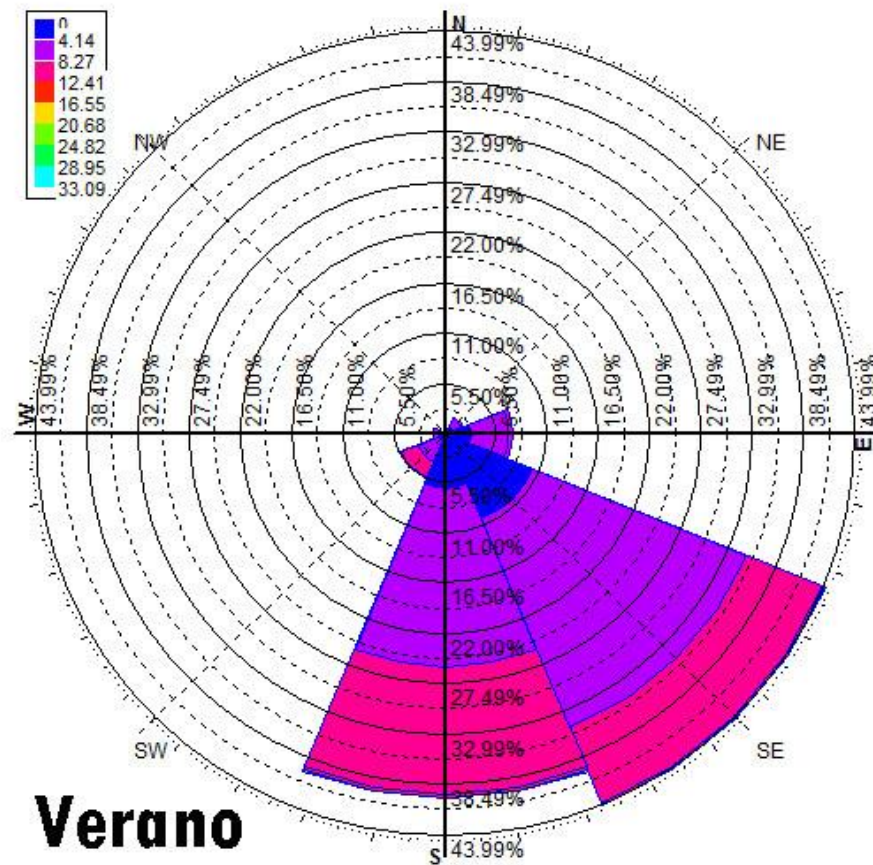
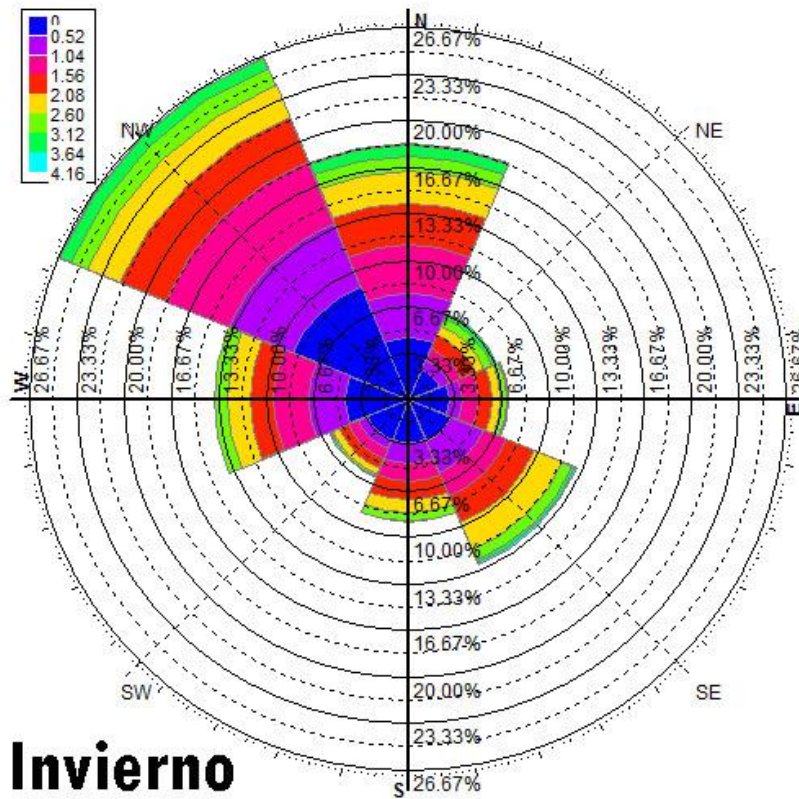


Figura 15. Rosa de vientos para el periodo de verano en Mexicali. Datos promedio horario del Inst. de Ingeniería 2001-2016.

En verano (figura 15), se puede generalizar que el viento tiene una dirección con proveniente del sureste, con una frecuencia del 43.99% para la velocidad promedio de 4.14 m/s. Sin embargo, también se observó que, si se realiza un análisis anual, los años 2005, 2006, 2011 modificaron su comportamiento ligeramente, cambiando la dirección desde el sur, con una frecuencia de 36.3% para velocidades menores a 3 m/s. El resto, con 19.71%, se dispersa entre el suroeste y el este, con una velocidad menor de 8.27 m/s. La dirección de viento del promedio de 16 años, proveniente del sureste, y se observó que el 27.25% presentó velocidades en un rango entre 8.27 a 12.41 m/s, mientras que la mayor parte 52.28% presentó un rango que va de 4.14 a 8.27 m/s y el restante 20.47% es de rango menor a los anteriores entre 0 a 4.14 m/s

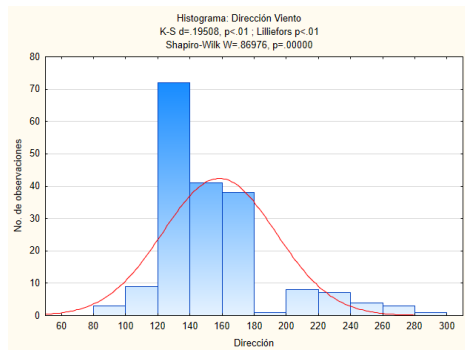


Invierno

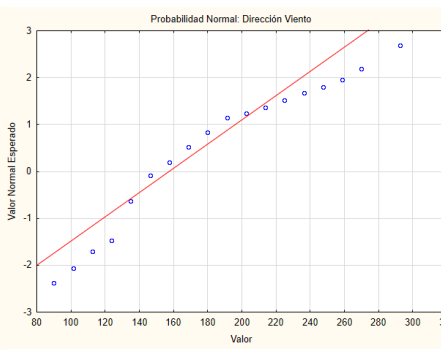
Figura 16. Rosa de vientos invierno Mexicali, datos promedio horario Inst. de ingeniería 2001-2016

En invierno (figura 16), el comportamiento se invierte, relativo a lo que se presenta en el verano. Por lo que se observa que la dirección predominante es del noroeste con una frecuencia de 26.67%, para la velocidad de 3.12 m/s, pero el comportamiento es más irregular que en verano. La segunda dirección de viento sobresaliente de la temporada es del norte con un de 20% en una velocidad de 2.8 m/s y después en dirección desde el oeste, con un 14%, en una velocidad de 1.56 m/s. También aparece con 11.5% de velocidad 0.52 m/s en dirección desde el sureste. El restante 27.83% de velocidad de 3.64 m/s se divide en tres direcciones (noroeste, este y suroeste). La dirección predominante desde el noroeste presentó vientos máximos de 3.64 m/s.

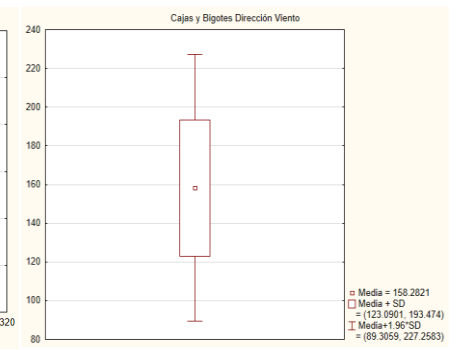
Además de las rosas de vientos se realizó el análisis estadístico de los datos, dividiéndolo en dos variables: dirección de vientos y velocidad de viento. Los resultados de dirección de viento se muestran en las gráficas 6-8, con una prueba de



Gráfica 6. Histograma Dir. Viento



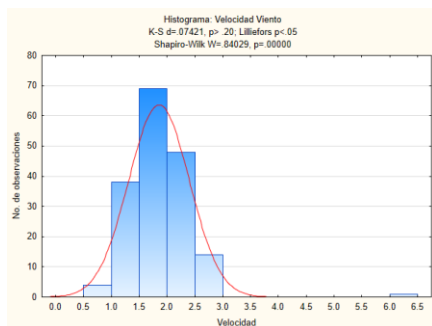
Gráfica 7. Probabilidad normal Dir. Viento.



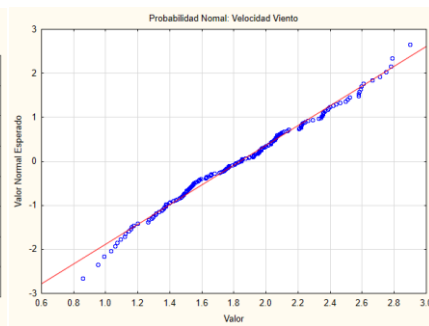
Gráfica 8. Cajas y bigotes Dir. Viento.

Kolmogórov-Smirnov con una $d= 0.95$ y $p<0.01$ lo que indica una distribución no paramétrica, que presenta una media, en la figura 8, de 158.28° .

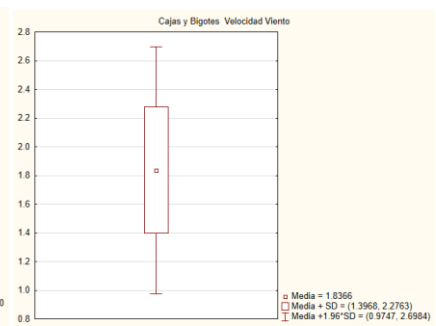
En las gráficas 9-11, se presentan los resultados estadísticos de la velocidad de viento, donde la prueba Kolmogórov-Smirnov con $d=0.74$ y $p>0.20$, lo que indica una distribución no paramétrica, con una media de 1.83 m/s.



Gráfica 9. Histograma Vel. Viento.



Gráfica 10. Probabilidad normal Vel. Viento.

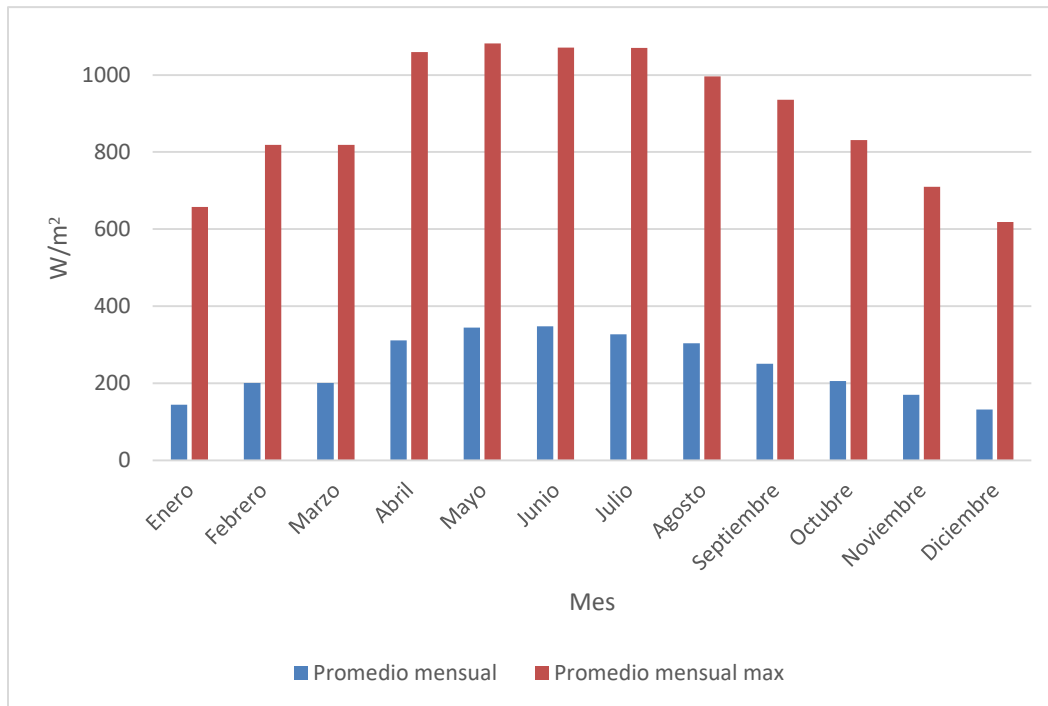


Gráfica 11. Cajas y bigotes Vel. Viento.

4.1.3 Radiación solar global

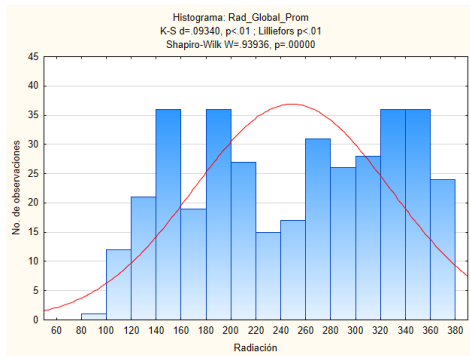
De la misma manera que con las variables anteriores, se realizó el análisis gráfico y estadístico de la radiación solar del 2000-2016, éste se dividió de dos maneras, radiación solar global promedio: mensual y máximo mensual.

En la gráfica 12 se observa que la radiación solar global máxima presenta magnitudes mayores a 1000 W/m² en promedio desde el mes de abril hasta junio, donde la mayor magnitud ocurre en el mes de mayo con un promedio de 1082.1 W/m². Mientras que la radiación global promedio, el valor mayor se da en junio con 347.56 W/m².

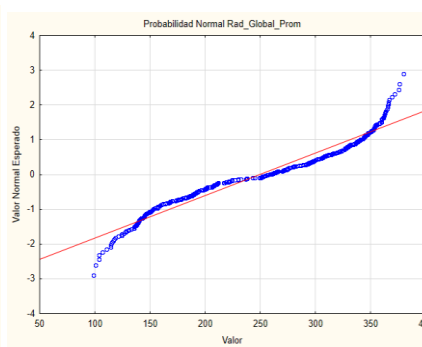


Gráfica 12. Gráfica radiación solar global promedio/promedio máximo mensual 2000-2016

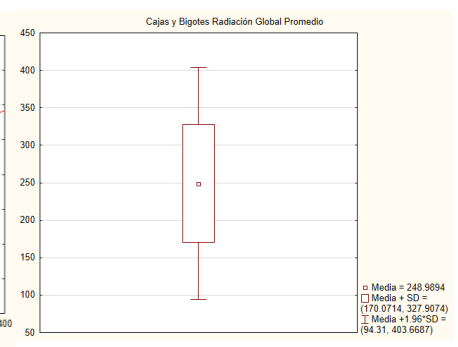
Adicional se realizó el análisis estadístico básico para los datos antes presentados, de la misma manera se dividieron los datos en los dos grupos anteriores, de los cuales se obtuvieron las siguientes gráficas:



Gráfica 13. Histograma Rad Global.

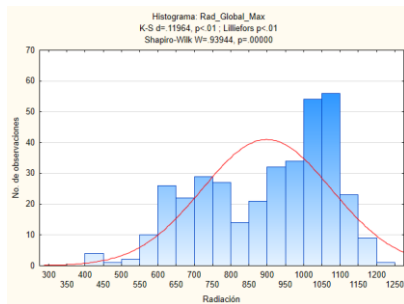


Gráfica 14. Probabilidad normal Rad Global.

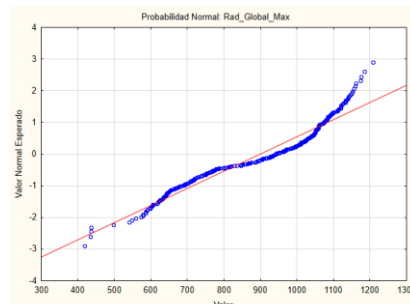


Gráfica 15. Cajas y bigotes Rad Global.

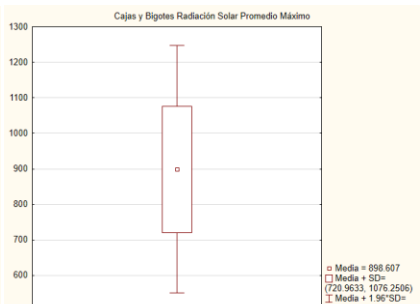
Donde las gráficas 13 histogramas de radiación global, gráfica 14 probabilidad normal de radiación global y gráfica 15 cajas y bigotes de radiación global, muestran el comportamiento de probabilidad no paramétrico de los datos, ya que los extremos se alejan de la normalidad. Y, por último, en la figura 15, se muestran los resultados de la prueba Kolmogórov-Smirnov con una $d=0.93$ y $p<0.01$.



Gráfica 16. Histograma Rad Global Máx.



Gráfica 17. Probabilidad de normalidad Rad Global Máx.



Gráfica 18. Cajas y bigotes Rad Global Máx.

En las gráficas 16-18, se observa el comportamiento de los promedios máximo de la radiación global solar. La gráfica 16, muestra el resultado de la prueba Kolmogórov-Smirnov, con una $d=0.1196$ y una $p<0.01$. En la gráfica 17, se muestra el resultado de la prueba de normalidad de los datos y por último en la gráfica 18, se muestra la gráfica de cajas y bigote, donde indica que la media de los datos es 896.607 W/m^2 .

En total, se obtuvieron 15 fichas de LCZ (figura 18). Donde:



Figuras 18. Ficha de zonificación parcial climática local (LCZ).

En esta zona de Mexicali (Tabla 4), podemos encontrar cinco niveles de urbanización, señalados con números y cuatro zonas climáticas, marcadas con letra, que son:

Tabla 4. Clasificación parcial climática, Oke & Stewart, 2012.

	2	3	5	6	9
A			Edificios de mediana altura, abundante vegetación, poca pavimentación.		Escasos edificios, suelo natural o pasto, abundante vegetación.
B			Edificios de mediana altura, arbustos y árboles dispersos, cobertura mediana de concreto.		
C		Edificios de poca altura, cubierta de concreto y pavimento. Arbustos cortos y leñosos.		Edificios de poca altura, distanciados, abundante vegetación y materiales de construcción a base de ladrillo.	
E	Densa mezcla de edificios, pocos árboles, cubiertas de concreto y pavimento.	Edificios de poca altura, cubierta de concreto y pavimento. Pocos árboles, cubiertas de rocas o suelo natural.			

La zona dominante en el kilómetro circundante del área de estudio es la 9A con un 26.66%, seguida de la zona 3C con un 20%, después las zonas 3E, 5A y 5B con un 13.33% respectivamente y por último las zonas 2E y 6C con un 6.66%. Cómo se muestra en la figura 19:

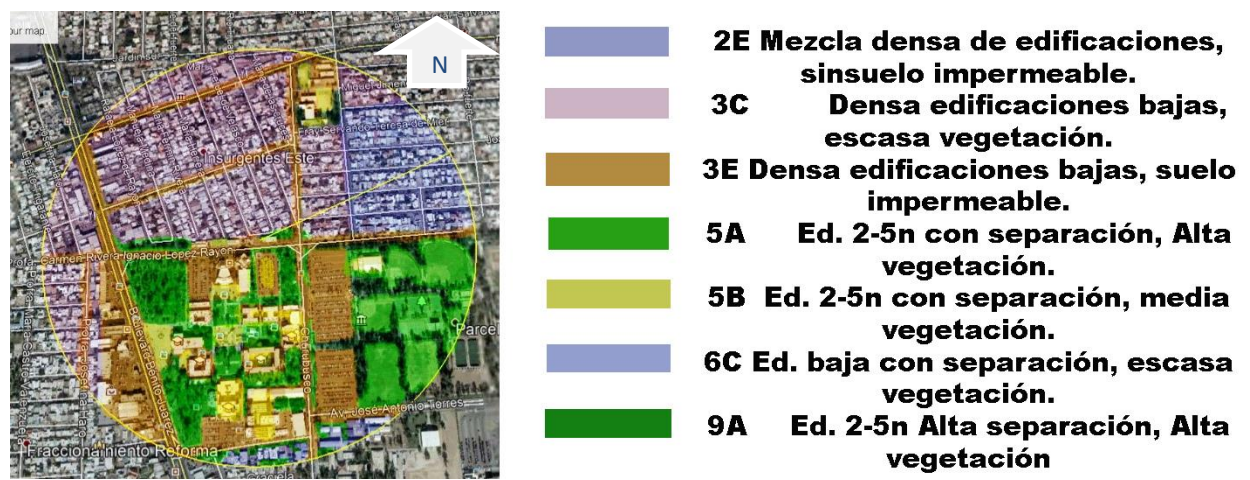


Figura 19. Mapa zonificación parcial climática, Google Earth, 2017.



En la figura 20, se observa como el asoleamiento es directo en el sitio de experimentación, puesto que prácticamente no existen obstáculos que bloqueen la vista de cielo. A excepción de edificios que se encuentran a los alrededores, por lo que a ciertas horas generan sombra. Se puede establecer que el asoleamiento es de un 75% en el sitio, de acuerdo a la metodología de Stewart & Oke (2012) (Capítulo 3.5.1 Factor Vista de Cielo).

Figura 20. Vista de Cielo, Sitio.

Se observa que el asoleamiento, sin importar la época del año se va a dar en el sitio a partir del mediodía, hasta la puesta del sol. En el horario de verano, a partir de la 13:00 horas. Esto es posible visualizarlo de manera más clara en la figura 21.

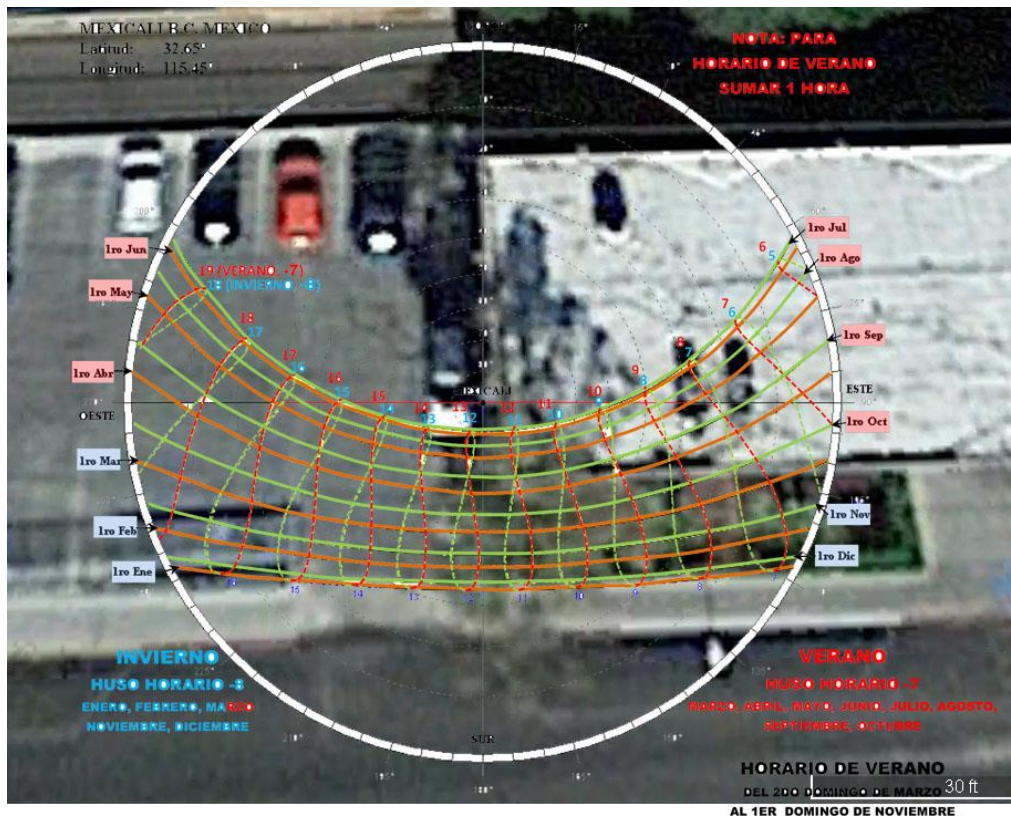


Figura 21. Asoleamiento en sitio experimental.

Al centro de la figura 21, se coloca el muro donde se ubicó el experimento, a través de la gráfica de movimiento solar se observa el asoleamiento en los espacios, donde las líneas verticales representan las horas del día y las líneas en horizontal los meses del año. Se observa que el asoleamiento se da a partir de mediodía, derivado de la orientación del muro (Oeste), tanto en verano (1:00 pm) como en invierno (12:00 pm).

4.2.1 Sitio de análisis

El sitio debió cumplir ciertas características que se mencionan en el capítulo correspondiente a la metodología. De los tres posibles sitios se eligió el edificio de tesorería UABC, Campus Mexicali.



**Figura 22. Edificio Tesorería, UABC
Campus Central.**

El sitio se encuentra sobre la calle López Rayón entre Blvd. Benito Juárez y Calle Churubusco, figura 22. Con una construcción a base de muros de concreto armado y entepiso de casetones de concreto, del cual se utilizó el muro Oeste para colocar el módulo de SVV.

Se buscó que dicho muro presentara una exposición solar durante las horas críticas en verano (12:00 – 18:00 h), además de las características de la construcción, el lugar seleccionado tiene la función de ser un estacionamiento, por lo que el suelo es una plancha de concreto de 10 cm de grosor aproximadamente.

4.2.2 Periodo de estudio

4.2.2.1 Campaña 1

Si bien, el estudio se tenía contemplado para verano (21 de mayo al 22 de septiembre), tomando en cuenta las gráficas obtenidas en la caracterización climática, se decidió hacer un ajuste, quedando de la siguiente manera, tabla 5:

Tabla 5. Periodo de estudio, campaña 1.

Meses				
Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
15	Periodo de Estudio			15
	21	Verano		22

Se tomaron mediciones a partir del 15 de mayo, debido a que se presentaron temperaturas mayores a los 30 °C en promedio diario, y radiación global máxima por arriba de los 900 W/m², por lo que el periodo de estudio se recorrió unos días.

Con la idea de visualizar cómo reaccionan tanto las plantas como el flujo de calor, y el cambio estacional, se inició el registro de datos antes del 21 de junio. Resultando en un periodo que abarca del 15 de mayo al 15 de septiembre del 2018 para la Campaña 1.

4.2.2.2 Campaña 2

Lo correspondiente para la Campaña 2, son los datos para el periodo del 8 de noviembre al 21 de marzo (tabla 6), donde se tomaron los meses que presentan temperaturas promedio menores a 30 °C y radiación global promedio máxima menor a 850 W/m².

Tabla 6. Periodo de estudio, campaña 2.

Meses				
Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
8	Periodo de Estudio			21

De la misma manera que en la campaña anterior, se contempló el periodo transitorio de otoño a invierno, así como el invierno completo. Por lo que se decidió extenderse en el periodo de estudio, considerando un total de 98 días.

4.2.2.3 Campaña 3

La campaña 3, al ser otra campaña de verano, se realizó durante la temporada cálida abarcando las siguientes fechas, tabla 7:

Tabla 7. Periodo de estudio, campaña 3.

Meses				
Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
30	Periodo de Estudio			1

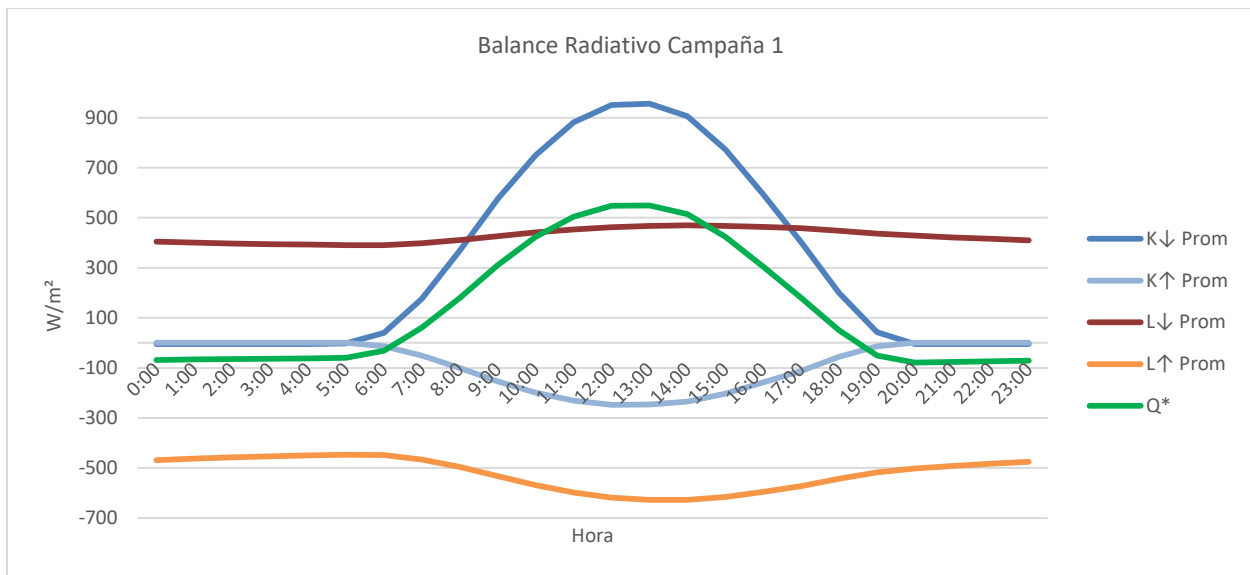
4.2.3 Microclima en sitio

Mediante los equipos de medición ubicados en el sitio experimental fue posible conocer el comportamiento de las variables climáticas en la SVV y MT. Las variables medidas fueron las siguientes: temperatura del aire, humedad relativa y radiación vertical (incidente sobre el muro).

Derivado de las diferencias encontradas en las mediciones, se realizó una comparación entre SVV y MT; respecto a los datos de la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería ubicada a 400 m del lugar, al ser la que se encuentra más cercana al sitio de experimentación, dentro de la zona de estudio, considerando que dentro del sitio de experimentación, las condiciones microclimáticas no varían de un punto a otro.

4.2.3.1 Balance radiativo

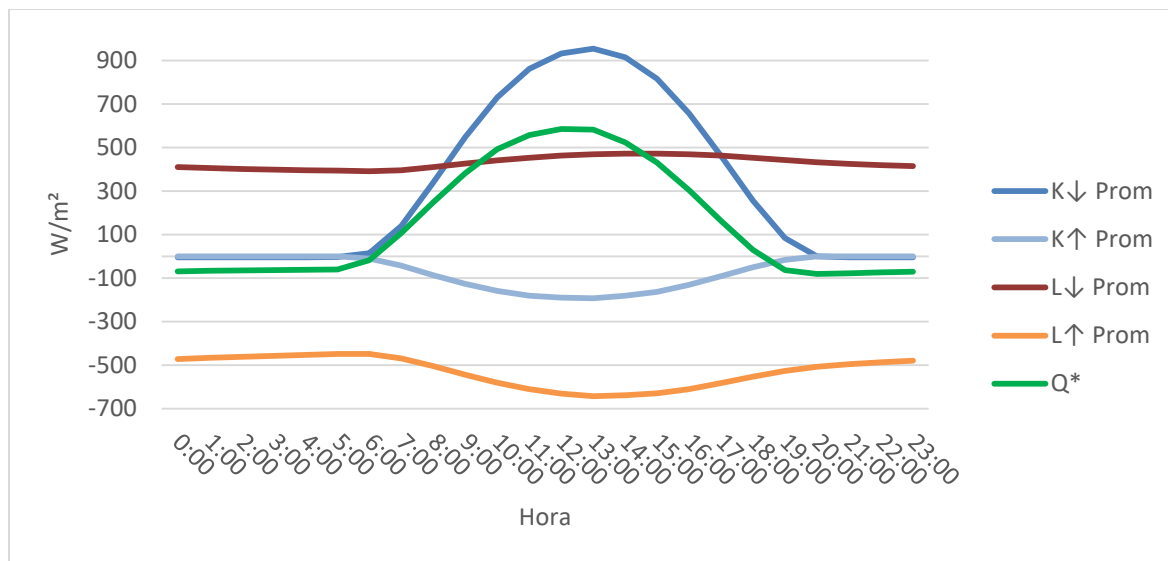
Se realizó un balance radiativo con los datos obtenidos de un radiómetro NR-01 localizado en el Instituto de Ingeniería. Se consideraron los datos de las Campañas 1 y 3 en promedios horarios, lo anterior con el propósito de establecer un análisis energético y de emisiones de GEI en las temporadas cálidas.



Gráfica 19. Balance radiativo, promedio horario – Campaña 1 (verano 2018)

La gráfica 19, muestra el comportamiento de las componentes, donde $K_{\downarrow}$ registró un valor promedio máximo de 955.3 W/m^2 , $K_{\uparrow}$ un valor máximo promedio de -246.5 W/m^2 , $L_{\downarrow}$ un valor máximo promedio de 467.9 W/m^2 y por último $L_{\uparrow}$ muestra un valor máximo promedio de -627.3 W/m^2 .

El comportamiento de Q^* fue el esperado, con valores negativos durante la noche hasta las 6:00 h. Se obtuvo un valor máximo promedio de 549.05 W/m^2 presentándose a las 13:00h, y de nuevo baja hasta valores negativos una vez que se oculta el sol a las 19:00h.



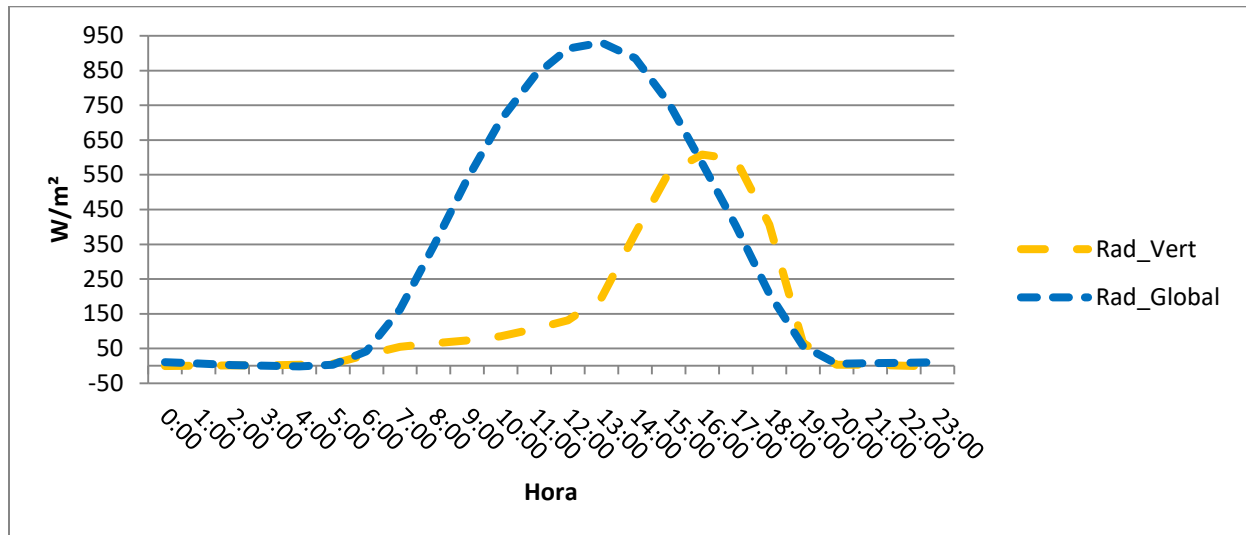
Gráfica 20. Balance radiativo, promedio horario – Campaña 3 (verano 2019)

La grafica 20 muestra los datos correspondientes a la Campaña 3, los valores máximos en sus componentes fueron, para $K_{\downarrow}$ 954.01 W/m^2 , en $K_{\uparrow}$ -192.8 W/m^2 , para $L_{\downarrow}$ 472.05 W/m^2 y en $L_{\uparrow}$ -642.03 W/m^2 . Y Q^* con valores negativos durante las primeras horas del día y después de las 19:00 y positivo durante el horario diurno, presentando una máxima promedio de 582.34 W/m^2 .

4.2.3.2 Incidencia de radiación solar en el muro

Para la medición de esta variable se utilizó un radiómetro NR-01 ubicado en el sitio experimental. Éste se colocó de manera vertical para cuantificar la incidencia de la radiación solar en el muro con orientación oeste, y conocer el porcentaje de la radiación

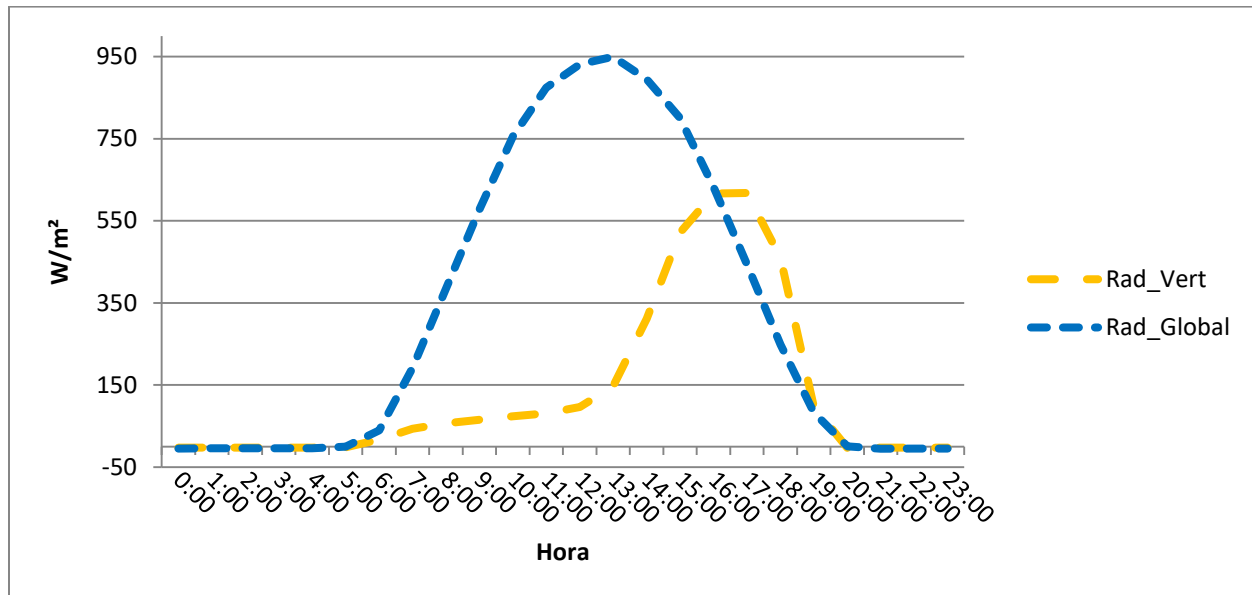
incidente (en sitio experimental) respecto a la global (datos obtenidos de las mediciones del Instituto de ingeniería).



Gráfica 21. Radiación Global (W/m^2) y Radiación Vertical (W/m^2) - Campaña 1 (verano 2018)

En la gráfica 21, se aprecian los datos promedios horarios de la Campaña 1 (15 mayo al 15 de septiembre) de la radiación total (datos obtenidos de la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería, en azul) y en sitio (sensor NR-01, en amarillo). Donde la Radiación global (Rad_Global) alcanza un valor promedio máximo de 930.7 W/m^2 , si se compara con la Radiación en sitio (Rad_Vert), se registran valores promedio máximo de 583.8 W/m^2 ; para conocer el porcentaje de la radiación solar incidente sobre el muro respecto a la radiación global, se realiza un cálculo de aproximación de área bajo la curva. Donde

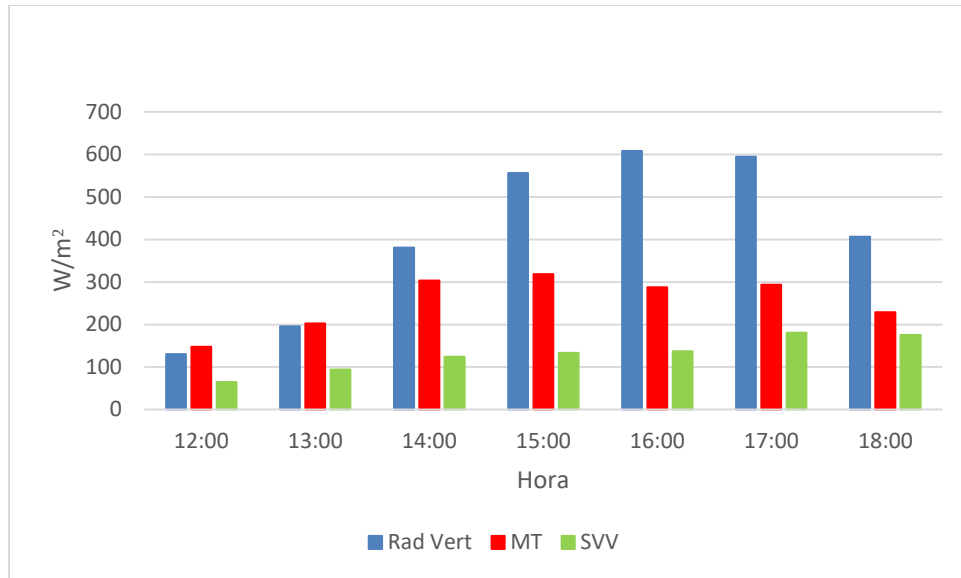
la radiación vertical (3373.23 Wh/m^2) corresponde a 45.5% de la radiación global (7423.5 Wh/m^2) durante la campaña 1.



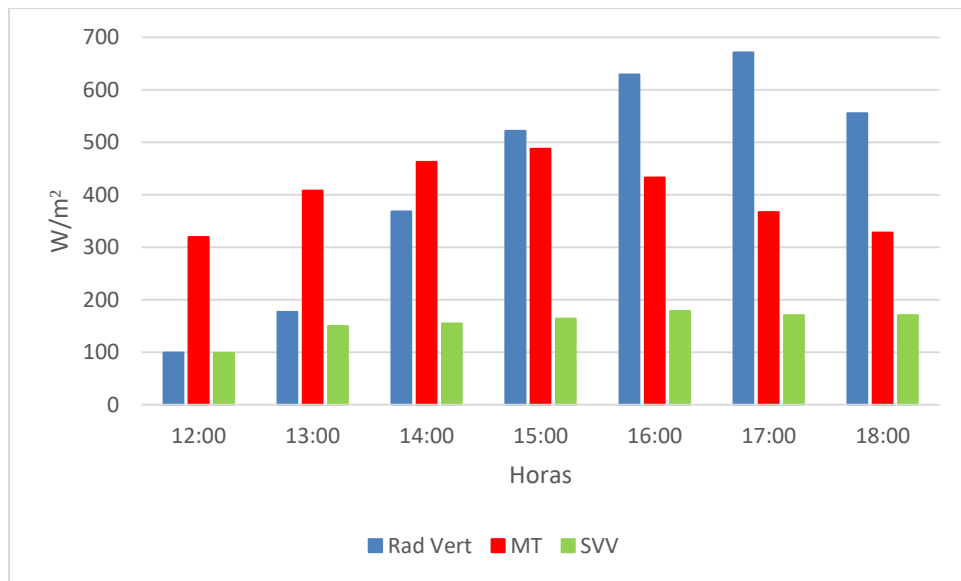
Gráfica 22. Radiación - Campaña 3 (verano 2019)

En la gráfica 22, se observa el comportamiento de la radiación y la incidencia sobre el muro, durante el verano del 2019. La radiación global (Rad_Global) alcanza un promedio máximo de 955 W/m^2 , mientras que la radiación incidente sobre el muro (Rad_Vert) registró un valor promedio máximo de 671 W/m^2 ; al comparar ambos valores, la radiación incidente corresponde al 40.89%.

Las gráficas 23 y 24 presentan la radiación vertical incidente promedio horaria y las proporciones de los flujos de calor entrante por los módulos de SVV y MT respecto a la radiación vertical.



Gráfica 23. Comparación Radiación Vertical/MT/SVV – Campaña 1.



Gráfica 24. Comparación Radiación Vertical/MT/SVV – Campaña 3.

De azul, la radiación vertical incidente directa sobre el muro oeste (Rad Vert), en color rojo, el calor absorbido por MT y lo mismo, pero para SVV en verde. La idea de estas gráficas es que permita visualizar la energía que es absorbida por el muro en ambos casos, de tal manera, que en los horarios donde la radiación solar es directa, 12:00h a 18:00 h se observa que el flujo de calor de MT es mayor que SVV. Lo que nos indica que, durante este horario, es donde la mayoría de la energía es absorbida, almacenada e irradiada por los materiales, en el muro y sus alrededores. Los porcentajes que se muestran en la tabla 8 son resultado de normalizar MT y SVV respecto a Rad Vert.

Particularmente en el caso de la campaña 3, se consideraron los datos obtenidos de los días con el elemento arquitectónico.

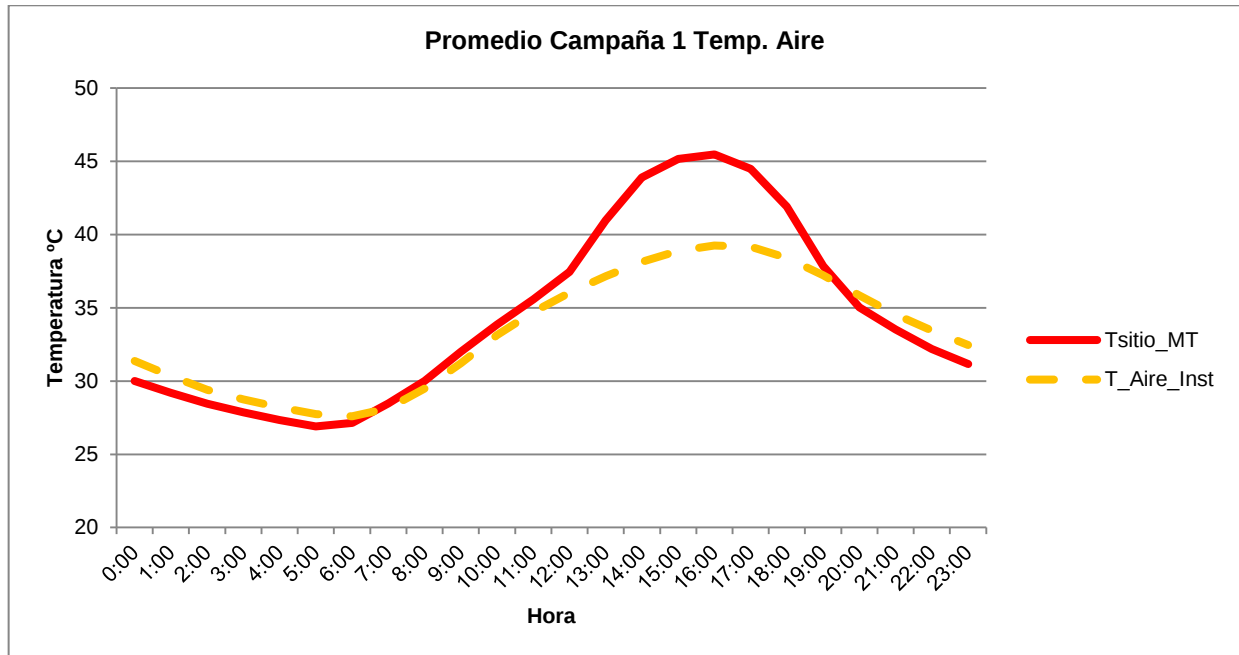
Tabla 8. Proporciones entre MT/Rad Vert y SVV/Rad Vert

	Hora	MT/Rad Vert %	SVV/Rad Vert %
Campaña 1	12:00	113	50
	13:00	103	48
	14:00	80	33
	15:00	57	24
	16:00	47	23
	17:00	49	30
	18:00	56	43
Campaña 3	12:00	322	100
	13:00	231	85
	14:00	126	42
	15:00	93	31
	16:00	69	28
	17:00	55	25
	18:00	59	31

4.2.3.3 Temperatura del aire

Para ello se consideró la sonda que se ubicó 60 cm antes de la vegetación, a una altura de 60 cm del nivel de piso terminado (npt) en el estacionamiento. Las mediciones fueron promedios horarios de toda la Campaña 1. De la cual, se obtuvo la gráfica 25, donde

Tsitio_MT es el comportamiento de la temperatura de aire en el sitio y T_Aire_Inst son los datos pertenecientes a la estación meteorológica de referencia:



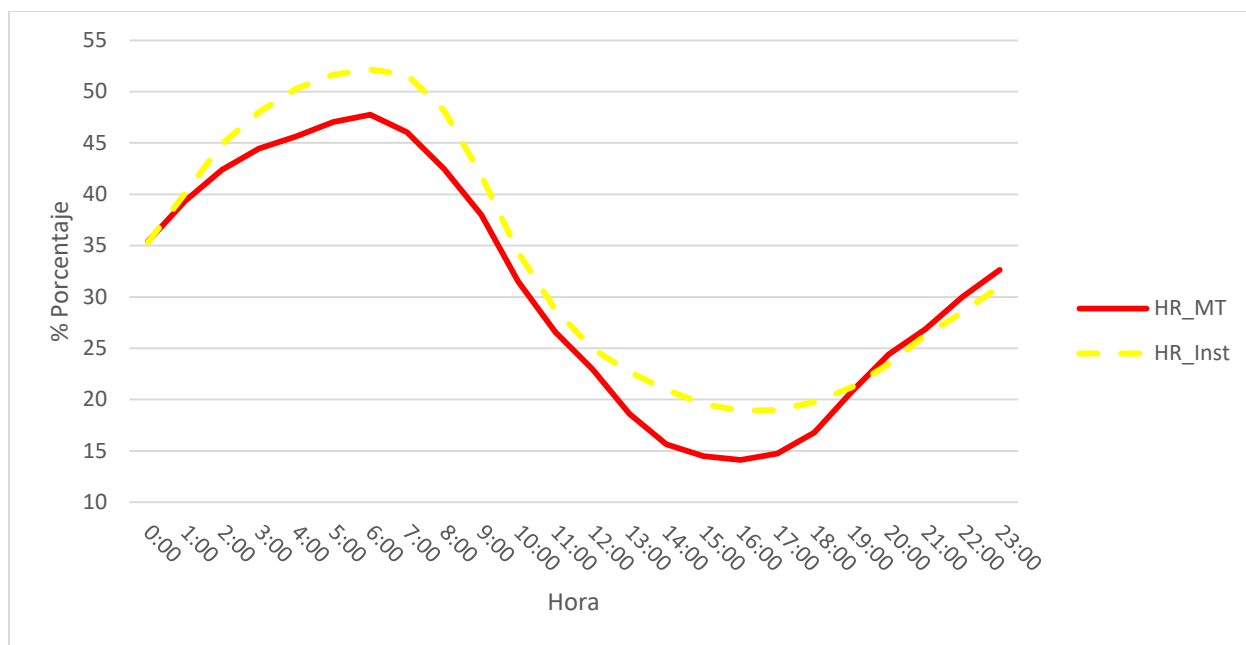
Gráfica 25. Temperaturas de aire - Campaña 1 (verano 2018)

Las mediciones que se realizan por la estación meteorológica del Instituto de Ingeniería se encuentran a una altura aproximadamente de 20 m sobre el nivel del suelo, y son referencia para hablar del estado del tiempo en Mexicali. Sin embargo, en los datos obtenidos en sitio a una altura aproximada de 60 cm, se puede observar una diferencia, que durante las horas de mayor asoleamiento (12:00 a 18:00 h) se magnifica. Esto se debe a las condiciones físicas que componen el sitio experimental (piso de concreto armado, paredes de block común y falta de vegetación).

Por la altura a la que se encuentra el sensor en sitio (60 cm del suelo), los datos de temperatura resultan más representativos de las condiciones que los transeúntes experimentan en el sitio (altura promedio humana 1.80 m), a diferencia de la medida en la estación meteorológica de referencia (23 m).

4.2.3.4 Humedad Relativa

En esta variable, la diferencia es 6% menor en el sitio respecto a la estación de referencia, la misma sonda HMP-45C nos permite conocer las magnitudes. De lo cual se obtuvo la gráfica 26.



Gráfica 26. Promedio horario humedad relativa - Campaña 1

Los valores pertenecientes a la humedad relativa de la estación meteorológica de referencia (HR_Inst) aparecen en amarillo, aquellos que pertenecen al sitio de experimentación (HR_MT) aparecen en rojo.

A diferencia de las otras variables, la humedad relativa presenta valores mayores en la estación meteorológica que en sitio. Esto se debe a la diferencia de altura a la que se encuentran, HR_MT al estar a nivel suelo (con sus alrededores principalmente de concreto) afectan el microclima, aumentan la temperatura del aire y generan una disminución de la humedad relativa. La gráfica 26, muestra que la mayor parte del tiempo la humedad relativa en sitio se mantiene por debajo de la estación de referencia, y se acentúan sus diferencias de las 2:00 a 8:00 hrs y después de mediodía (13:00 a 18:00 hrs) cuando disminuye drásticamente de manera inversa al comportamiento de la temperatura.

4.3 Vegetación

4.3.1 Selección de vegetación

En un principio se recurrió a utilizar *Cissus rhombifolia* (Nombre común: enredadera) y *Pyrostegia venusta* (Nombre común: Llamarada), esto debido a su alto índice de cobertura de follaje y facilidad de crecimiento, lo cual nos garantizaba una mayor cobertura en menor tiempo. Sin embargo, el verano del 2017 presentó varios días inusuales en cuanto a la temperatura, por lo que las plantas no resistieron las condiciones que se presentaron en sitio y en consecuencia, se secaron, durante los primeros 20 días del verano, que se presenta en la tabla 9.

Tabla 9. Diferencia promedio diario 2001-2016 vs 2017

Verano 2001-2016				Verano 2017			Diferencia		
Temperatura del Aire Promedio Diario									
Día	Jun	Jul	Ago	Jun	Jul	Ago	Jun	Jul	Ago
1	32.4	35.4	34.9	28.0	34.4	37.0	-4.4	-1.1	2.2
2	31.7	35.8	34.6	28.2	33.3	35.5	-3.5	-2.4	0.9
3	31.7	35.1	35.6	31.8	34.2	35.0	0.1	-0.9	-0.6
4	31.9	34.9	35.9	33.0	35.6	34.0	1.2	0.7	-1.9
5	31.2	34.2	35.5	32.6	36.6	34.6	1.4	2.4	-0.8
6	31.1	34.4	36.0	30.8	36.1	35.0	-0.4	1.8	-1.0
7	31.4	35.0	35.8	30.1	40.5	36.0	-1.3	5.5	0.1
8	31.1	35.6	34.9	31.4	38.3	36.5	0.2	2.7	1.7
9	30.4	35.7	35.0	32.0	34.3	36.6	1.6	-1.4	1.6
10	30.7	35.9	35.4	30.7	35.7	36.4	0.0	-0.2	1.0
11	31.2	35.8	35.8	27.5	35.8	35.0	-3.8	0.1	-0.8
12	31.4	35.9	35.8	24.0	36.0	37.3	-7.5	0.1	1.5
13	31.9	36.1	36.0	26.7	35.4	35.0	-5.2	-0.7	-0.9
14	32.5	36.0	35.8	31.0	36.1	34.4	-1.6	0.2	-1.4
15	33.0	35.8	35.5	34.1	35.8	32.4	1.1	0.0	-3.1
16	33.1	36.3	35.5	35.2	34.5	31.1	2.1	-1.8	-4.5
17	33.8	36.3	35.6	34.3	34.6	32.5	0.5	-1.7	-3.1
18	34.1	36.3	35.5	35.5	34.9	34.1	1.4	-1.4	-1.5
19	34.2	35.8	35.2	37.2	35.1	34.5	3.0	-0.7	-0.7
20	33.5	35.7	34.8	40.2	35.2	33.5	6.7	-0.6	-1.3
21	33.3	36.1	34.6	37.9	35.0	33.7	4.5	-1.1	-0.9
22	33.8	36.2	34.5	34.7	35.1	34.8	0.9	-1.1	0.2
23	34.3	35.8	35.0	33.7	34.8	35.9	-0.6	-0.9	0.9
24	34.0	35.6	35.5	36.0	33.0	34.4	2.0	-2.6	-1.1
25	34.3	35.5	35.4	38.2	33.9	35.3	3.9	-1.6	-0.1
26	34.9	35.8	35.7	36.1	34.4	36.0	1.3	-1.4	0.2
27	34.0	36.1	36.1	38.4	36.3	38.4	4.4	0.2	2.2
28	34.2	35.6	36.5	34.6	35.8	38.1	0.4	0.2	1.6
29	34.0	34.7	35.9	33.2	33.9	38.7	-0.7	-0.8	2.8
30	33.5	34.7	34.7	33.8	34.2	38.5	0.3	-0.5	3.8
31		34.4	35.1		37.3	37.8		2.8	2.7
Promedio mensual	32.8	35.6	35.4	33.0	35.4	35.4			

En consecuencia a esta anomalía, se decidió cambiar la especie para la siguiente temporada, las seleccionadas fueron Bougainvillea brasiliensis (Bugambilea) y Passiflora incarnata (Passiflora). La primera, responde a su alta presencia en la localidad, además de su baja necesidad de riego y su alta resistencia al calor. Además de lo anterior, su

época de florecimiento es durante verano, lo que nos garantiza tener follaje en la época crítica.

Las especies Bougainvilleas son altamente populares para su uso de ornato (Giridhar G., 1985), por lo que son fáciles de conseguir. En cuanto la Passifloraincarnata, se trata de una vegetación de alta resistencia, considerada en algunos lugares (principalmente en climas mediterráneos) como plaga, lo cual indica que requiere poco mantenimiento y crece con facilidad.

4.3.3 Fisonomía especie

El área foliar de las especies depende del origen de la planta. La mayoría de las plantas endémicas de las zonas desérticas suelen tener poca área foliar. Recurrir a este tipo de vegetación sería poco conveniente, ya que según la metodología expuesta de la literatura, es por medio del área foliar que se logra mitigar el ingreso de calor al edificio.

Las plantas adaptadas al clima recurren a alteraciones en sus sistemas fisiológicos para lograr dicha adaptación, una de las regulares son el tamaño de índice foliar. Como resultado a la alta exposición a la radiación, las plantas reducen el índice foliar para soportar las condiciones extremas.

Estas reducciones foliares se dan dependiendo de la ubicación de la especie vegetal, para ello se analizaron las especies estudiadas en el experimento, ubicando plantas de la misma especie, dentro de la misma área de estudio y misma edad con diferentes orientaciones y comparando sus hojas, figura 23.

Para la Bugambilea las hojas de plantas que se encuentran en las orientaciones este y norte presentan un mayor tamaño, que aquellas que se encuentran en las orientación oeste y sur; siendo las de orientación oeste las más pequeñas en proporción de todas.

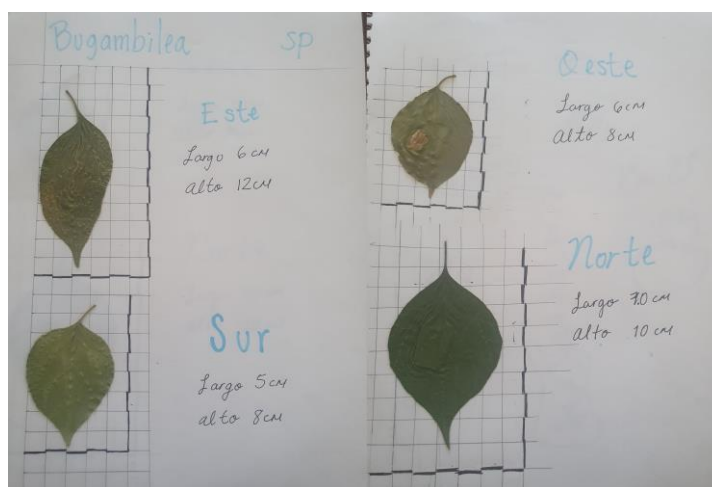


Figura 23. Ejemplo de recolección de hojas, Bugambilea sp.

Tabla 10. Fisonomía de las especies (Vogel, 2002).

NombreComún	Bugambilia	Passiflora
Nombrecientífico	Bugambiliabrasilensis	Passifloraincarnata
Forma biológica	Arbusto trepador caducifolio	Arbusto trepador perenne
Altura	4.5m – 9m	10m
Diámetro	30cm	20cm
Follaje Circunferencia	100cm	20cm
Nativo	Brasil	Sur América
Tipo de suelo	Bien Drenado	Altamente orgánico
Agresividad	Sin problema	Considerada plaga
Mantenimiento	Poda continua para forma	Poda continua para limite
Funciones	Efecto sombreante	Cobertura vegetal
Característica	Pleno sol, poca agua	Pleno sol, agua abundante

En la tabla 10, se indica la ficha técnica de cada especie, denotando características comunes para la vegetación y englobando condiciones en las cuales se desarrollan las mismas especies. Estas fichas técnicas dan una idea al usuario de las limitantes de la especie y a través de ellas realizar una selección adecuada.

4.3.4 Estrés hídrico

Conocer el estrés hídrico nos ayuda a conocer con certeza la cantidad de agua que requiere la planta para no comprometer su calidad de vida. Sin embargo, no solo depende de la cantidad de agua disponible, sino que depende de varios factores. Uno de ellos es la estructura del suelo, de forma natural es difícil controlarla. En una SVV (en este caso Bugambilia) al requerir de contenedores, es posible controlar con facilidad la cantidad de agua suministrada, lo que ayuda a mantener la cantidad de humedad que el suelo puede almacenar.

Según lo estipulado por USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos, siglas en inglés) la cantidad recomendada de humedad en suelo necesaria para asegurar la sobrevivencia de una especie vegetal es de 40%, por lo que se requiere de una configuración de suelo franco-arcilla-arenoso para ello, donde la proporción correspondiente son Tierra limo/Arena 3: 1 Arcilla. Sin embargo, las mediciones realizadas son en vegetación dedicada a la producción de alimentos, que, al contrario de las plantas ornamentales nativas o adaptadas, requieren una cantidad mayor para su conservación.

En la bugambilia se requiere 27.18% de humedad y en la Passiflora 26.99%, por lo que, la textura puede retener por un período de 24 horas un porcentaje de 30% humedad y el riego se debe hacer cada tercer día.

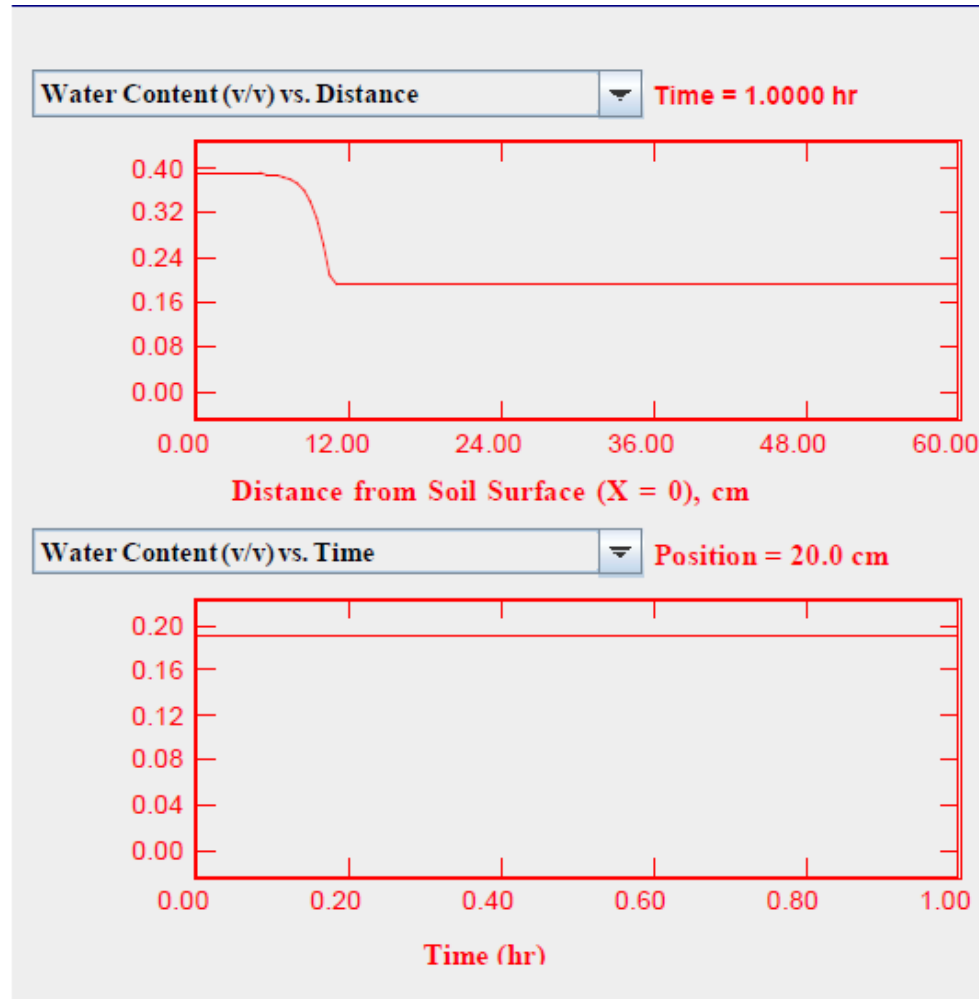
Esta proporción se ha controlado desde el inicio en los contenedores, aun así, se realizó una prueba de Bouyoucos para conocer la verdadera estructura del suelo, dando los siguientes resultados, tabla 11:

Tabla 11. Estructura de suelos de SVV

Tipo	Tiempo	Densidad gr cm ³	Temperatura °C	Corrección por temp	% Arcilla	% Arena	% Limo
SVV_1	40 seg	15	21	15.54	31.08	37.84	31.08
	2 horas	10	21	10.54	21.08	57.84	21.08
SVV_2	40 seg	14	21	14.54	29.08	41.84	29.08
	2 horas	18	21	18.54	37.08	25.84	37.08

Otros de los datos necesarios son: conocer la cantidad de agua utilizada en el riego y la cantidad de humedad existente después de 4 horas del riego. Lo cual, se estuvo midiendo durante 1 mes (julio 2017) y se obtuvo un promedio de 27.08% de humedad en las muestras y 60 l de fluido por riego. La cantidad y frecuencia de riego, va directamente relacionado con el tamaño de contenedor que se tiene, donde mayor sea el contenedor, mayor cantidad de líquido soportará y menor frecuencia de riego, y viceversa.

Con los datos anteriores, utilizando el programa de simulación Chemfloo en su versión 2000, fue posible conocer el movimiento del agua en esta estructura de suelo definida y cuantificar el tiempo que se conserva el agua a un nivel de 20 cm, que es el nivel de donde las plantas tomarán el agua para su proceso de fotosíntesis.



Gráfica 27. Diagrama de movimiento agua, programa de simulación Chemfloo 2000.

Con un riego en promedio de 5 minutos incorporando aproximadamente 60 lts en una superficie de 60 cm durante una hora, el agua penetra en la estructura franco-arcillo-arenoso alrededor de 12 cm, gráfica 27 superior. Y se conserva en ese nivel por un promedio de 24 horas.

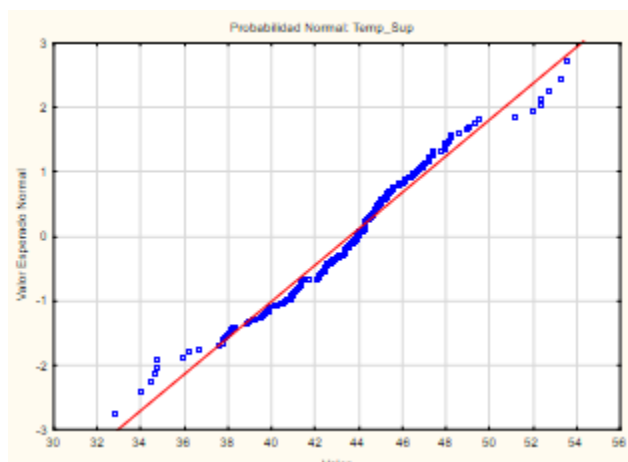
En la gráfica 27 inferior se observa cómo el contenido del agua se mantiene en el nivel de 20 cm, con ello, se garantiza la obtención de nutrientes y agua para las especies vegetales.

4.4 Campaña 1

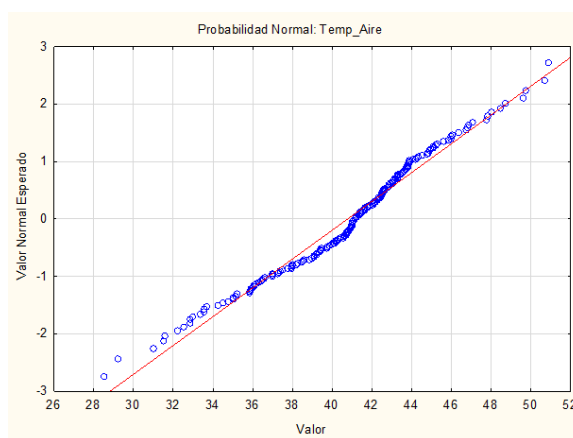
Partiendo del diagrama del experimento (Figura 12) se analizan cuatro variables principales, Temperatura de superficie, Temperatura de aire, Flujo de calor y Humedad relativa en el módulo SVV y el muro testigo MT.

Se obtuvieron 17,742 datos por instrumento de medición, durante el periodo de calor (15 de mayo a 15 de septiembre), las mediciones fueron promedios diezminutales. El análisis estadístico no tiene ninguna relevancia para el tratamiento de los datos, solo se menciona con la intención de hacer conocer el comportamiento de estos.

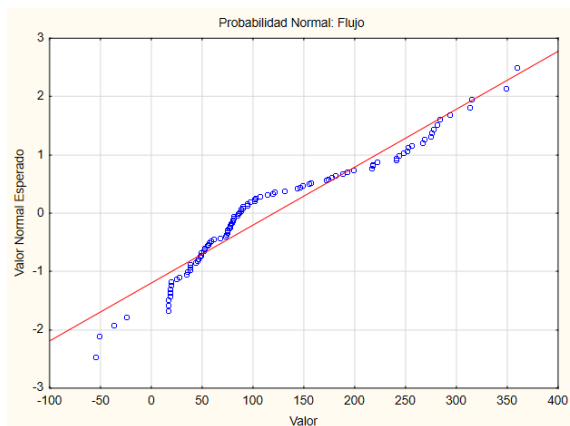
4.4.1 Gráficas de probabilidad normal



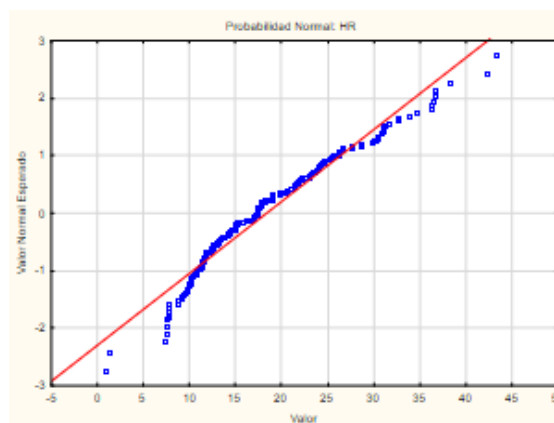
Gráfica 28. Probabilidad normal Temp Sup.



Gráfica 29. Probabilidad normal Temp Aire



Gráfica 30. Probabilidad normal Flujo de calor.



Gráfica 31. Probabilidad normal HR.

Se puede observar que lo correspondiente a las variables de temperatura de superficie (gráfica 28), temperatura de aire (gráfica 29), humedad relativa (gráfica 31) y flujo de

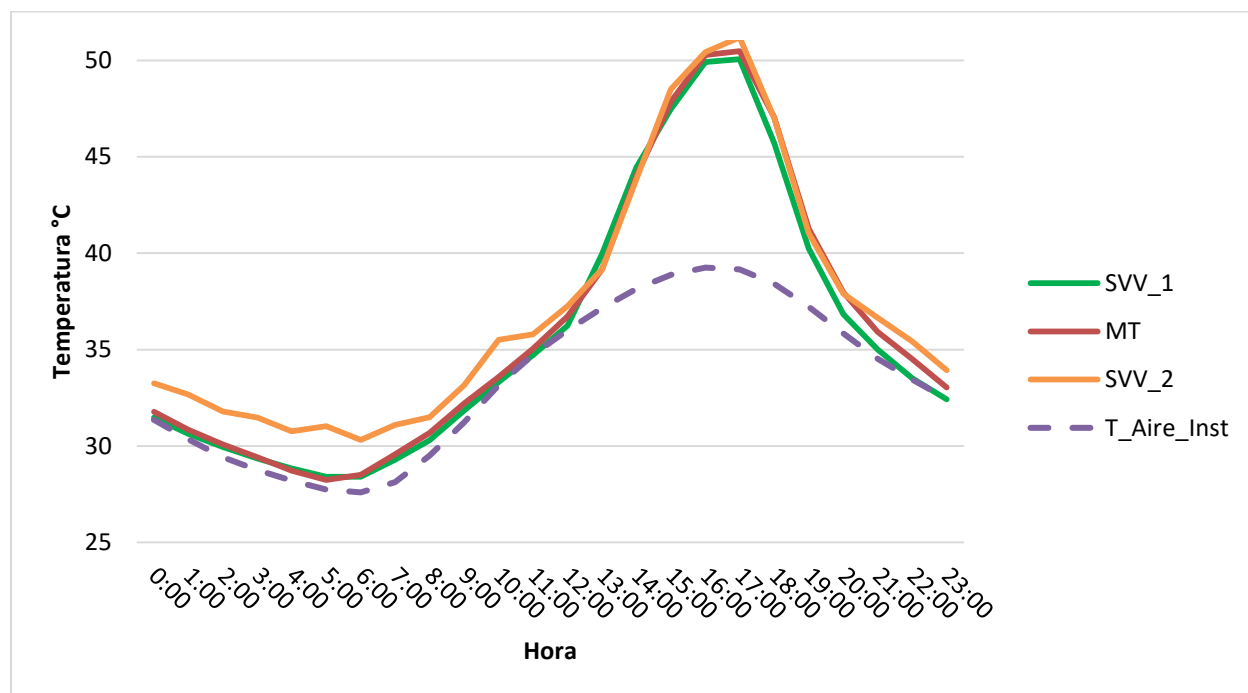
calor (gráfica 30) en donde las variables tienen en sus extremos comportamiento fuera de parámetro, por lo cual se considera una distribución libre.

A través de la prueba de Kolmogorov-Smirnov se obtuvo los resultados siguientes:

- Temperatura de superficie y aire muestran una $d=0.13$ y $p>0.20$.
- El flujo de calor muestra una $d=0.31$ y $p>0.20$.
- Humedad relativa es de $d=0.34$ y $p<0.1$.

4.4.2 Análisis gráfico de variables

Se decide realizar gráficas con promedios horarios, resultando en:

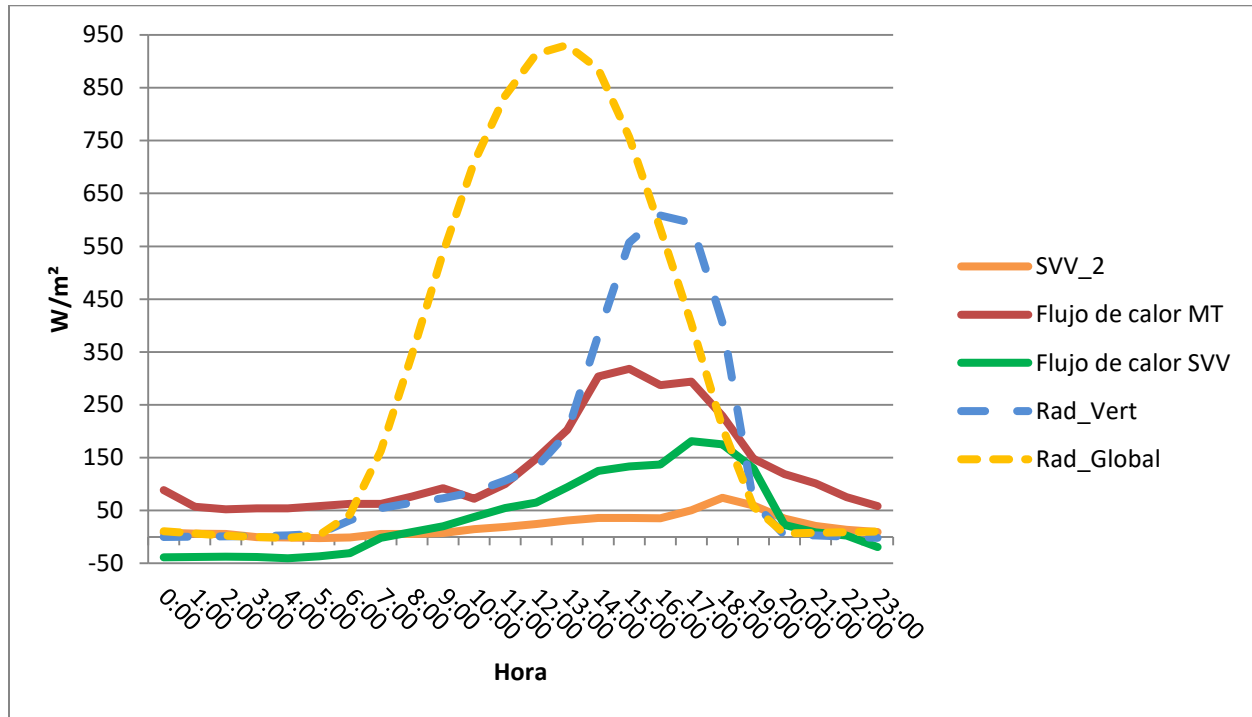


Gráfica 32. Promedio de temperatura de superficie - Campaña 1

En las gráficas se utiliza la misma simbología, en tonos verdes las SVV, donde la SVV_1 representa los datos de la Bugambilea y tonos naranjas el SVV_2 representa la Passiflora, mientras que en rojo MT es el muro testigo. Como referencia se coloca los datos obtenidos de la estación de referencia con la leyenda T_Aire_Inst.

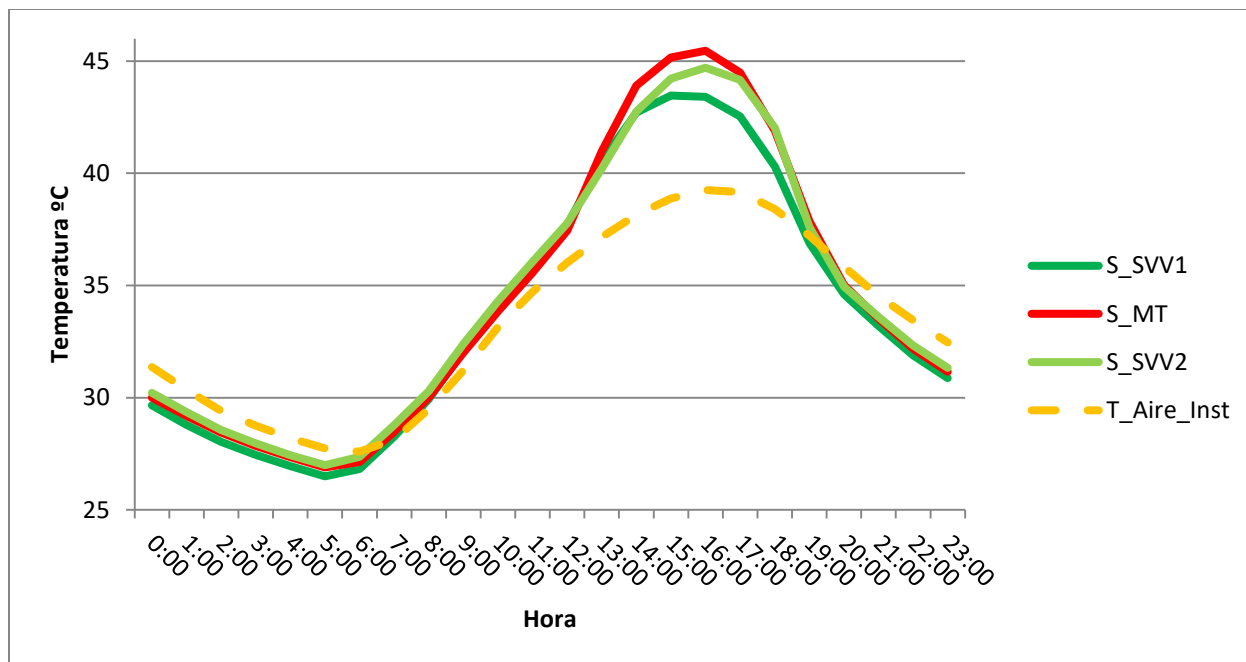
En la gráfica 32, se observa un descenso de temperatura en un horario de 0:00 hasta las 6:00 h, a partir de esa hora se aprecia un aumento de temperatura conforme pasan las horas de mayor exposición a la radiación, llegando a su nivel máximo entre las 15:00 a 17:00 h, después de esa hora inicia el decremento. Visualmente existe una diferencia entre la Bugambilia (SVV 1) y el muro testigo, presentando valores de menor magnitud

la Bugambilia, sin embargo, los datos de la Passiflora (SVV 2) muestran una mayor magnitud que SVV1 y MT.



Gráfica 33. Promedio de flujos de calor, Radiación Global y Radiación Vertical - Campaña 1

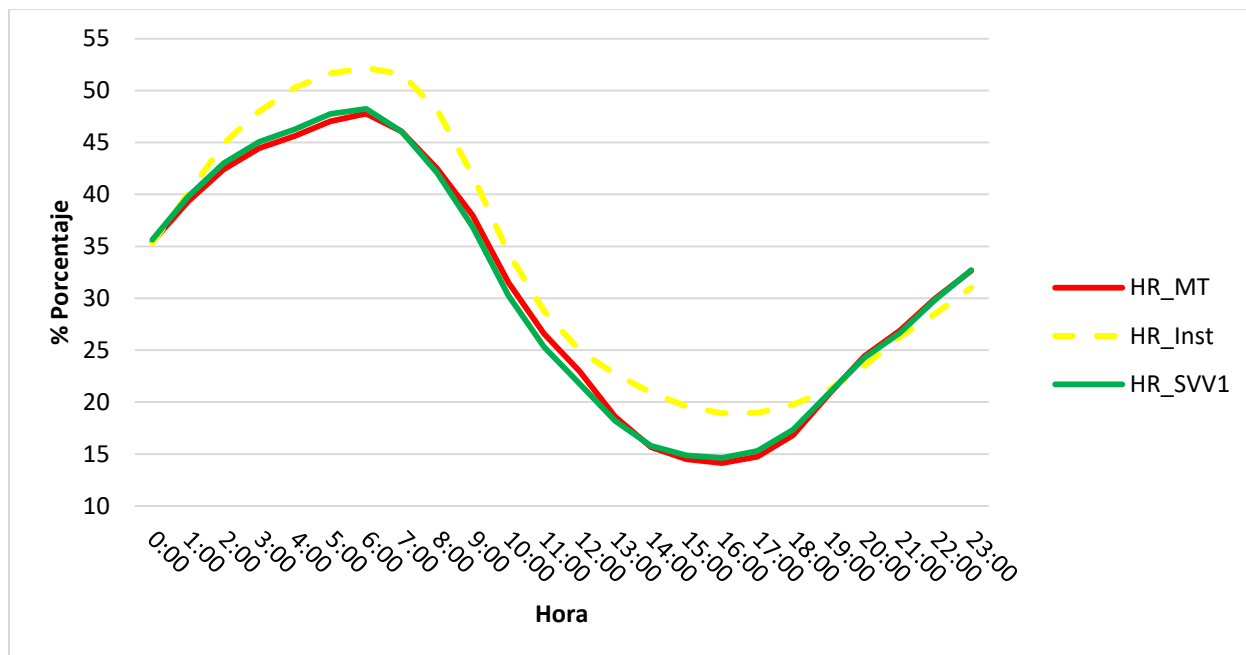
La gráfica 33 se refiere a promedios de flujo de calor, se observa que fue menor en las SVV que en MT. Como referencia se colocó en la gráfica los datos de la cantidad de radiación que llega al muro (Rad_Vert), por lo que de la radiación incidente al oeste (3373.23 W/m² en 6 horas) MT permite el paso de 92.32% de la energía, mientras que la pared sombreada por la bugambilia, solo permite el paso de 27.16% y la pasiflora el 14.60%; lo anterior considerando el área bajo la curva de las variables.



Gráfica 34. Promedio de temperatura del aire - Campaña 1

Los datos obtenidos de la temperatura de aire (gráfica 34) hacen mayor contraste que los que se obtuvieron de la temperatura de superficie. En esta, la diferencia entre SVV_1 (Bugambilea), SVV_2 (Passiflora) y MT se aprecia con mayor facilidad, debido a que existe una diferencia durante las horas de mayor exposición (12:00 a 18:00 h), dato que se comprueba con las pruebas de ANOVA, dando como resultado 1°C. Se colocaron los datos de la estación de referencia, para conocer el comportamiento comparativo del día.

Esta diferencia de temperatura del aire se debe a varios factores, entre ellos, el sombreado provocado por la vegetación, y la mínima humedad proporcionada por el riego y la misma vegetación.



Gráfica 35. Promedio humedad relativa - Campaña 1

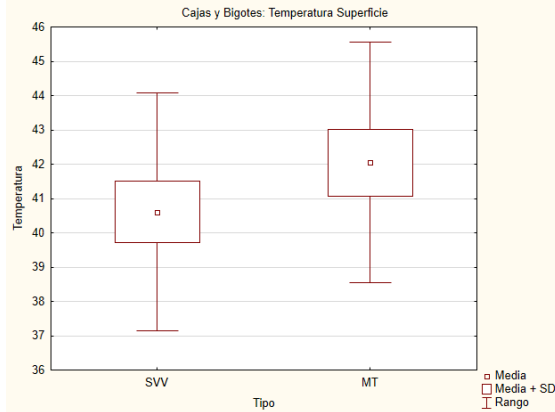
En la gráfica 35 de humedad relativa, se observa que los valores de la sSVV (SVV_1) y el muro testigo, son iguales.

4.4.3 Diferencia de medias

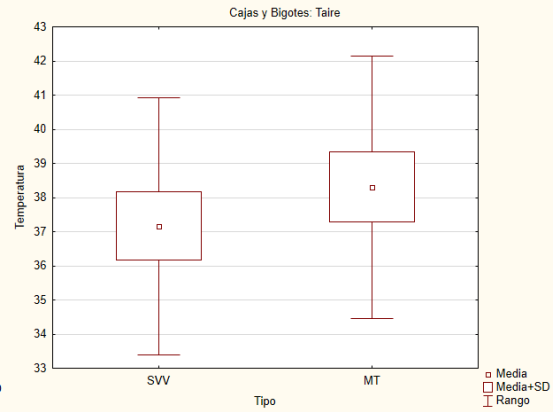
A través de un análisis de ANOVA, se compararon los datos obtenidos entre las SVV y el muro testigo para cada variable. Con el uso del programa Statistica en su versión 10, para el análisis de estos datos se utilizaron los promedios diarios, pero solo se consideraron aquellos que están dentro del horario de interés, es decir, que van de las 12:00 hasta las 18:00 h, debido a que es el horario en el que el muro se encuentra expuesto a la radiación. En primera instancia se mostrará al lector los resultados estadísticos de los datos, para posteriormente mencionar lo obtenido por el análisis de ANOVA.

4.4.4 Gráficas de cajas y bigotes

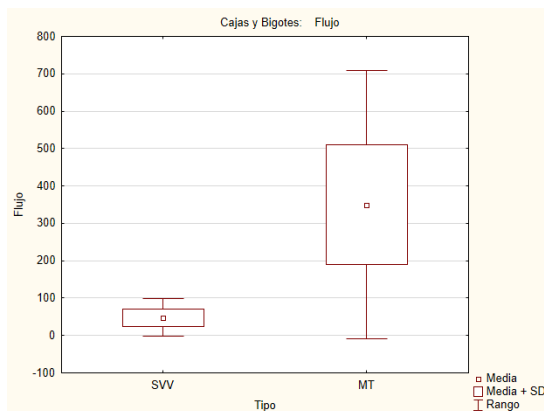
En ellas, se separaron los datos en dos grupos SVV y muro testigo MT donde se analizan sus varianzas y medias estadísticas. Como lo documentado en el marco teórico, la media en este tipo de gráficas está representada por un punto en medio de las cajas, las cajas representan los datos dentro del primer y tercer cuartil.



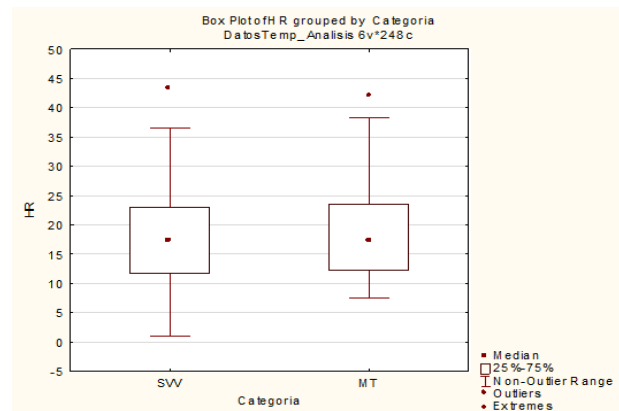
Gráfica 36. Caja y bigotes Temp Sup.



Gráfica 37. Cajas y bigotes Temp Aire.



Gráfica 38. Cajas y bigotes Flujo.



Gráfica 39. Cajas y bigotes HR.

Se presentan las gráficas por variable, temperatura de superficie (Gráfica 36), temperatura de aire (Gráfica 37), flujo de calor (Gráfica 38) y humedad relativa (Gráfica 39).

La temperatura de superficie presenta valores que van de 36 °C hasta 51 °C, donde los valores se concentran entre 41 a 45 °C. El comportamiento es prácticamente similar aunque los datos de SVV son aparentemente menores en magnitud.

En la temperatura de aire, aunque las magnitudes son similares entre SVV y MT, es evidente que existe una diferencia en la media, 41 °C para SVV y 42 °C para MT.

En el caso del flujo, el contraste del tamaño de las cajas indica magnitudes muy diferentes, mientras que los datos de SVV van de 30 a 150 W/m², los que se presentan en MT van de -50 a 360 W/m², el signo de los datos, indican la dirección del flujo de calor, cuando aparecen negativos, indica que el flujo se da de manera inversa a la orientación del sensor. La media en SVV se encuentra en 75 W/m², y la de MT en 175 W/m².

Por último, la humedad relativa. El rango en la humedad de SVV es mayor (2 a 36%) que en MT (6 a 37%), la diferencia entre el rango, sin embargo las cajas prácticamente son iguales, sin que se observe diferencias importantes en la media.

4.4.5 ANOVAS

Para conocer si estadísticamente hay una diferencia entre las medias del SVV y del muro testigo se recurre a la prueba Anova con un nivel de significación $\alpha=0.05$ (con un grado de significancia), primero se somete a una prueba T multivariada. Los resultados se presentan en la tabla 12.

Tabla 12. Diferencia de medias por grupo SVV- MT, Campaña 1.

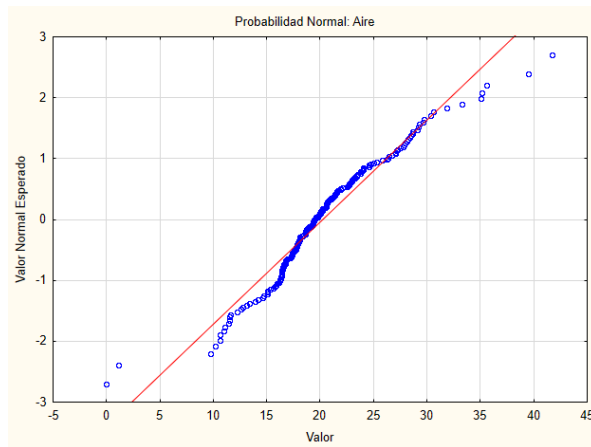
PRUEBA T POR GRUPO				HOTTELING $T^2=25.5$		F(4.92)=6.2		P<.00019	
VARIABLE	Media SVV	Media MT	Valor t	Error	Valor p	Desv. Stand. SVV	Desv. Stand. MT	F Varianza	P Varianza
TEMP_SUP	43.5	43.8	-0.7	214	0.5	3.5	3.5	1	0.9
FLUJO	81.8	159.9	-4.5	99	0	59.2	109.4	3.4	0
TEMP_AIRE	40.2	41.3	-2.1	211	0	3.9	3.89	3.9	1
HR	18	18.6	-0.6	213	0.6	7.8	7.7	1	1

Los datos del flujo de calor y la temperatura de aire muestran diferencia estadísticamente significativa entre SVV y MT. Para conocer el dato exacto de la diferencia se recurre a la prueba de Duncan. En cuanto a la temperatura la diferencia entre MT y SVV es de 1.1 °C y el flujo presenta una diferencia de 78.1 W/m² (Tabla 12).

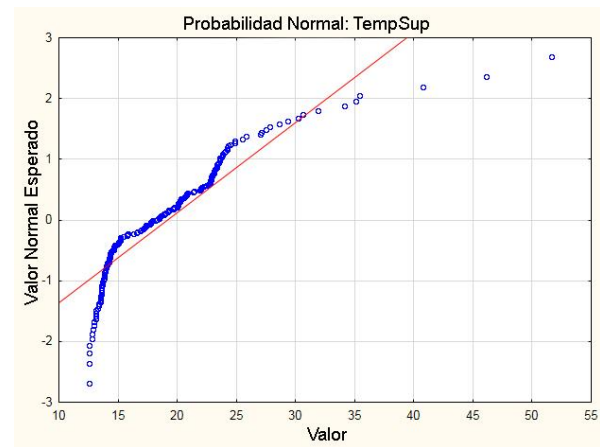
4.5 Campaña 2

Durante esta campaña, que abarca desde el 15 de noviembre al 15 de marzo, se obtuvieron un total de 2352 datos por instrumento de medición, con los mismos criterios y con el mismo arreglo que la campaña anterior (figura 12). Algunas de las gráficas presentadas a continuación mostraran un horario de comportamiento de 24 horas (Flujo de calor y Humedad Relativa) mientras el resto solo presentarán el horario de incidencia solar (12:00 a 18:00 hr); sin embargo, para el análisis estadístico solo se utilizaron los datos durante la incidencia solar. Ya no se considera a la Passiflora (SVV_2) a partir de esta campaña que, aunque sobrevivió la temporada cálida, su follaje no fue suficiente para generar sombreado, por lo que se decide retirarla de la campaña y solo considerar a la Bugambilea, de lo cual se obtienen los siguientes datos:

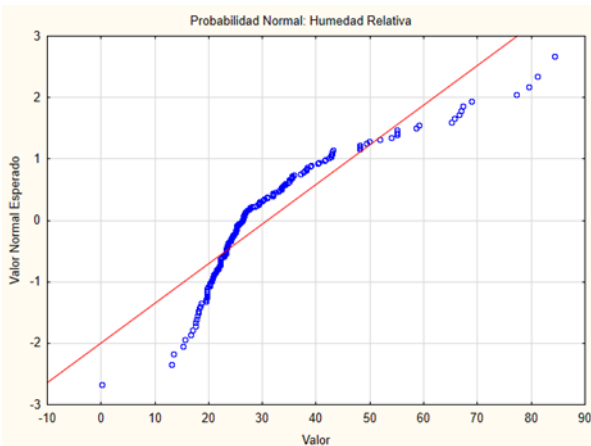
4.5.1 Gráficas de probabilidad normal



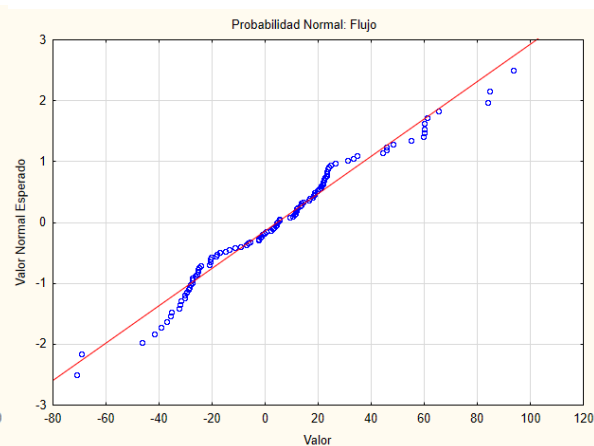
Gráfica 40. Probabilidad normal Temp Aire.



Gráfica 41. Probabilidad normal Temp Sup.



Gráfica 42. Probabilidad normal HR.

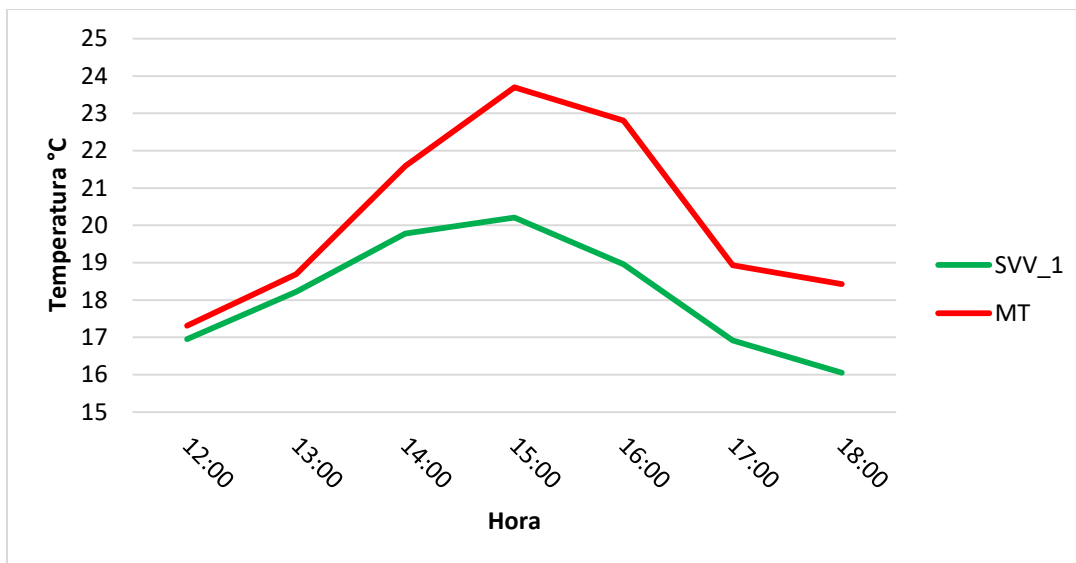


Gráfica 43. Probabilidad normal Flujo.

Las gráficas de probabilidad normal de los datos (Gráfica 40-43), a través del método Kolmogorov-Smirnov, mostró un comportamiento no paramétrico, debido a que tanto los datos de la temperatura de aire $d=0.098$ y $p<0.05$ (gráfica 40) y la temperatura de superficie $d=0.15$ y $p<0.01$ (gráfica 41), como los de la humedad relativa $d=0.18$ y $p<0.01$ (gráfica 42) en sus valores en los extremos se alejan de la línea de tendencia, de la misma manera el comportamiento del flujo de calor $d=0.19$ y $p<0.01$ (gráfica 43).

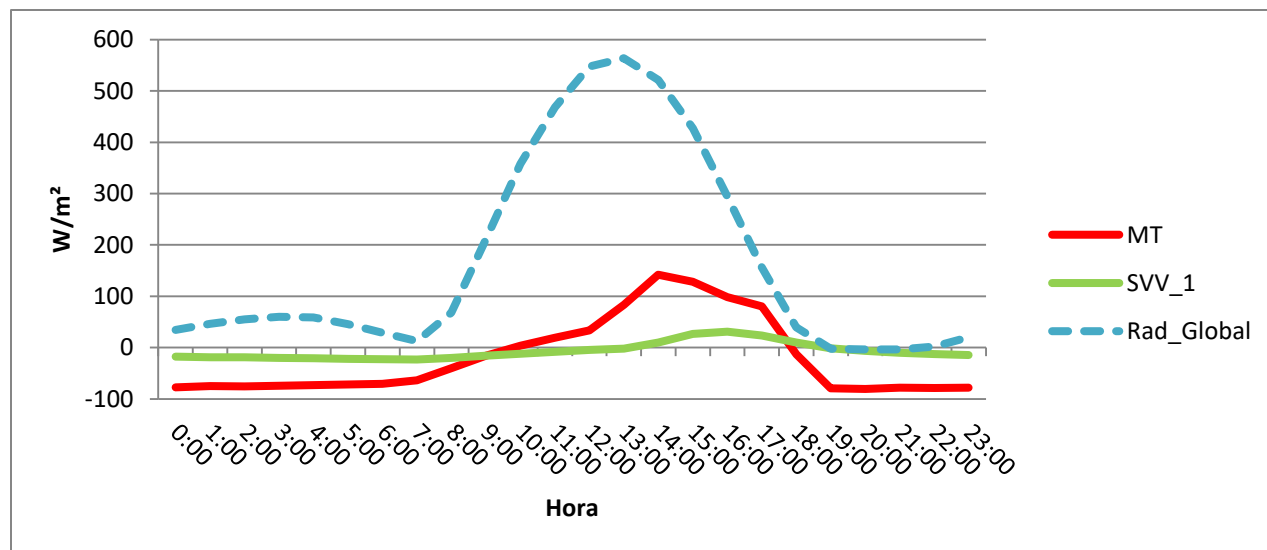
4.5.2 Gráficas

Para las siguientes gráficas, gracias a lo observado en la anterior campaña se decide focalizarla en las horas de mayor asoleamiento. De tal manera que sea posible apreciar con mayor precisión la diferencia entre SVV y MT.



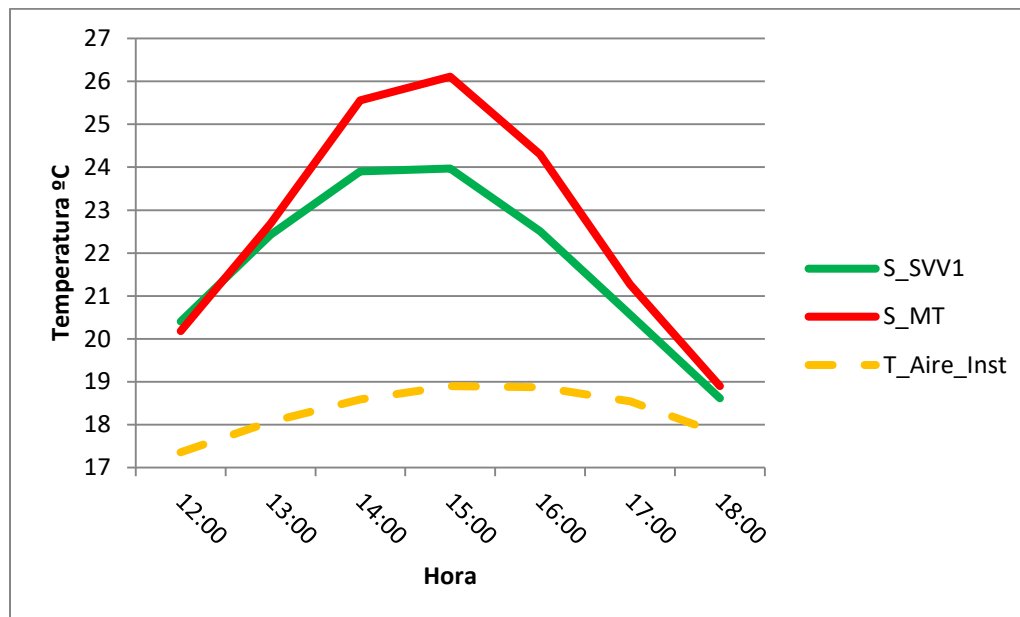
Gráfica 44. Promedio de temperatura superficie - Campaña 2

La gráfica 44, muestra los datos promedios horarios de temperatura, obtenidos entre el módulo de SVV (Bugambilea) y el muro testigo (MT), donde es posible visualizar que en todo momento los datos pertenecientes al MT son superiores, esta diferencia se acentúa entre las 13:00 a las 17:00 horas.



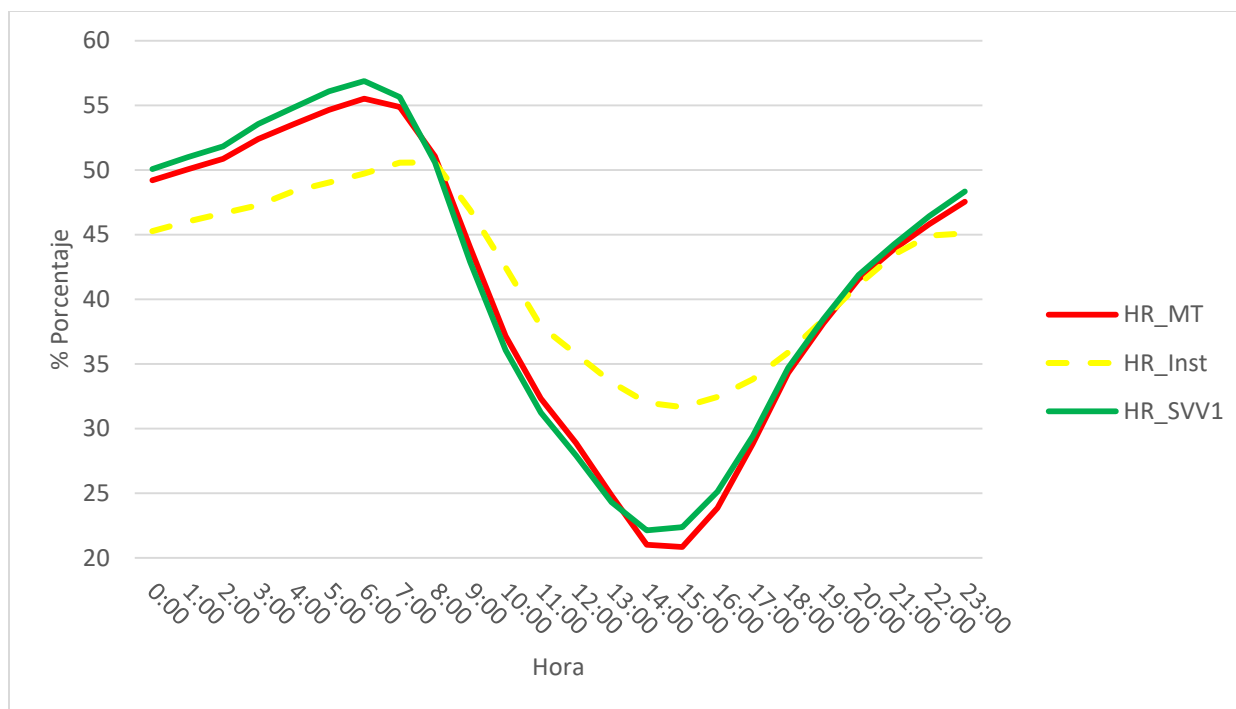
Gráfica 45. Promedio flujos de calor y Radiación Global - Campaña 2

En la gráfica 45, presenta los valores para el flujo de calor y como referencia la Radiación Solar. A diferencia de lo observado en verano, los valores correspondientes al MT están por debajo de los 150 W/m^2 , además también la curva correspondiente a SVV_1 es menos pronunciada, casi constante, aproximadamente alrededor de los 50 W/m^2 .



Gráfica 46. Promedio de temperatura del aire - Campaña 2.

Mientras que lo correspondiente a los promedios de las temperaturas de aire (gráfica 46), su patrón de comportamiento prácticamente es el mismo que en verano, únicamente de magnitudes menores a lo observado durante el anterior periodo.

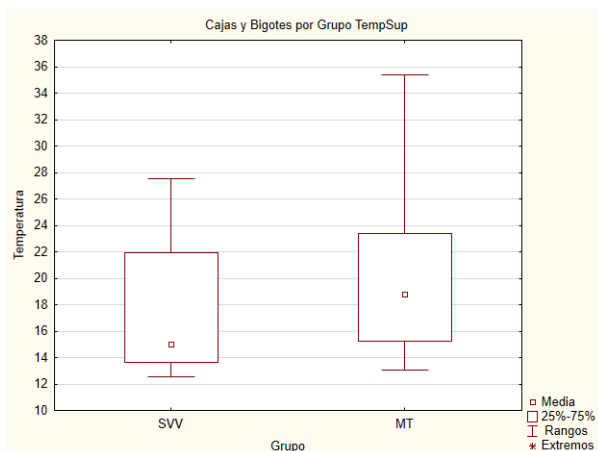


Gráfica 47. Promedio de humedad relativa - Campaña 2.

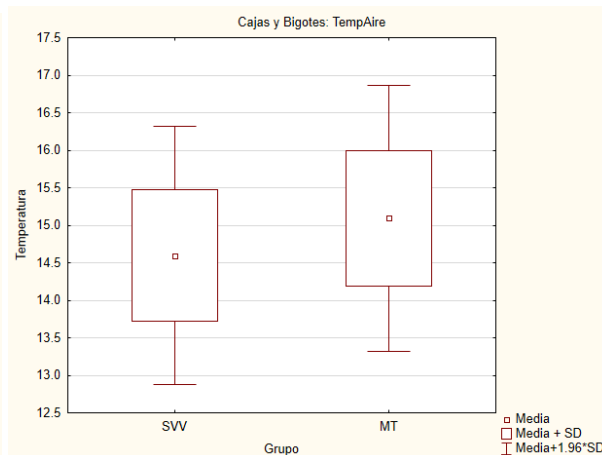
En la gráfica 47, correspondiente al promedio horario de la humedad relativa, se observa un aumento en el porcentaje de humedad por las mañanas (0:00 – 7:00) y una pronunciada caída de esta en el sitio durante las horas de asoleamiento, de la misma manera que en la campaña anterior, se observa una diferencia pequeña entre SVV y MT, 1% en la mayoría del comportamiento, a excepción de los datos de 14:00 y 15:00, donde ambas líneas se separan 3%.

4.5.3 Gráficas de cajas y bigotes

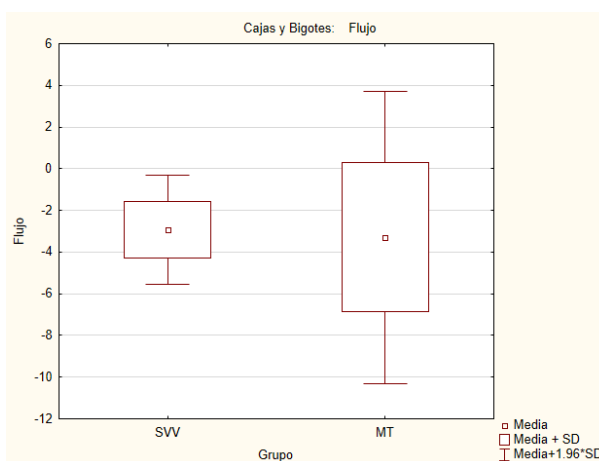
En ellas, también se hace una separación de los datos por grupo para su análisis. Se analizan tanto sus medias estadísticas como sus varianzas, obteniendo:



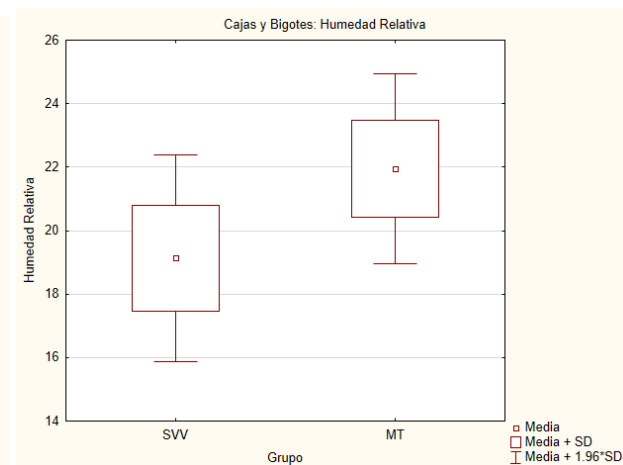
Gráfica 48. Cajas y bigotes Temp Sup.



Gráfica 49. Cajas y bigotes Temp Aire



Gráfica 50. Cajas y bigotes Flujo.



Gráfica 51. Cajas y bigotes HR.

En las gráficas 48-51, se aprecian las gráficas de cajas y bigotes por variable y separada en grupos. La correspondiente a la temperatura de superficie (gráfica 48) nos marca una mayor varianza a los datos correspondientes a MT, sin embargo la caja de ambar presenta un rango entre los 13-23 °C, a pesar de ello, se aprecia una diferecia notable en la media, mientras que en la SVV la media esta en 15 °C, y en MT se presenta en 19 °C.

Los datos en la variable de temperatura de aire (gráfica 49) tienen un comportamiento similar, en tamaño de caja y variabilidad, sin embargo se observa que difieren en las magnitudes, por lo que la media, tambien se encuentra en diferente posición, para SVV en 14.5 °C y en MT en 15 °C.

En el caso particular de los datos de flujo (gráfica 50) se aprecia una gran diferencia entre las gráficas, tanto en las cajas donde SVV tuvo 30.66 W/m², y es de menor tamaño que MT con 141.87 W/m², como en los bigotes. Las medias aquí tienen un comportamiento muy diferente en lo apreciado en las gráficas obtenidas de los datos de verano (Campaña 1 y 3) donde el flujo de SVV es mayor que MT.

Para la humedad relativa (gráfica 51) los datos correspondientes para SVV tienen la variabilidad mas amplia, pero el tamaño de las cajas es muy similar. La diferencia de las medias es de 3% mayor en MT.

4.5.4 ANOVA

Referente a la prueba de ANOVA, al igual que en la campaña anterior se usó un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$. Dando como resultado los valores mostrados en la tabla 13:

Tabla 13. Diferencia de medias por grupo SVV-MT, campaña 2.

PRUEBA T POR GRUPO			HOTTELING T²=25.5				F(4.92)=6.2		P<.00019
VARIABLE	Media SVV	Media MT	Valor t	Error	Valor p	Desv. Stand. SVV	Desv. Stand. MT	F Varianza	P Varianza
TEMP_SUP	17.5	25.6	-3	194	0	4.3	356.3	6888.9	0
FLUJO	18.3	41.4	-6.8	106	0	10.6	24.9	5.6	0
TEMP_AIRE	19.9	20.7	-0.8	194	0.4	5.7	5.9	1.05	0.8
HR	26.2	30	-1.7	194	0.1	17.9	13.6	1.8	0

La tabla anterior muestra que tanto el flujo como la temperatura de superficie son estadísticamente diferentes, es decir, tienen diferencia significativa. Con valores de medias diferentes, ya que en el caso del flujo MT es mayor por 23.1 W/m², y en el caso de la temperatura de superficie, MT es mayor por 8.1 °C.

4.6. Campaña 3

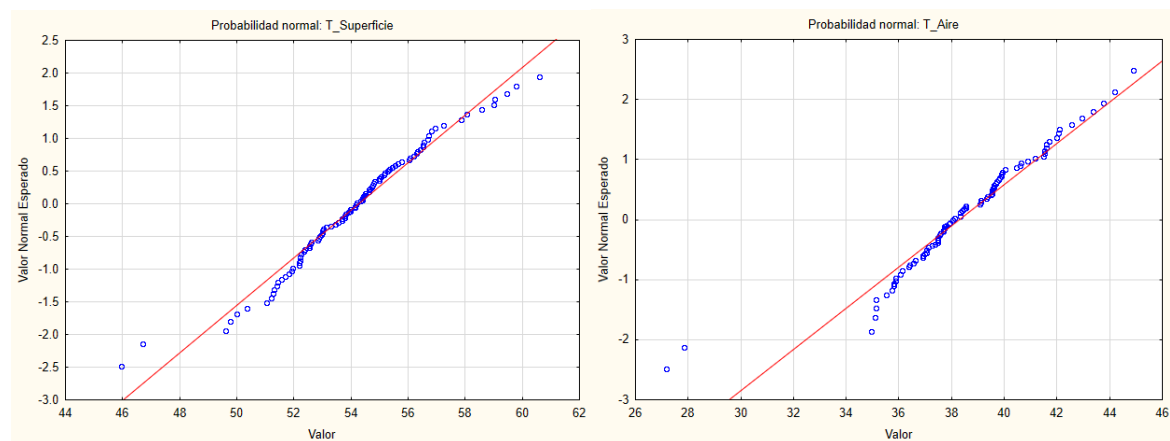
La campaña 3 abarca desde 15 de junio al 1 de septiembre de 2019, ésta campaña a diferencia de la 1 (ambas durante verano) tiene la particularidad que se le adicionó un elemento arquitectónico al módulo, en ella se capturaron 432 datos por instrumentos, de los cuales del 15 de junio al 24 de junio corresponden a datos sin la sombra (109 datos por instrumento) y del 25 de junio al 1 de septiembre a los datos con sombra (323 datos por instrumento).

El elemento arquitectónico constó de una malla sombra de tela, que sirvió para disminuir la intensidad de la radiación solar sobre la SVV. Se tomaron datos de 1 mes sin elemento arquitectónico y 1 mes con elemento con el fin de comparar entre ellos los promedios, de igual forma se compararon las diferencias en el flujo de calor. Con lo anterior, fue posible conocer la mitigación por el efecto de sombreado de la malla.

Las gráficas pertenecientes al flujo de calor presentan un horario de 24 hr, mientras que el resto de ellas, solo presentarán el horario de incidencia solar 7:00 a 17:00. Analizando las mismas variables que en las campañas anteriores.

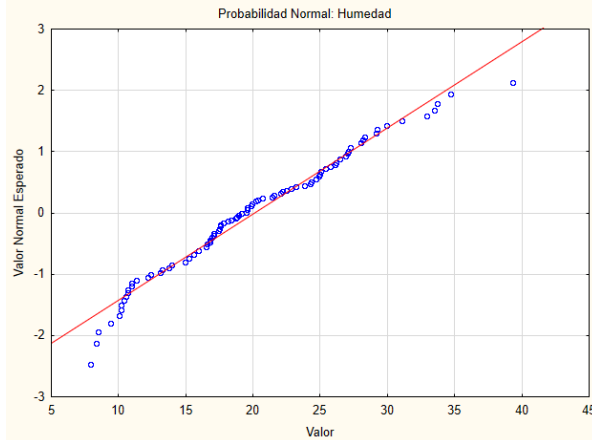
4.6.1 Gráficas de probabilidad normal

Para realizar la diferencia de medias, fue necesario conocer la calidad de los datos, para ello se realizó una normalización de datos, a través del método Kolmogorov Smirnov. Lo cual nos resulta en lo siguiente.

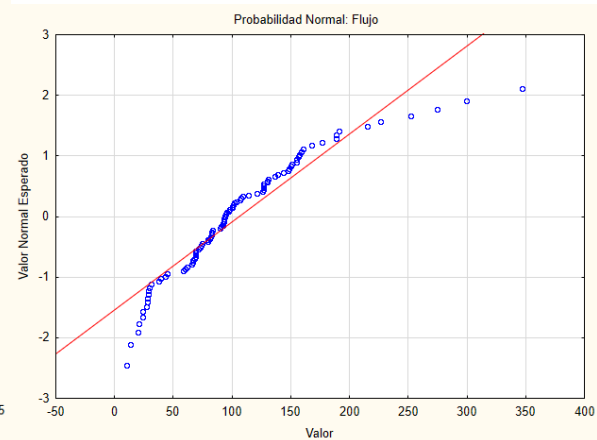


Gráfica 52. Probabilidad normal Temp Sup.

Gráfica 53. Probabilidad normal Temp Aire.



Gráfica 54. Probabilidad normal HR



Gráfica 55. Probabilidad normal Flujo

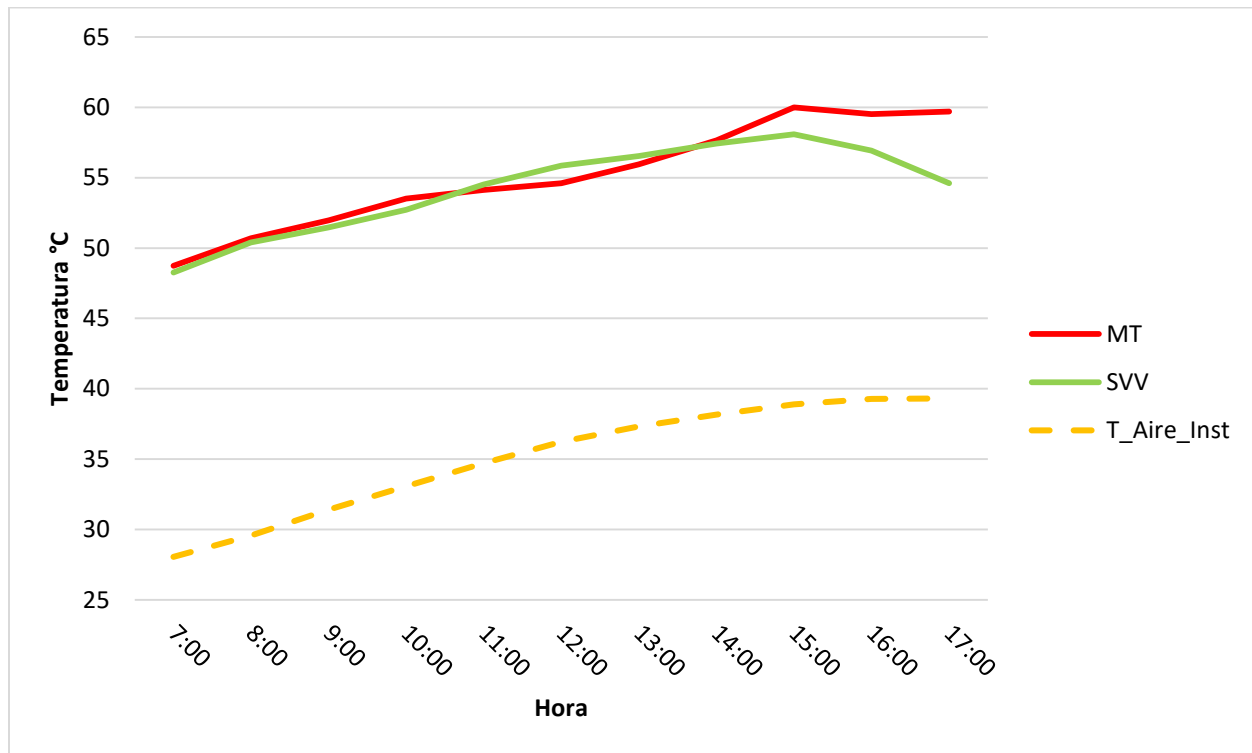
Se observa de nuevo un comportamiento de datos no paramétricos (gráficas 52-55). En ya que en todas las gráficas los datos en los extremos se salen del comportamiento esperado.

De las pruebas de Kolmogorov-Smirnov se obtuvo los siguientes resultados:

- Temperatura de superficie $d=0.27$ y $p<0.01$.
- Temperatura de aire $d=0.94$ y $p>0.20$.
- Humedad relativa $d=0.29$ y $p<0.01$.
- Flujo de calor $d=0.13$ y $p<0.10$.

4.6.2 Gráficas

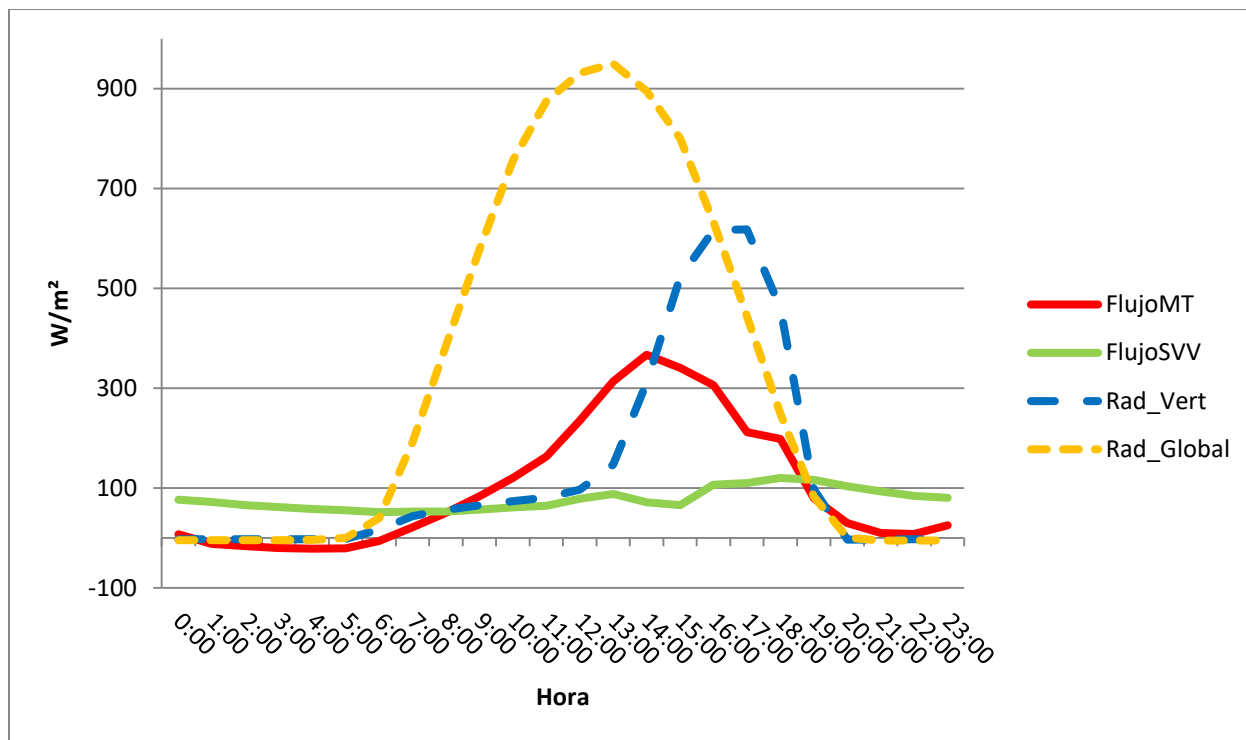
Se presentan a continuación los resultados de los promedios de temperatura sobre las superficies.



Gráfica 56. Promedio de temperatura superficie – Campaña 3.

Las temperaturas de superficie (gráfica 56), presentan la mayor diferencia entre las 15:00 a las 17:00 h, la cual, representa 5 °C entre ellas (MT-SVV), mientras que la diferencia con la temperatura de aire en la estación de referencia es de 20 °C.

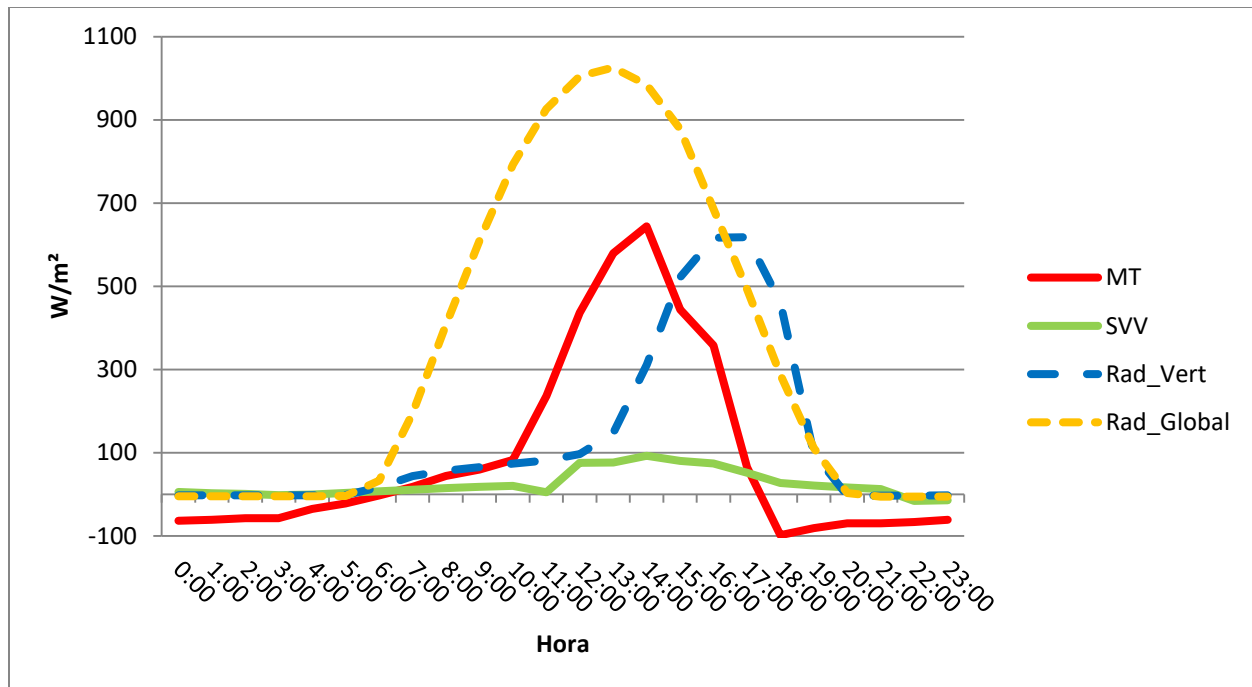
En cuanto a los flujos de calor (gráfica 57 y 58), existen dos variables en esta temporada, la primera de ellas es lo obtenido previo a la adición del elemento arquitectónico para aumentar el sombreado, que a continuación se muestra:



Gráfica 57. Promedio de flujos de calor, Radiación Global y Radiación Vertical – Campaña 3.

Donde (Gráfica 57) se observa un comportamiento similar a la Campaña 1, aunque con magnitudes mayores para la Campaña 3, con valores máximos en MT igual a 522.19 W/m² y Rad_Vert 671.83 W/m² y valores de Rad_Global con un valor promedio máximo de 955 W/m². En contraste con los valores que arroja el sensor en la SVV (178.41 W/m²) muy por debajo de MT y Rad Vert. Sin embargo, al colocar al experimento un elemento arquitectónico (malla sombra de polietileno de alta densidad, con porcentaje de sombra de 80%) se obtuvieron los siguientes valores.

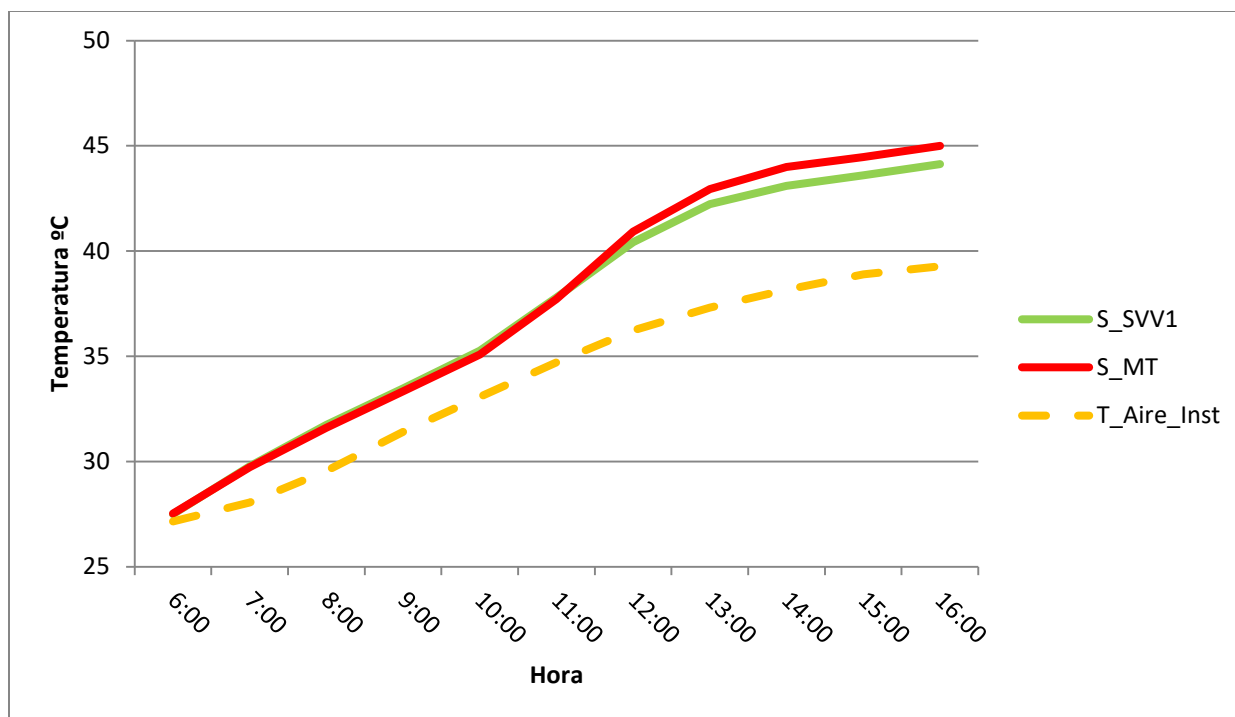
Como se mencionó en la Campaña 1, para la obtención del porcentaje de flujo de calor que ingresa en la vivienda fue necesario calcular el área bajo la curva. Para la campaña 3 se consideró los resultados de la gráfica 57, donde el flujo que pasa por MT representa el 77.84% de la radiación incidente (Rad_Vert), mientras que la SVV permite el paso de solo el 58.11%.



Gráfica 58. Promedio de flujos de calor con elemento arquitectónico, Radiación Global y Radiación Vertical– Campaña 3.

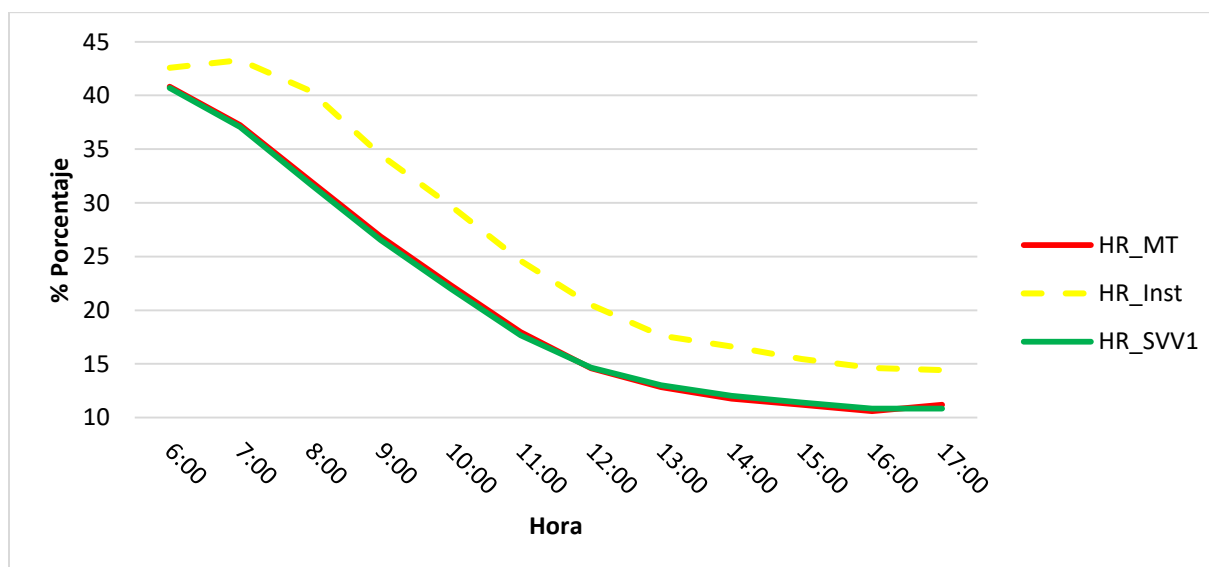
Donde (gráfica 58) ahora el comportamiento de Rad_Vert (493.59 W/m²) y MT (444.12 W/m²) son parecidos pero con defasamiento en la línea del tiempo, y el comportamiento de SVV (92.5 W/m²) con la ayuda del elemento arquitectónico bajó su magnitud en las horas de mayor incidencia solar (13:00 a las 17:00 h).

Indicando así, que el elemento arquitectónico contribuye a disminuir 15% la ganancia de calor. Para poder estimar esto, fue necesario hacer una comparación entre los flujos correspondientes a junio y julio, es decir, se consideraron y compararon 2 semanas anteriores (gráfica 57) a la colocación de la malla sombra y 2 semanas posteriores.



Gráfica 59. Promedio temperatura del aire – Campaña 3.

En cuanto la temperatura de aire (gráfica 59) de nuevo observamos que la mayor diferencia se presenta en las horas de mayor incidencia solar 12:00-16:00 h, observando también un diferencial de hasta 5 °C entre la estación de referencia y el MT.

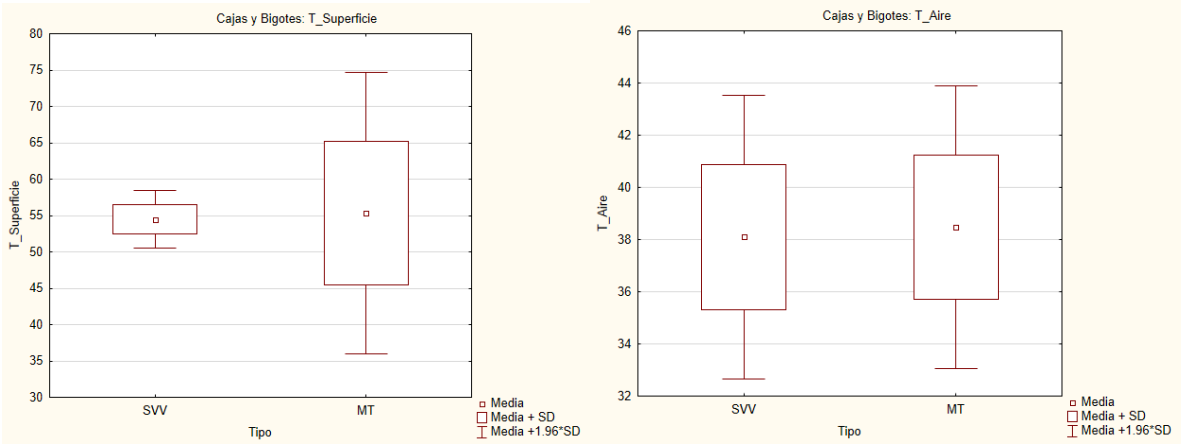


Gráfica 60. Promedio humedad relativa – Campaña 3.

Mientras que el comportamiento de la humedad relativa (gráfica 60) es bajo en las horas de mayor incidencia. Lo esperado para la zona climática manteniéndose por debajo de 6% respecto a la estación de referencia.

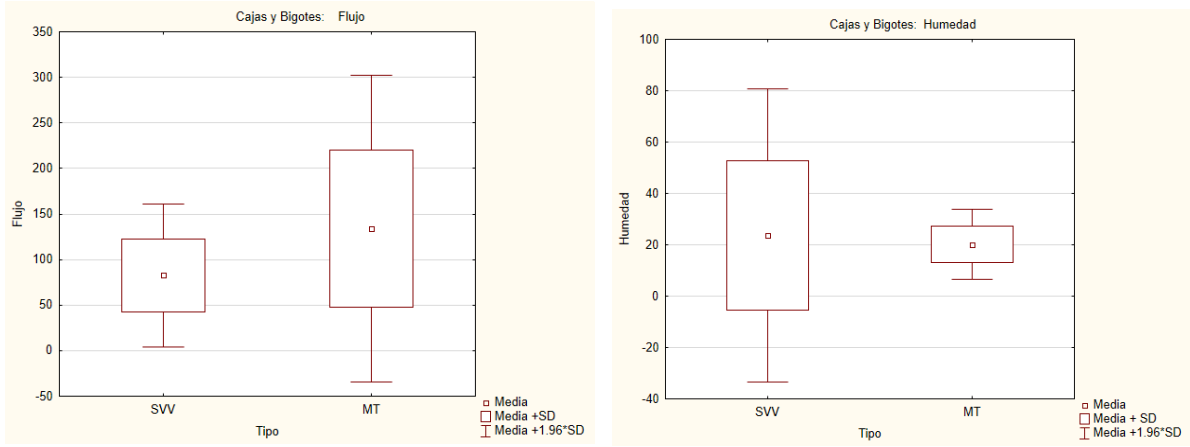
4.6.3 Gráficas de cajas y bigotes

De la misma manera, que en la campaña 1, se compararon los datos obtenidos entre la SVV y MT, se descartaron datos extremos lo que permitió una mejor visualización de los promedios diarios diurnos con mayor incidencia solar (12:00 a 16:00). A continuación se presentan los siguientes resultados:



Gráfica 61. Cajas y bigotes Temp Sup.

Gráfica 62. Cajas y bigotes Temp Aire.



Gráfica 63. Cajas y bigotes Flujo.

Gráfica 64. Cajas y bigotes HR.

Se observó para la temperatura de superficie (gráfica 61), que los rangos de los datos en MT muestran una mayor variabilidad, así como el tamaño de su caja, sin embargo, la media está en la misma posición en ambos grupos, mismo comportamiento se presenta

en humedad relativa (gráfica 64), mientras que la temperatura de aire (gráfica 62) aunque el tamaño de la gráficas son muy parecidas, se observa que la media es menor en SVV que MT por 1 °C. En cuanto al flujo (gráfica 63) el tamaño es muy diferente, tanto de la caja como de los bigotes, incluso en la media se aprecia con facilidad la diferencia, mientras SVV está entre 75 W/m² en MT se aprecia en 130 W/m².

4.6.4 ANOVA

En la diferencia de medias se utilizó $\alpha=0.05$, se clasifican los datos en dos grupos, SVV y MT, para hacer la comparación entre ellos. Los datos que se utilizaron fueron los promedios horario diario (7:00 – 16:00), obteniendo los siguientes resultados, tabla 14:

Tabla 14. Diferencia de medias por grupo SVV-MT, campaña 3.

PRUEBA T POR GRUPO				HOTTELING T ² =25.5		F(4.92)=6.2		P<.00019	
VARIABLE	Media SVV	Media MT	Valor t	Error	Valor p	Desv. Stand. SVV	Desv. Stand. MT	F Varianza	P Varianza
TEMP_SUP	54.5	55.4	-0.6	100	0.5	2	9.9	24.1	0
FLUJO	85.56	133.9	-3.7	94	0	40.2	86	4.6	0
TEMP_AIRE	38.1	38.5	-0.7	99	0.5	2.8	2.8	1	1
HR	23.7	20.2	0.8	98	0.4	29.1	7	17.2	0

Se observan algunas diferencias en las medias (T_Superficie, Humedad y Flujo), sin embargo la única diferencia estadísticamente significativa se presenta en el flujo.

4.7. Implicaciones energéticas y emisiones de GEI

Para añadir algunos indicadores criterio a esta discusión, se realizaron cálculos de consumo eléctrico de equipo A/C y estimaciones de GEI. En la tablas 15 y 18 presentan los datos promedios horarios de las temporadas de verano (campañas 1 y 3) lo que permite visualizar el ahorro en consumo eléctrico, así como consecuencia las cargas evitadas de GEI no emitidas debido al impacto positivo de la SVV.

Tabla 15. Resultados del análisis energético - Campaña 1

Hora Local	Flujo kW/m²		Δ Flujo kW/m²	Δ Flujo x área kW	Btu/h	Tons AC	kWh
	MT	SVV	MT-SVV	38m²			excedentes
Campaña 1							
12:00	0.15	0.07	0.08	3.04	10378.96	0.86	1.23
13:00	0.20	0.09	0.11	4.18	14271.08	1.18	1.71
14:00	0.30	0.12	0.18	6.84	23352.68	1.94	2.80
15:00	0.32	0.13	0.19	7.22	24650.05	2.05	2.95
16:00	0.29	0.14	0.15	5.71	19494.71	1.62	2.35
17:00	0.29	0.18	0.11	4.18	14271.08	1.18	1.71
18:00	0.23	0.18	0.05	1.09	3721.41	0.31	0.44
Sumatoria	1.78	0.91	0.87	32.26	110139.97	9.14	13.19

La tabla 15, presenta indicadores energéticos derivados y procesados de la campaña 1, donde se muestran los valores de los flujos de calor (MT y SVV) y su diferencial (MT-SVV), después se multiplicó por el área total del muro, asumiendo una cobertura total de vegetación en él (38 m²). El resultado obtenido (kW) fue convertido a Btu/h y posteriormente a la cantidad de toneladas de AC (12000 Btu = 1 Ton AC) necesarias para contrarrestar el flujo excedente a través del muro sin SVV. Este resultado es la cantidad de toneladas AC que se dejaron de utilizar con el uso de la SVV, y con este dato se calculó los kWh excedentes al multiplicarlos por el factor de conversión 1.44 kWh/ton propuesto por ASHRAE (caso Phoenix tabla 4.2.9, 2007) para climas secos-áridos.

La sumatoria de estos datos en el horario de mayor exposición solar (12:00 a 18:00 h) en orientación oeste, alcanza hasta 9.14 Toneladas de AC lo que implica un consumo de 13.19 kWh de energía eléctrica. Finalmente para establecer el impacto de este consumo excedente en términos ambientales, este consumo se multiplicó por la cantidad de días de temporada cálida considerados para el experimento (85 días x 13.19 kWh = 1121.15 kWh), éste se introdujo en la calculadora de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), herramienta que permite estimar la cantidad de CO_{2e}, resultando en 793 kilogramos, que equivale a:

Tabla 16. Tabla de CO₂e para Campaña 1

Campaña 1	kWh= Emisiones 1121.15 kWh = 793 kg	Equivalentes de los GEI
		328.19 litros de gasolina consumidos
		3030.39 kilómetros promedio de automóvil
		382.37 kg de carbón quemado
		0.134 electricidad anual de una casa
		98212 cargas de celular
		29.3 lámparas de incandescentes a LEDs
		1.8 barriles de petróleo consumido
		31.18 cilindros de propano para parrilladas

Como se menciona en el capítulo de resultados, la campaña 2 fue realizada durante temporada invernal, si bien, el comportamiento de la curva en las temperaturas de superficie en las horas de exposición (12:00 – 18:00 h), parecería similar como lo mostrado en la gráfica 44, sin embargo las magnitudes están por debajo de los 25 °C, que fue idealmente la temperatura que se controló en el espacio interior durante la temporada de verano, lo que hace notorio que en invierno la temperatura interna en algunos casos sea mayor que la externa.

Al comparar la temperatura del aire exterior que se muestra en la gráfica 46, solo durante el horario de 14:00 a 15:00 la temperatura de aire en MT supera los 25 °C, por lo que en algunas horas del día podemos decir que el comportamiento en el flujo de calor se invierte, es decir, el calor va del interior del muro hacia el exterior, por lo que se puede asumir que es pérdida de calor, esto se muestra en los datos de la tabla 20:

Tabla 17. Resultados de análisis energético - Campaña 2.

Hora Local	Flujo kW/m²		Δ Flujo kW/m²	kW/m² * área
	MT	SVV	MT-SVV	38m²
Campaña 2				
12:00	-26.32	-12.23	-14.09	-535.42
13:00	-10.67	-13.73	3.06	116.28
14:00	12.85	-10.46	23.31	885.78
15:00	6.56	-4.62	11.18	424.84
16:00	-6.19	-3.83	-2.36	-89.68
17:00	-14.40	-7.70	-6.70	-254.60
18:00	-54.18	-14.07	-40.11	-1524.18

Sumatoria	-92.35	-66.64	-25.71	-976.98
-----------	--------	--------	--------	---------

La tabla 17, muestra lo mencionado anteriormente, donde el signo negativo en la magnitud de los flujos sombreados con color gris, representa que el calor va desde el interior del muro al exterior. Como se menciona tanto en la literatura, como en los resultados, las SVV funcionan como un aislante natural, y minimizan los flujos a través de ellas. Esto también es posible observar con los datos de la tabla 20, donde la pérdida de calor en MT es mayor que en SVV, principalmente en las horas en que la incidencia solar disminuye. Durante las 13, 14 y 15 horas, se aprecia que la ganancia de calor es hacia adentro.

El análisis de consumo energético y de emisiones de GEI para la campaña 2 no se realiza y presenta en esta sección de la misma manera que las campañas 1 y 3, ya que el objetivo principal de esta investigación es el impacto positivo de las SVV en temporada cálida. Para estudios relacionados con necesidades de calefacción, es necesario replantear otro tipo de experimentación, lo cual queda fuera del alcance de este estudio.

En el caso de la campaña 3, ésta presenta una variante, la cual consistió en añadir un elemento arquitectónico a la SVV con el fin de evaluar cómo funcionaba en conjunto. Para esto, se colocó una malla sombra lo que favoreció el área de sombreado sobre la SVV y redujo el estrés en la vegetación. Lo que resultó en lo siguiente, tabla 22:

Tabla 18. Resultados de análisis energético, Campaña 3.

Hora Local	Flujo kW/m²		Δ Flujo kW/m²	kW/m² * área	Btu/h	Tons AC	kWh
	MT	SVV	MT-SVV	38m²			excedentes
Campaña 3							
12:00	0.17	0.05	0.12	4.56	15568.45	1.29	1.87
13:00	0.29	0.07	0.22	8.36	28542.16	2.37	3.42
14:00	0.40	0.11	0.29	11.02	37623.76	3.13	4.51
15:00	0.42	0.14	0.28	10.64	36326.39	3.02	4.36
16:00	0.34	0.14	0.20	7.6	25947.42	2.16	3.11
17:00	0.15	0.11	0.03	1.14	3892.11	0.32	0.46
18:00	0.07	0.08	-0.01	-3.8	-12973.71	-1.08	-1.55
Sumatoria	1.83	0.70	1.12	39.52	134926.58	11.21	16.18

Con el mismo procedimiento y análisis que se realizó en la campaña 1 (tabla 18), la tabla 22 muestra 11.21 Toneladas adicionales de AC y 16.18 kWh excedentes para un día, es decir la superficie MT provoca mayores requerimientos de acondicionamiento y consumos que el nuevo conjunto SVV+malla-sombra. Los valores del diferencial entre MT-SVV de la campaña 3 son mayores que los se muestran en la campaña 1. En cuanto

a las variables climáticas, los valores y el comportamiento es similar en ambas campañas. Gracias a la malla sombra el flujo de calor se redujo en un 20%, según los datos obtenidos de ambas campañas, esto fue debido al elemento arquitectónico añadido en la campaña 3. De la misma manera, con la calculadora de la EPA se calculó que 972 kg de CO₂eq. se dejan de emitir, durante el periodo cálido, lo que se muestra la tabla 23:

Tabla 19. Equivalentes de kWh a GEI, Campaña 3.

Campaña 3	kWh= Emisiones 1375.3 kWh = 972 kg	Equivalentes de los GEI
		369.45 litros de gasolina consumidos
		3909.09 kilómetros promedio de automóvil
		492.60 kg de carbón quemado
		0.173 electricidad anual de una casa
		126660 cargas de celular
		37.7 lámparas de incandescentes a LEDs
		2.3 barriles de petróleo consumido
		40.6 cilindros de propano para parrilladas

Si consideramos que lo registrado en términos energéticos y de temperatura superficial por el MT es el 100% del muro oeste hacia el interior del edificio en un horario de 12:00 a 18:00 h, la cantidad registrada de calor por SVV es menor para la campaña 1 en un 48.87%, mientras que con el uso de SVV+malla-sombra, el porcentaje de ahorro aumenta a 61.74%.

4.8. Cámara termográfica.

Para respaldar lo obtenido en la última campaña de experimentación, se utilizó una cámara termográfica marca FLIR modelo T620, solo por un día de imágenes térmicas cada hora durante la incidencia solar. Se tomaron fotografías termográficas que permitieron comparar entre sí las áreas bajo estudio.

Solo se consideró un día, debido a que los datos obtenidos a través de este método son poco confiables, al no estar de manera perpendicular las superficies de las hojas de la planta al lente de la cámara, no es certero, pero si aproximado el dato. Es por eso que se presenta solo como una ayuda visual sobre el funcionamiento del fenómeno.

Para captar imágenes termográficas durante un día típico de alta radiación solar, se seleccionó el día 29 de agosto del 2019, bajo condiciones de cielo despejado (radiación global máxima 924.17 W/m^2) y vientos que para fines prácticos fueron despreciables (2.37 m/s). A continuación, las imágenes obtenidas.

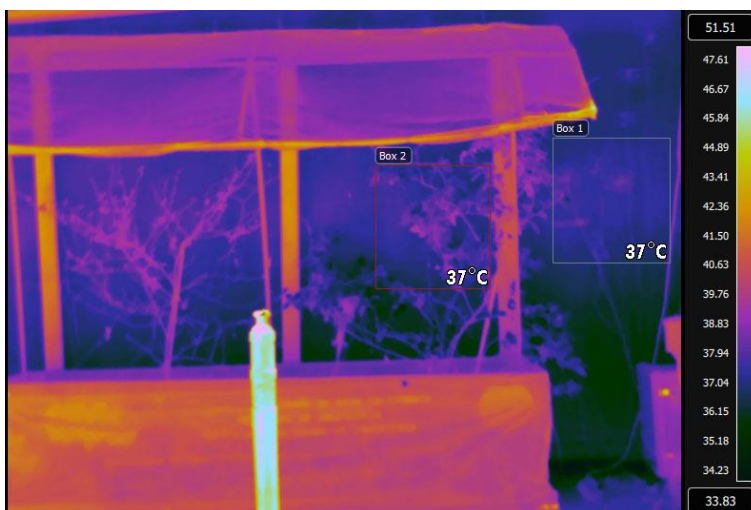


Figura 24. Fotografía térmica Sitio Experimentación 12:00h

En la figura 24, en recuadros de 0.5 m por 0.5m (0.25m^2) se muestran los promedios de cada área, se observa de lado izquierdo la superficie con SVV y de lado derecho la superficie MT, en este horario por la orientación oeste del muro aún no existe incidencia solar, por lo que ambas temperaturas son iguales.

Aunque la incidencia solar se presenta a partir de las 13:00 h, la ganancia de calor en los materiales a base de concreto, es lenta, por lo que se aprecia mejor hasta 14:00 h (figura 24). Donde observamos lo siguiente:

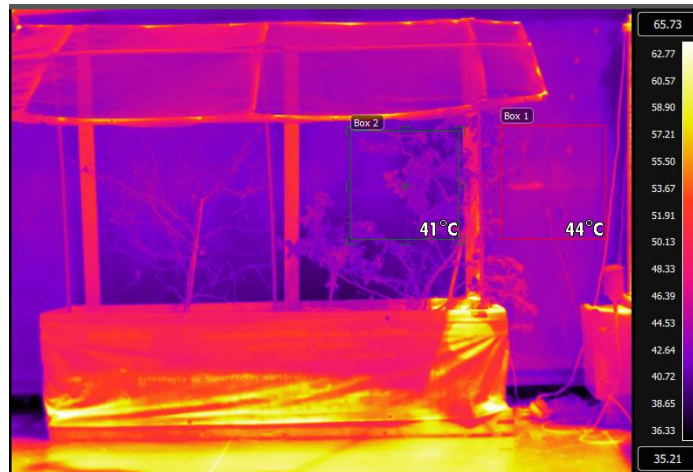


Figura 25. Fotografía térmica sitio experimental 14:00h

Lo que muestra la figura 25 es una mayor diferencia promedio entre ambas áreas, donde la correspondiente a la SVV indica 41 °C y el MT 44 °C, lo cual nos da una diferencia de 3 °C entre ambas.

El mayor contraste de temperatura se obtiene durante el horario de 17:00 h, como se muestra en la figura 25 a continuación:



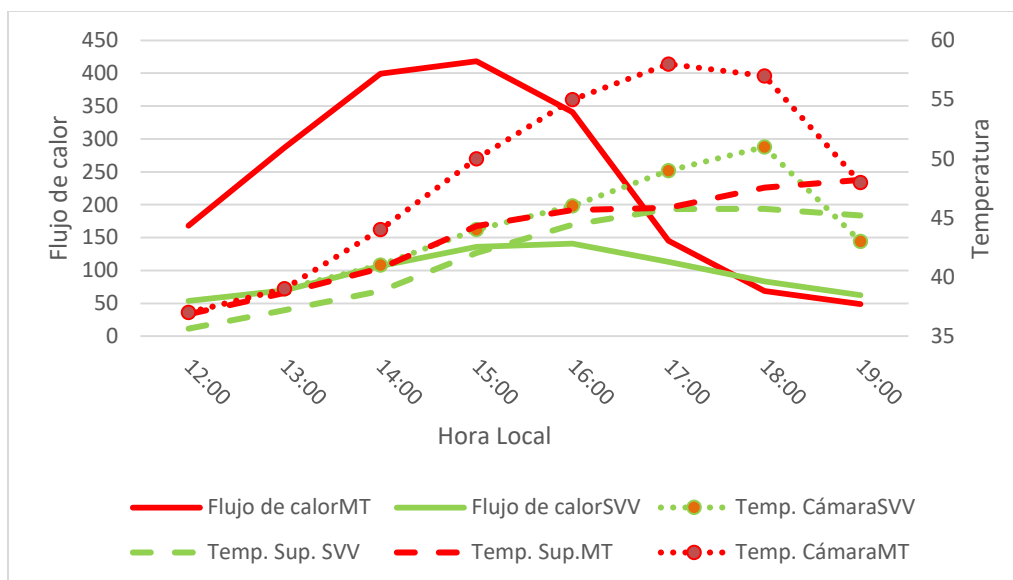
Figura 26. Fotografía térmica sitio experimental 17:00h

A pesar de que la incidencia solar ha disminuido por la caída del sol, el acumulamiento de calor se aprecia mayor durante este horario figura 26, por medio de la diferencia de temperatura entre superficies, lo que representa una diferencia entre SVV y MT de 9 °C. De las fotos térmicas obtenidas ese día y adicionando otras variables, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 20. Datos comparativos entre termopares, sensores de flujo y cámara termográfica en promedios horarios
(Datos del 29 de Agosto 2019)

Hora	Temp. Sup. Termopares SVV °C	Temp. Cámara SVV °C	Flujo de calor SVV W/m ²	Temp. Sup. Termopares MT °C	Temp. Cámara MT °C	Flujo de calor MT W/m ²
12:00	35.64	37	53.57	36.86	37	168
13:00	37.19	39	69.8	38.67	39	287
14:00	38.83	41	106.81	40.73	44	399
15:00	42.04	44	135.71	44.3	50	418
16:00	44.42	46	140.58	45.65	55	341
17:00	45.75	49	113.3	45.86	58	145
18:00	45.76	51	83.43	47.55	57	69
19:00	45.21	43	62.33	48.21	48	49

La tabla 20 nos permite visualizar y comparar el comportamiento de las superficies estudiadas para un solo día, por lo que claramente en todas las variables se aprecia la tendencia ascendente de MT sobre SVV. A pesar de que no son idénticos, se aprecia una correspondencia entre las temperaturas. Esto se debe a que los valores arrojados por los termopares tipo T son promedios puntuales de tres termopares, mientras que el dato de la cámara es un promedio de área. La superficie del recuadro observado, al ser una unidad en área se compone de muchos pixeles de la imagen térmica, que arrojan un dato promedio único representativo de 0.25 m². Debido a ello, solo se utiliza esta medición como comparativa y no estadística de los datos, aunque confirma firmemente el comportamiento que hemos comentado anteriormente. Para comprender mejor lo anterior, se realizó una gráfica (gráfica 65), que se muestra a continuación:



Gráfica 65. Comparación de datos promedios horarios de Flujo de calor, Temperatura de superficie con termopares, Temperatura superficie cámara térmica, 29 de agosto 2019.

En la gráfica 65 se observan líneas continuas que representan el flujo de calor del muro, discontinuas con punto corresponden a los valores obtenidos por la cámara térmica y las líneas discontinuas a los valores de temperatura de superficie obtenidos a través de los termopares tipo T.

En la gráfica 65 se observa que, conforme avanza el asoleamiento de manera directa sobre el muro (avance en la hora local) la temperatura y el flujo de calor aumenta, después de las 17:00 h el flujo disminuye, pero la temperatura de superficie se mantiene hasta las 19:00 h. Lo cual es posible confirmar con los datos que los termopares tipo T registran, así como lo obtenido por la cámara termográfica.

CAPITULO 5. DISCUSIÓN

Con la intención de presentar de manera más concreta los resultados del proyecto, se coloca este capítulo, para cuestionar y argumentar los mismos.

5.1. Variables climáticas y su relación en el sitio

Una vez obtenidos los resultados, se observa que, aunque el clima no fue lo más favorable para el crecimiento de la vegetación, aún bajo condiciones adversas fue posible alcanzar los objetivos planteados.

El análisis del clima, indica ciertas condiciones para la consideración del proyecto; clima seco (tabla 3), humedad relativa menor a 30% (gráfica 26 y 35); temperatura de aire superior a 40 °C (gráfica 25 y 34) y radiación por encima de 900 W/m² (gráfica 12), condiciones que fueron medidas en sitio y comparadas con una estación meteorológica que fue usada como datos de referencia. Las condiciones del sitio complican que las plantas se desarrollen, el ambiente urbano formado de materiales pétreos incrementó la temperatura del aire del sitio en casi 10 °C, esta afirmación es posible visualizarla en la gráfica 25, al comparar los datos de temperatura de aire en MT contra lo medido por la estación de referencia, situación reflejada en los problemas de adaptación de la vegetación.

Adicional al clima y para extender el comentario anterior, el entorno urbano impacta directamente a la ganancia de calor, almacenada en las edificaciones derivado de las propiedades físicas de los materiales utilizados comúnmente para su construcción, mayormente concreto, lo anterior queda de manifiesto en las gráficas de temperatura de superficie (gráfica 32, 44 y 56). En el caso de sitio del experimento, se trataba de una construcción a base de muro de concreto prefabricado sin aislamiento como se muestra en la figura 21. En el caso del suelo, también se encontraba cubierto a base de concreto armado, como es posible observar en la figura 20. Estos cambios de tipo de suelo y la actividad humana modifican el intercambio energético entre la superficie y la baja atmósfera, lo que por ende afecta a la temperatura del aire a nivel transeúnte, considerando la medida establecida por *Neufert (1999)* de 1.80 m desde npt, esto se manifiesta en las gráficas de temperatura del aire en sitio (gráfica 34, 46 y 59).

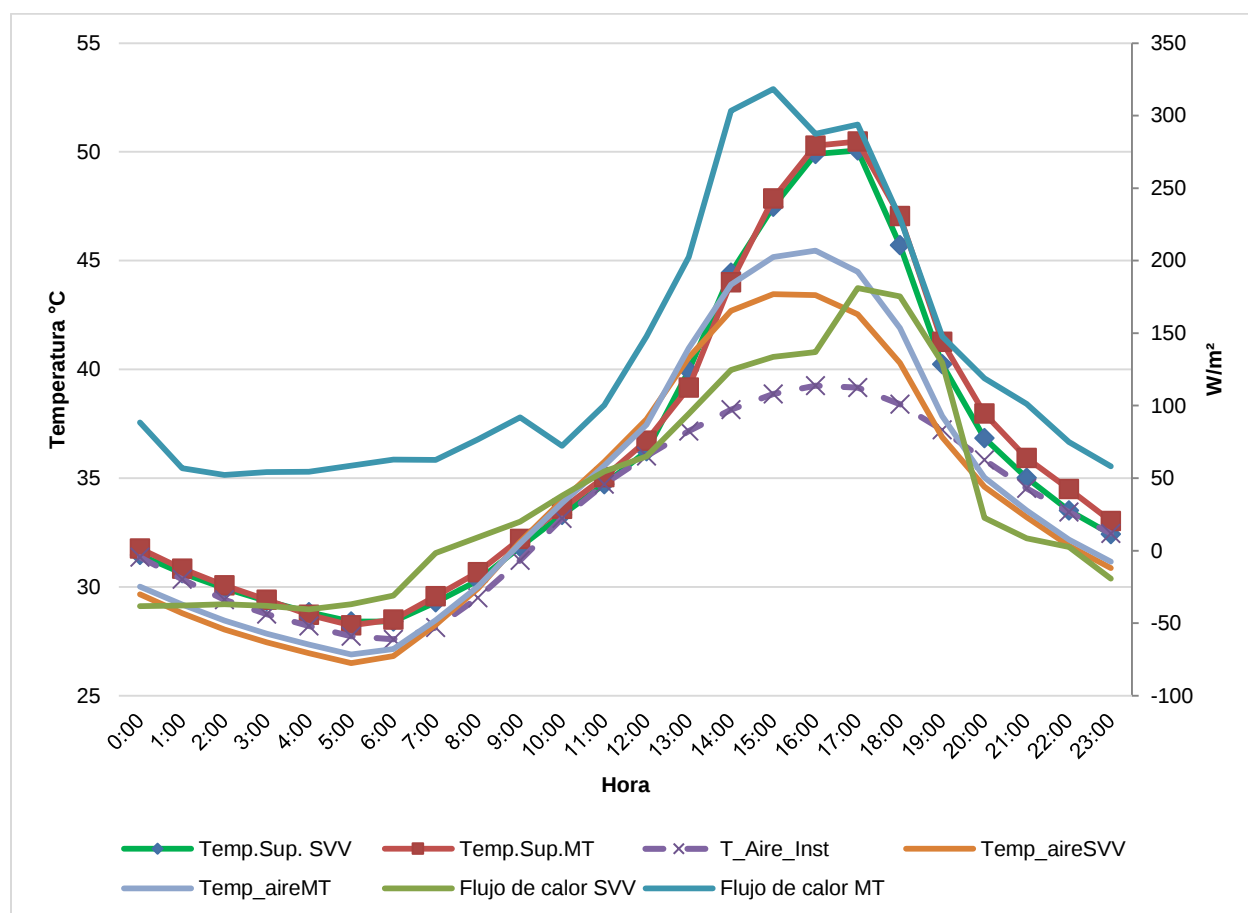
5.1.1 Orientación de edificación.

La orientación del muro es un factor importante para la ganancia de calor. En el hemisferio norte los muros que se encuentran en orientación sur y oeste, tienen un mayor horario de exposición directa a la radiación solar, comparados con los que se encuentran al norte y este; lo que origina una mayor ganancia de calor en ellos.

En el sitio de experimentación, donde la pared utilizada es la oeste, a través de la figura 20 que muestra el asoleamiento solar, es posible visualizar el tiempo de asoleamiento que

confirma lo mencionado en el párrafo anterior, el cual está entre las 11:00 y 19:00 horas (horario de verano).

Lo anterior, se refleja en la gráficas 21 y 22, con el sensor NR-01 que se utilizó para conocer la incidencia de radiación solar directa en el muro. Ésta se comparó con el flujo de calor que pasa a través de MT y SVV. En la barra correspondiente a MT (gráficas 23 y 24) es posible inferir que su valor está influenciado por el calor sensible y las aportaciones de calor por actividades antropogénicas al sitio, ya que en algunos horarios el flujo de calor de MT es mayor que la radiación solar incidente. Sin embargo, no es posible conocer certeramente cuánto es la contribución de calor antropogénico y sensible, ya que no se realizó un balance energético en el sitio, actividad no contemplada en el alcance de esta investigación.



Gráfica 66. Comparación Temperatura de Superficie/Temperatura del aire / Flujo de calor - Campañas 1 y 3.

Con el fin de reunir los elementos necesarios para esta discusión, en la gráfica 66, se presentan los datos obtenidos de las campañas 1 y 3 (verano). Se puede dividir el comportamiento en dos grupos, en el primero se colocaría la temperatura del aire de la

estación de referencia, temperatura de aire de SVV, la temperatura de aire MT y flujo de calor en SVV. El segundo grupo, formado por las temperaturas de superficie SVV, la temperatura de superficie en MT y flujo de calor en MT.

La gráfica 66, permite observar que el comportamiento es ascendente en las variables, conforme va aumentando la temperatura de superficie aumenta el flujo de calor. El flujo de calor en MT, que muestra un valor máximo de 318.52 W/m², muestra un comportamiento similar al que tienen las temperaturas de superficies con valores mayores a 50 °C. Mientras que el flujo de calor en SVV, tiene un valor máximo de 181.2 W/m², figura un comportamiento similar al que desarrollan las temperaturas de aire con valores máximos de 45.6 °C (Temp_aireMT) y 43.4 °C (Temp_aireSVV). Se observa una diferencia marcada entre la temperatura de aire de la estación de referencia y la temperatura del aire en sitio en un rango de 2 - 5°C (gráfica 25 y 34), al igual que con la temperatura de superficie (gráfica 32 y 56), en un rango de 10-15 °C. Sin embargo, a pesar de esas diferencias en los valores, su patrón de comportamiento horario es similar.

Si bien, las diferencias en las temperaturas (de superficie y del aire) entre MT y SVV son estadísticamente significantes en solo un rango de 2 a 3 °C, estas diferencias fueron suficientes para que el flujo de calor hacia el interior reflejara magnitudes estadísticamente significativas, de tal manera que es posible mitigarlo con la implementación de SVV, esto se muestra en las tablas de diferencia de medias 12 y 13, de la misma manera que en las gráficas flujo de calor (gráfica 33 y 57).

5.3 Vegetación implementada.

En cuanto a las plantas de tipo cissus (enredaderas) utilizadas para la primera campaña, éstas no fueron efectivas en orientación oeste, sus hojas se quemaron debido a la alta cantidad de radiación solar (gráfica 12) y se quedaron en un estado de senescencia durante la estación de verano al ser la más complicada por el estrés hídrico y térmico a los cuales fueron sometidas. A diferencia de la Bugambilea, que aún bajo las mismas condiciones de estrés siguió desarrollando follaje, pero en un tamaño menor que lo que se desarrolla en otras temporadas del año u otras orientaciones (Figura 22).

5.4 Comparación con estudio de Perini.

Para comparar esta investigación con los hallazgos de *Perini et al. (2011)*, una de las investigadoras más relevantes en el estado del arte, se presenta la siguiente tabla 21:

Tabla 21. Comparación de Resultados VS Perini et al. (2011).

Descripción de variable	Perini	Campos-Osorio
Temperatura de aire máxima en experimento.	40.9 °C	45.5 - 51.2 °C
Porcentaje de radiación que pasa al muro protegido por SVV.	5-30 %	29.8 – 41.6 %
Porcentaje ahorro de energía.	40-60 %	48.9 – 61.8 %
Diferencia de temperatura promedio de superficie entre MT y SVV	1.9-8.3 °C	0.9 - 1.1 °C

La primera diferencia que se observa entre ambos resultados es la temperatura de aire máxima, con una diferencia de hasta 10°C. Mientras que las diferencias entre temperaturas promedio de superficie MT y SVV va desde 1 °C entre los valores menores y hasta de 7.2 °C entre los valores mayores (tabla 24). Sin embargo, si se toma como referencia los rangos que maneja *Perini et al. (2011)*, los resultados arrojados en esta investigación van en el mismo sentido, a excepción de las temperaturas de superficie.

Esto se puede explicar por la zona climática del sitio del experimento. Los experimentos realizados por *Perini et al. (2011)* fueron en Italia, con clima mediterráneo; mientras que el experimento realizado en esta investigación se realizó en clima desértico árido, con mayor temperatura de aire. De la misma manera es posible explicar la diferencia entre temperaturas de superficie, mientras *Perini et al. (2011)* tiene una cobertura total real de vegetación en su muro, lo que permite un mayor diferencial de temperatura entre superficies, en este proyecto la cobertura vegetal sobre el muro fue de 36.6%.

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A través de esta investigación fue posible comprobar que con el diseño adecuado a las condiciones bioclimáticas, una SVV adaptada es capaz de reducir la carga térmica en una edificación, y por ende, disminuir el consumo energético, lo que resulta en un importantes beneficios al medio ambiente, ya que una menor cantidad de CO₂eq. se emite a la atmósfera por el uso excedente de A/C; planteamiento hipotético que dio origen a este estudio. Sin embargo, durante el proceso se encontraron limitaciones no contempladas en la formulación del experimento original.

Principalmente en lo que conlleva a la vegetación. A pesar de utilizar la más adaptada, un sistema de riego regular, nutrición adicional y mantener la humedad recomendada por la literatura; por la orientación y las condiciones circundantes donde se encontraba el experimento las especies de tipo trepador no sobrevivieron, lo que requirió cambiar a una especie más resistente aunque con menos densidad en el follaje.

El microclima que se desarrolla en las zonas urbanas, donde los materiales pétreos predominan, intensifica las condiciones calurosas y secas, lo que complica la sobrevivencia de las especies, no solo por el poco espacio disponible, sino por el aumento en algunos factores como la temperatura de aire y la reducción en la humedad aprovechable. Resultando en espacios interiores con poco confort térmico.

Por lo que, la efectividad de una SVV depende de varios factores, principalmente cuatro:

- Orientación de muro expuesto. Con ello, es posible conocer las condiciones a las que el sistema de SVV se encontrará, por lo que es un punto vital para el diseño y la selección de la especie.
- Estructura de suelo. Con la intención de garantizar el porcentaje de humedad requerido para el transporte de nutrientes del suelo a la planta.
- Selección de especie. Considerando la adaptación de la especie al clima, y el tamaño maduro de la planta.
- Mantenimiento de sistema. Debido a que las SVV contiene seres vivos, el adecuado seguimiento y mantenimiento del sistema ayuda al funcionamiento.

El análisis correcto de estos factores nos brindará como resultado la efectividad de la SVV. Se debe tomar en cuenta que al ser un método pasivo no se espera que se solucione por completo el problema, pero si ocurrirá cierto grado de mitigación. Además de eso, el análisis que se realizó solo aplica para el muro con orientación oeste, lo que deja abiertas futuras líneas de investigación para abordar más análisis con las cubiertas y otras orientaciones de muros.

Para el muro oeste se puede concluir que:

- La temperatura promedio del aire en el sitio de experimentación es mayor que la temperatura de la estación de referencia, hasta en 7 °C. Resultado del cambio de suelo, altitud a la que están colocados ambos sensores y los materiales de construcción en el cañón urbano.
- La humedad relativa en el sitio de experimentación es menor que la humedad relativa en la estación de referencia, hasta en 6%. Esto se debe a que los materiales de construcción en el sitio reducen la cantidad de humedad, a pesar de que existe vegetación. Ya que la proporción de vegetación es menor en comparación del concreto (46.13%).
- La SVV mitiga 49% del flujo de calor que llega al muro hacia el espacio interior.
- Con un elemento arquitectónico adicional la mitigación es 62% aproximadamente.
- En términos de emisiones de GEI, utilizando la combinación SVV con elemento arquitectónico, permite reducir hasta 972 kg de CO₂e (tabla 23).
- Algo muy relevante para proyectar los hallazgos son los equivalentes energéticos, es de destacar que para la época cálida, durante las campañas 1 y 3 respectivamente, los excedentes por no utilizar SVV llegan a ser de un 13.4 % y del 17.3 % del uso anual de una casa según las consideraciones de la calculadora de equivalentes energéticos y de GEI.

Los logros alcanzados en esta investigación fueron completos según el planteamiento inicial, permitiendo:

- Construir con material reciclado los contenedores para la siembra de las SVV.
- Obtener y analizar múltiples variables de estudio en una línea de tiempo suficiente para establecer resultados confiables.
- Experimentar en un sitio que presentara aspectos críticos y adversos desde el punto de vista de la urbanización para exponer las especies de SVV.
- Traducir en términos energéticos y medioambientales los beneficios al implementar SVV, utilizando un lenguaje sencillo y entendible hacia el público en general.
- Se logró establecer coincidencias de fondo respecto a los hallazgos de otras importantes y destacadas investigaciones, pero sobre todo, la que se describe en este estudio es único por las características propias de la región.

Por lo antes comentado, es sin duda, el efecto de sombreado, el que consigue reducir el flujo de energía, lo suficiente como para ser considerado un sistema pasivo efectivo. Las SVV actúan como un aislante térmico, mientras que en verano impiden la entrada de calor a las edificaciones, en invierno se observó un comportamiento inverso, reduciendo la salida de calor del muro.

Se recomienda se considere el producto de esta investigación para usos como:

- Lineamientos de diseño de vivienda. Con la intención de reducir la exposición directa a la radiación y por ende el consumo eléctrico, para el ahorro de energía de la vivienda, sobre todo en aquellas donde su espacio al exterior es reducido.

- Adaptación de espacios construidos. Cuando las opciones de mantenimiento no permiten colocar materiales nuevos o modificar las fachadas y sea necesario mitigar la radiación directa, este tipo de sistemas pasivos es ideal, al no ser invasivo y de poco mantenimiento.
- Aumentar el valor agregado a un inmueble. También pueden ser utilizados como propuesta paisajista en espacio donde no sea posible colocar vegetación de forma convencional.

Por último, pero no menos importante, se recomienda ampliar la investigación a plantas nativas y de otras especies, las cuales por falta de espacio y tiempo no fue posible considerar en lo desarrollado.

7. REFERENCIAS.

- Amaya C., Hernández C., Vargas A., Carrillo P. & Guevara N. (2018) Estimación Teórica de la Posible Captura de Gas Carbónico (CO₂) en la Ciudadela Real de Minas por Procesos de Urbanización entre los años 1995-2015, en la Ciudad de Bucaramanga, Departamento de Santander, Colombia. 16th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion", 19-21 July 2018, Lima, Peru. Doi: 10.18687/LACCEI2018.1.1.491.
- Afshari A., Nikolopoulou C., Martin M. (2014) Life-cycle analysis of building retrofits at the urban scale a case study in United Arab Emirates, *Sustainability* 6, 453–473.
- Aguirre-Salado C. A., Váldez-Lazalde J. R., Ángeles-Pérez G., De los Santos-Posada H. M. & Aguirre-Salado A. I. (2011) Mapeo del índice foliar y cobertura arbórea mediante fotografía hemisférica y datos SPOT 5 HRG: regresión y k-nn. *Agrociencia* 45. ISSN 2521-9766
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952011000100010
- Angeleswari M., Ravikumar V. (2019) Estimating evapotranspiration parameters by inverse modelling and non-linear optimization. *Agricultural Water Management* 223. Pág 105 DOI: 10.1016/j.agwat.2019.06.016 BBC (2017) "First human" discovered in Ethiopia.
<https://www.bbc.com/news/science-environment-31718336>
- Antonio, J. S. (2010) Forzamiento radiativo y cambios químicos en la atmósfera. *Revista Real Academia de las Ciencias Exactas, Física y Naturales* Vol. 104, 149-173, XI Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica. <http://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Forzamiento-radiativo-cambios-qu%C3%ADmicos-atm%C3%B3sfera.pdf>
- Alarcón D., Buraglia, M., & Mónica, T. (2011). Jardines verticales y sistemas botánicos en entornos urbanos. *REVISTA DIGITAL DE DISEÑO*, Universidad del Bosque.
- Alba, R. (2004). Elemento de ingeniería romana. España: Tarragona
- Alba R. (2004) Elementos de ingeniería romana. Editorial Tarragona. España.
- Alexander C., Ishikawa S., Silverstein M. (1977) *A Pattern Language*. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, España.
- Allen R.G., Smith M., Perrier A., & Pereira L.S. (1994) An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*. 43(2). 1-34
- Arkar, C., Domjan, S., & Medved, S. (2018). Lightweight composite timber façade wall with improved thermal response. *Sustainable cities and society*, 38, 325-332.
- Arnfield, A. J. & Grimmond C. S. B. (1998) An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. *Energy Build.*, 27, 61–68.
- Arya P. (1988) *Introduction to Micrometeorology*. Academic Press. Washington
- ASHRAE (2007) Standard 90.1-2007. Energy Efficient Design of New Building, except Low-Rise Residential Buildings. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta.
- Afshari A., Nikolopoulou C., Martin M. (2014) Life-cycle analysis of building retrofits at the urban scale a case study in United Arab Emirates, *Sustainability* 6, 453–473.

- Benvenuti, S., Malandrin, V., & Pardossi, A. (2016). Germination ecology of wild living walls for sustainable vertical garden in urban environment. *Scientia horticultrae*, 203, 185-191.
- Berardi U., GhaffarianHoseini A.H. & GhaffarianHoseini A. (2014). State of the art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115, 411-428.
DOI:10.1016/j.apenergy.2013.10.047
- Blanc, P. (2008) *The vertical garden: From nature to the city*. Norton Ed. New York
- Bowler, D.E., Buyung-Ali, L., Knight, T.M., Pullin, A.S. (2010) Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. *Landscape Urban Plan.*97, 147-155.
DOI:10.1016/j.landurbplan.2010.05.006
- Buckland-Nicks M., Heim A. & Lundholm J (2016) Spatial enviromental heterogeneity affects plant grow and thermal performance on a green roof. *Sciences of the total Environment* 553, 20-31
- Burder, S. (1990) *Visionaries & Planners: The Garden City Movement and the Modern Community*. Oxford University Press. New York.
- Carmouze, J. P. (1991). V. 6 El balance energético. *El Lago Titicaca: síntesis del conocimiento limnológico actual*, Editorial ORSTOM. Bolivia.
- Castañón, G. (2000). *Ingeniería en riego. Utilización racional del agua*. Madrid: Thomson Editores Spain.
- Charoenkit S. & Yiemwattana S. (2016) Living walls and their contribution to improved thermal comfort and carbon emission reduction: A review. *Building and Environment* 105, 82-94
- Chen, L., Ng, E., An, X., Ren, C., Lee, M., Wang, U., He, Z., (2012) Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperatura differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based simulation approach. *Int. J. Climatol.* 320 (1), 121–136. ISSN 08998418. jan. <https://doi.org/10.1002/joc.2243> URL. <http://doi.wiley.com/10.1002/joc.2243>.
- Childers D., Pickett S., Morgan J., Ogden L. & Whitmer A. (2014). Advancing urban sustainability theory and action: Challenges and. *Landscape and Urban Planning*, 320-328
- Chong A. (1989) *Vegetación en zonas áridas*. Tesis de maestría. UABC.
- Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., & Cabeza, L. F. (2014). New green facades as passive systems for energy savings on buildings. *Energy Procedia*, 57, 1851-1859.
- CONAPO. (2012). *Catálogo Sistema Urbano Nacional*. México: Secretaría de Desarrollo Social.
- Coras, P. (2006). Elementos climáticos y su relación con la fluctuación del nivel freático. *Terra Latinoamericana* 24, pág. 375-382. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=573/57311103009>
- Cristo-Cabo J. (2016) *Cambio del modelo gestión del estacionamiento regulado en Barcelona*. Tesis Maestría. Universidad Politecnica de Catalunya.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/101326/TFG_Cristo%20Cabo%2c%20Jorge%20Francisco.pdf?sequence=1&isAllowed=y

De Moraes, M.V.B., de Freitas, E.D., Marciotto, E.R., Guerrero, V.V.U., Martins, L.D., Martins, J.A., (2018) Implementation of observed sky-view factor in a mesoscale model for sensitivity studies of the urban meteorology. *Sustainability* 100 (7), 2183. 0. ISSN 20711050. jun. <https://doi.org/10.3390/su10072183>. <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2183>.

Dettwiller, J. (1970). Deep soil temperature trends and urban effects at Paris. *Journal of Applied Meteorology* 9, 178-180. [https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450\(1970\)009%3C0178%3ADSTTAU%3E2.0.CO%3B2](https://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/1520-0450(1970)009%3C0178%3ADSTTAU%3E2.0.CO%3B2)

Dewan A. M., & Yamaguchi Y. (2009). Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography* 29, 390–401.

Djedjig R., Bozzonet E. & Belarbi (2016). Modeling green wall interactions with street canyons. *Urban Climate* 16, 75-85 DOI: 10.1016/j.uclim.2015.12.003

Elgizawy, E. (2016). The Effect of Green Facades in Landscape Ecology. *Procedia Environmental Sciences* 34, 119-130 DOI: 10.1016/j.proenv.2016.04.012

Eslava, J. A. (1993). Climatología y diversidad climática de Colombia. *Revista Academia Colombiana de Ciencias Exactas Físicas y Naturales* 18, 507-538. http://accefyn.com/revista/Volumen_18/71/508-538.pdf

Espin, D. (2013) El bosque urbanizado: caso San Pablo Chimalpa. Tesis Maestro en Diseño Urbano. Universidad Autónoma Metropolitana, México. <http://zaloamati.azc.uam.mx/handle/11191/2496>.

Flores S., Filippin C. & Lesino G. (2015). Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 56-67

Gago, E.J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., Ordóñez, J. (2013) The city and urban heat islands: a review of strategies to mitigate adverse effects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 749–758. DOI:10.1016/j.rser.2013.05.057.

Gál, T., Rzepa, M., Gromek, B., Unger, J., (2007) Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *ACTA Climatologica Et Chorologica* 17–26 Universitatis Szegediensis, Universitatis Szegediensis.

Galindo, M. (2012). La vivienda del desierto con sistemas constructivos y de climatización de bajo consumo energético. Mexicali, B.C. Mexico: Universidad Autónoma de Baja California.

García, D. (1974). Iniciación al Urbanismo. México: Universidad Nacional Autónoma de México.

García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México: Instituto de Geografía, UNAM.

García, J. (2012). Crecimiento urbano, tecnologías de información y comunicación (TIC). Mexicali: Universidad Autónoma de Baja California

García-Cueto R., Jauregui E., Toudert D. & Tejeda-Martínez A. (2007). Detection of the urban heat in Mexicali, B.C., Mexico. *Atmosfera* 20, 111-131.

García-Cueto R., Santillán-Soto N., Haro-Rincón Z. Ojeda S. & Bojórquez-Morales G. (2015) Parameterization of net radiation in an arid city of northwestern Mexico. *Atmósfera* 28, 71-82. DOI: 10.1016/S0187-6236(15)30001-1

García-Villalpando J. A., Castillo-Morales A., Ramírez-Guzmán M. E., Rendón-Sánchez G. & Larqué-Saavedra M. U. (2001) Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia* 35, pág. 79-86.[fecha de Consulta 13 de Abril de 2020]. ISSN: 1405-3195. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=302/30235107>

Galindo, M. (2012). La vivienda del desierto con sistemas constructivos y de climatización de bajo consumo energético. Mexicali, B.C. Mexico: Universidad Autónoma de Baja California.

Ghaffarianhoseini A., Ghaffarianhoseini A., Berardi U., Tookey J., Hin D. & Kariminia S. (2016). Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60, 1052-1065

Gilgen H. & Ohmura A. (1999) The Global Energy Balance Archive. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 831–850

Giridhar, G., Deval, K., Maheswari, R. C., & Vasudevan, P. (1985). Bougainvillea: a source of energy. *Biomass*, 7(3), 241-244.

Google Maps. Sitio experimentación [Mapa online]. 1:30.000. Recuperado de <https://www.google.com/maps/place/Mexicali/@32.380448,115.263857,14.25z/>. Consultado el 20 de septiembre del 2017.

Haggag M., Hassan A. & Elmasry S. (2014). Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat load climate. *Energy and Buildings* 82, 668-674

Harris C. W. & Dines N. T. (1998) Time-Saver Standards for Landscape Architecture: Second Edition, McGraw-Hill Publishing Co

Hernández J. Santana L. (2008) Evapotranspiración Penman-Monteith: Análisis año 2008. AgroCabildo Tenerife. <http://www.agrocabildo.org/publica/analisisclimatico/evapotrans2008.pdf>

Herrada M. A., Gutiérrez-Martin A. & Montanero J. M. (2014) Modeling infiltration rates in a saturated/unsaturated soil under the free draining condition. *Journal of Hydrology* 515, 10-15. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.026

Heuveldop J., Pardo J., Quirós S. & Espinoza L. (1986) Agroclimatología tropical. Editorial Universidad a distancia. Costa Rica.

Howard E. (1909) Garden Cities of Tomorrow. Swan Sonnenschein & Co. London

Hunter A., Williams N., Rayner J., Aye L., Hes D. & Livesley S. (2014). Quantifying the thermal performance of green facades: A critical review. *Ecological Engineering*, 102-113.

Hydrognomon (Versión 4.0). Recuperado de <http://hydrognomon.org/>

Incropera F. & De Witt D. (1999) Fundamentos de transferencia de calor y masa. 4ta Edición, Prentice Hall. México.

- INEGI. (2007). La agricultura en Baja California. *Censo Agropecuario 2007*, 3-6
- INEGI. (2017, 02 20). *Metadatos INEGI*. [Fecha de consulta 20 de Febrero 2017] Metadatos INEGI: <http://www.beta.inegi.org.mx>
- Kittler R. & Darula S. (2013). Determination of time and sun position system. *Solar Energy* 93, 72-79
- Kolmans E. & Vázquez D. (1999) Manual de Agricultura ecológica: Una introducción a los principios básicos y su aplicación. Segunda Edición, Grupo Agricultura orgánica de ACTAF. Cuba.
<http://web.bioquirama.com/pdf/MANUAL-DE-AGRICULTURA-ECOLOGICA.pdf>
- Köhler, M. (2008). Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4), 423.
- Koyama T., Yoshinaga M., Hayashi H., Maeda K. I., & Yamauchi A. (2013). Identification of key plant traits contributing to the cooling effects of green façades using freestanding walls. *Building and Environment* 66, 96–103.
- Kreider, J. F., & Rabl, A. (1994). Heating and cooling of buildings: design for efficiency McGraw-Hill. *New York*.
- Ley, J. A. (2011). *Arquitectura y tecnología*. Mexicali, Baja California: UABC Departamento Editorial.
- Li G., Ren Z., Zhan C. (2019) Sky View Factor-Based Correlation of Landscape Morphology and the Thermal Environment of Street Canyons: A Case Study of Harbin, China. *Building and Environment* 106, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106587>.
- Liu Z., He C., Zhou Y. & Wu J. (2014). How much of the world's land has been urbanized, really? A hierarchical framework for avoiding confusion. *Landscape Ecol*, 763-771
- López M., Rubio R., Martín S. & Croxford B. (2017). How plants inspire facades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67, 692-703
- López E. & González B. (2014) Diseño y análisis de experimentos: fundamentos y aplicación en agronomía. 2da Edición. Universidad de San Carlos de Guatemala: Facultad de agronomía. Guatemala.
- Lynch K. (2008) La imagen de la ciudad. 2da Edición. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, España.
- Michael Buckland-Nicks A. H., Heim A. & Lundholm J. (2016). Spatial environmental heterogeneity affects plant growth and thermal performance on a green roof. *Science of the Total Environment* 553, 20-31. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.02.063
- Manso J. & Castro-Gomes M. (2015) Green Wall Systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41. 863-871.
- Mazzali U., Peron F., Romagnoli P., Pulselli R. M. & Bastiononi F. (2013). Experimental investigation on the energy performance of LivingWalls. *Building and Environment* 64, 57-66. DOI: doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.03.005
- Middel, A., Lukasczyk, J., Maciejewski, R., Demuzere, M., Roth, M., (2018) Sky view factor footprints for urban climate modeling. In: *Urban Climate*. vol. 25. pp. 120–134. ISSN 22120955. sep.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.05.004> URL. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.library.wur.nl/science/article/pii/S2212095518301883>.

Minke G. (2012) Muros y fachadas verdes, jardines verticales. Editorial Icaria. España.

Molina A. (2017) What is the real significance of p-value? *Pediatr Aten Primaria* vol.19 no.76 Scielo, ISSN 1139-7632, Madrid. http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-76322017000500014

Monteith J. & Unsworth M. (1973) *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Fourth Edition. Elsevier, London.

Moreno, S. (2008). La habitabilidad urbana como condición de calidad de vida. *Palapa*, 3(2), 47-54. <https://www.redalyc.org/pdf/948/94814774007.pdf>

Mungaray, A., Escamilla, A., Ramírez, N., & Aguilar, J. (2014). Crisis, migration and employment structure in Baja California. *Estudios Fronterizos*, Vol. 15 no. 29

Murgul V., Vatin N. & Zayats I. (2015). The Role of the Solar Light Quantity in the Architectural Forming of Buildings. *Procedia Engineering* 117, 819-824.

Naghdi R., Solgi A. & Ilstedt U. (2016) Soil chemical and physical properties after skidding by rubber-tired skidder in Hyrcanian forest, Iran. *Geoderma* 265, Pag. 12-18. DOI:10.1016/j.geoderma.2015.11.009

Neufert E. (1999) *Arte de proyectar en arquitectura*. 14ª Edición. Ediciones Gili, S. A. de C. V. México

Olgay, A. (1957). *Solar Control and Shading Devices*. Brasil: Princeton University Press

Oke T. (1982) *Boundary layer climates*. Routledge Ed. Canada

Othman A. & Sahidin N. (2016). Vertical Greening Façade as Passive Approach in Sustainable Design. *Precedia Social and Behavioral Sciences* 222, 845-854

Palacios, S. (2006). *La expansión humana y espacial en la plena Edad Media (ss.X-XIII)*. España: Liceus

PDUCP 2025. (2005). Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Mexicali. *INSTITUTO MUNICIPAL DE INVESTIGACIÓN Y PLANEACIÓN URBANA DE MEXICALI*, 32-34.

Pérez G., Rincón L., Vila A., González J.M., Cabeza L.F. (2011). Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy* 88, 4854–4859. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.06.032

Perico-Agudelo, D. (2009). El espacio público de la ciudad: una aproximación desde el estudio de sus características microclimáticas. *Cuadernos de vivienda y urbanismo* 2. <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/cvyu/article/view/5519>

Perini K., Bazzocchi F., Croci L., Magliocco A. & Cattaneo E. (2017) The use of vertical greening systems to reduce energy demand for air conditioning. Field monitoring in Mediterranean climate. *Energy and Buildings* 143, 35-42.

Perini K., Ottelé M., Fraaij A.L.A., Haas E.M. Raiteri R. (2011). Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment* 46, 2287-2294. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.009

Polo-López C., Sala M., Tagliabue L. Ch., Frontini F., Bouziri S. (2016) Solar radiation and daylighting assessment using the Sky-View Factor (SVF) analysis as method to evaluate urban planning densification policies impacts. *Energy Procedia* 91, 989-996. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.266

Photoshop CC (Versión 12) Recuperado de <https://www.adobe.com/mx/products/photoshop.html>

Pomponi F., Piroozfar P., Southall R., Ashton P. & Farr E.(2016). Energy performance of Double-Skin Façades in temperate climates: A systematic review and meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 54, 1525-1536.

Puppo E., Puppo G. & Puppo G. (1976) Sol y diseño. Marcombo D. L. Editores. España.

Qiuyu C., Baofeng L., & Xiaohu L. (2013). An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and buildings* 61, 298-307.

Rauber A. & Krafta R. (2018) Alexander's Theories Applied to Urban Design. *Urban Science* 2, 86. DOI:10.3390/urbansci2030086

Raghd A., El-Shimy H. & Raghd G. (2016). Green Architecture: A concept of Sustainability. *Procedia* 216, 778-787.

Rossi F., Castellani B., Preciutti A., Morini E., Filippini M., Nicolini A. & Santamouris M. (2015). Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental. *Applied Energy* 145, 8-20 DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.129

Santillán-Soto, N., García-Cueto, R., Haro-Rincón, Z., Ojeda-Benítez, S., Quintero-Núñez, M., & Velázquez-Limón, N. (2015). Radiation balance of urban materials and their thermal impact in semi-desert region: Mexicali, México study case. *Atmosphere* 6, 1578-1589. DOI: 10.3390/atmos6101578

Sheweka M. & Mohamed M. (2012) Green Facades as a New Sustainable Approach Towards Climate Change. *Energy Procedia* 18. 507-520

Snoeyink, V. (1990). *Química de Agua*. México: Ed. Limusa S.A. de C.V

Spilková J. & Vágner J. (2016). The loss of land devoted to allotment gardening: The context of the contrasting pressures of urban planning, public and private interests in Prague, Czechia. *Land Use Policy* 52, 232-239. DOI: 10.1016/j.landusepol.2015.12.031

Sociedad de las Magnolia (2007) [Fecha consulta 29 de septiembre 2018]
<http://www.consultaplantas.com/index.php>

Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica. Econstor Serie Documentos de Trabajo, No. 258, Universidad del Centro de Estudios Macroeconómicos de Argentina (UCEMA), Buenos Aires [fecha de Consulta 13 de abril de 2020]. Disponible en:
<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/84374/1/392634856.pdf>

Theeuwes, N.E., Steeneveld, G.J., Ronda, R.J., Holtslag, A.A., (2017) A diagnostic equation for the daily maximum urban heat island effect for cities in northwestern Europe. *Int. J. Climatol.* 370 (1), 443–454. jan 2017. ISSN 10970088. <https://doi.org/10.1002/joc.4717> URL.<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.4717>.

Thornbush M., Golubchikov O. & Bouzarovski S. (2013). Sustainable cities targeted by combined mitigation–adaptation efforts for future-proofing. *Sustainable Cities and Society*, 1-9.

Tohyama, S. (1995). *Greening the Deserts: techniques and Achievements of two japaneses agriculturists*. Tokyo: Kosei Publishing Co.

USDA Soil Conservation Service (1972) National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology. USDA Soil Conservation Service, Washington DC.

United State Department of Energy (1981) Passive cooling handbook. Masachusetts. [Fecha consulta: 20 de abril 2020] <https://escholarship.org/content/qt2mn7w6dw/qt2mn7w6dw.pdf#page=33>

Venegas R. (1991) Manual para el reconocimiento de los árboles y arbustos más comunes en ciudad de Mexicali. Editorial UABC. México

Victorero F., Vera S. Bustamante W., Tori F., Bonilla C., Gironás J. & Rojas V. (2015). Experimental study of the thermal performance of living walls. *Energy Procedia* 78, 3416 – 3421. DOI:10.1016/j.egypro.2015.12.160

Villalpando, J. A. G., Morales, A. C., Guzmán, M. E. R., Sánchez, G. R., & Saavedra, M. U. L. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia*, 35(1), 79-86.

Villagra P. E., Giordano C., Álvarez J.A., Cavagnaro J. B., Guevara A., Sartor C., Passera C. B. & Greco S. (2011) Ser planta en el desierto: estrategias de uso de agua y resistencia al estrés hídrico en el Monte Central de Argentina. *Ecología austral* 21, 29-42.
https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/76495/CONICET_Digital_Nro.78941dbf-ca06-42b3-8d47-807b15939014_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Vogel (2002) [Fecha consulta 29 de septiembre 2018] <https://www.avogel.es/enciclopedia-de-plantas/>

Wong I. & Baldwin A. N. (2016). Investigating the potential of applying vertical green walls to high-rise. *Building & Enviroment* 97, 34-39 DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.11.028

Yacuzzi, E., Martín, F., Quiñones, H. M., & Popovsky, M. J. (2004). *El diseño experimental y los métodos de Taguchi: Conceptos y aplicaciones en la industria farmacéutica* (No. 258). Serie Documentos de Trabajo.

Zeng, L., Lu, J., Li, W., Li, Y., (2018) A fast approach for large-scale sky view factor estimation using street view images. *Build. Environ.* 135, 74–84. Mayo 2018. ISSN 03601323.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.009> URL. <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.library.wur.nl/science/article/pii/S0360132318301380>.