

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES



**EVALUACIÓN DE CUBIERTAS VEGETALES VERTICALES COMO UNA ALTERNATIVA
PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA, C.A.**

CELENI MARLENI BATRES ALFARO

Guatemala, noviembre de 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS Y AMBIENTALES

**EVALUACIÓN DE CUBIERTAS VEGETALES VERTICALES COMO UNA ALTERNATIVA
PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE GUATEMALA, C.A.**

TESIS DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

POR

CELENI MARLENI BATRES ALFARO

EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO
INGENIERO AGRÓNOMO

EN

SISTEMA DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

GUATEMALA SEPTIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

RECTOR

ING. MURPHY OLYMPO PAIZ RECINOS

JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMÍA

DECANO	Ing. Agr. Mario Antonio Godínez López
VOCAL PRIMERO	Dr. Tomás Antonio Padilla Cámara
VOCAL SEGUNDO	Ing. Agr. MA. César Linneo García Contreras
VOCAL TERCERO	Ing. Agr. Jorge Mario Cabrera Madrid
VOCAL CUARTO	P. en Electrónica Carlos Waldemar de León Samayoa
VOCAL QUINTO	P. Agr. Marvin Orlando Sicajaú Pec
SECRETARIO	Ing. Agr. Juan Alberto Herrera Ardón

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2018

Guatemala, noviembre de 2018

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Honorable miembros:

De conformidad con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a vuestra consideración el trabajo de graduación de Graduación titulado como:

Evaluación de cubiertas vegetales verticales como una alternativa para mejorar la calidad del aire en la ciudad de Guatemala, C.A.

Como requisito previo a optar al título de Ingeniero Agrónomo en Sistema de Producción Agrícola, en el grado de académico de Licenciado.

Esperando que el mismo llene los requisitos necesarios para su aprobación, me es grato suscribirme,

Atentamente

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Celeni Marleni Batres Alfaro

ACTO QUE DEDICO A

Víctor Manuel Batres Martínez

Olga Amanda Alfaro Escibá

Magdalena Miranda Viuda de Cifuentes (Q.E.D.)

Consuelo de León Barrios

TESIS DE GRADUACIÓN QUE DEDICO

A DIOS

Por permitirme culminar esta fase de mi vida.

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE
GUATEMALA**

Por abrir las puertas del conocimiento y forjar
las bases de mi profesión.

FACULTAD DE AGRONOMÍA

Por formarme a través de los años y
permitirme tener el orgullo de ser egresada de
esta gloriosa facultad

CENTRO COMERCIAL PERIROOSEVELT

Por la oportunidad invaluable.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	v
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1 Antecedentes	3
2.1.1 Deforestación	4
2.1.2 Contaminación.....	4
2.1.3 Biomasa.....	7
2.1.4 Cubierta vegetal.....	8
A. Fachadas vegetales tradicionales.....	8
B. Fachadas vegetales que se comportan como una doble piel o de cables trenzados	9
C. Enrejados modulares.....	9
D. Fachada vegetal invernadero	9
E. Sistemas plantas precultivadas	10
F. Sistemas hidropónicos.....	10
G. Hormigón vegetal.....	11
2.1.5 Portulaca de flor (P. grandiflora Hook).....	12
2.1.6 Morfología de P. grandiflora Hook	12
2.1.7 Taxonomía de árbol de jade enano (P. oleracea L.).....	14
2.1.8 Morfología de P. oleracea L.....	14
2.1.9 Metabolismo	15
2.1.10 Tipos de metabolismos de las plantas	17
2.1.11 Análisis estadístico.....	17
2.2 Marco referencial	19
2.2.1 Caracterización de la ciudad de Guatemala.....	19
3 OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo General	22

	Página
3.2 Objetivos Específicos	22
4 HIPÓTESIS	22
5 METODOLOGÍA.....	23
5.1 Materiales y equipo para el muestreo	23
5.2 Metodología de la fase de muestreo	23
5.3 Materiales y equipo de laboratorio	25
5.4 Metodología de la fase de laboratorio	25
5.5 Análisis de resultados	28
5.6 Porcentaje de humedad	28
5.7 Hipótesis	29
5.8 Criterio para la selección del método	29
5.9 Procedimiento de instalación de la cubierta vegetal vertical	29
5.9.1 Fase de montaje.....	30
5.10 Área de estudio	31
5.11 Análisis estadístico.....	31
5.12 Unidades de muestreo	31
5.13 Aleatorización.....	31
5.14 Tamaño de la muestra	32
5.15 Factor	32
5.16 Variables	32
6. RESULTADOS Y DISCUSION	34
6.1 Conocer la potencialidad de plantas con metabolismo C ₄ como mecanismos de mitigación en la absorción de dióxido de carbono.	34
6.2 Relacionar dióxido de carbono absorbido y biomasa con calidad del aire	35
6.3 El efecto térmico de las cubiertas vegetales.	38
6.4 Determinar la relación de beneficio costo de la implementación de cubiertas vegetales verticales.	41
7. CONCLUSIONES.....	44
8. RECOMENDACIONES.....	45
9. BIBLIOGRAFÍA.....	46

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire	7
Cuadro 2. Contaminantes de importancia que absorben las plantas	11
Cuadro 3. Diferencias metabólicas entre plantas C ₃ , C ₄ y CAM	18
Cuadro 4. Parámetros de caracterización de la ciudad de Guatemala	19
Cuadro 5. Biomasa (g) de <i>P. oleracea</i> L y <i>P. grandiflora</i> Hook.....	37
Cuadro 6. Análisis de probabilidad donde $P(T \leq t) 2.30598 \times 10^{-06} < \alpha = 0.05$	38
Cuadro 7. Temperatura máxima y mínimas registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017.....	39
Cuadro 8. Temperatura máxima externa e interna registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017.....	40
Cuadro 9. Temperatura mínima externa e interna registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017.....	40
Cuadro 10. Relación costo vrs oxígeno (kg/m ²)	42

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Mapa de ubicación del centro comercial Peri-Roosevelt.....	21
Figura 2. A. Fachada cubierta vegetal vertical del centro comercial Peri-Roosevelt. B.Toma de muestra.. ..	26
Figura 3. C. Termómetro interno de la cubierta vegetal vertical. D. Termómetro externo.....	26
Figura 4. E. 20 muestras de cinco (5) cm de longitud de portulaca de flor (<i>P. grandiflora</i> Hook). F. 20 muestras de cinco (5) cm de longitud de árbol de jade enano (<i>P. oleracea</i> L.).	27
Figura 5. G. Peso húmedo de árbol de jade enano (<i>P. oleracea</i> L.). H. Peso húmedo de portulaca de flor (<i>P. grandiflora</i> Hook).	27
Figura 6. I. muestras de árbol de jade enano (<i>P. oleracea</i> L.) secas. J. muestras de portulaca de flor (<i>P. grandiflora</i> Hook) secas.	28
Figura 7. K. Horno eléctrico.....	28
Figura 8. Detalle del sistema de la cubierta vegetal vertical.....	30
Figura 9. Moléculas de oxígeno liberado del 25 de abril al 13 de junio de 2017	35
Figura 10. Biomasa formada de 25 de abril al 13 de junio de 2017	36
Figura 11. Temperatura externa vrs temperatura interna del 25 de abril al 13 de junio de 2017.....	41

Evaluación de cubiertas vegetales verticales como una alternativa para mejorar la calidad del aire en la Ciudad de Guatemala, C.A

Evaluation of vertical garden as an alternative to improve air quality in the city of Guatemala, C.A.

RESUMEN ABSTRACT

Según el Informe Ambiental del Estado 2016, de 2005-2015 aumentó el material particulado y gases contaminantes emitidos a la atmósfera en un 175 % debido al parque vehicular. El Sistema de Registro Fiscal de la SAT (2016) reportó un total de 2,970,678 vehículos a nivel nacional, siendo el departamento de Guatemala el que presenta el mayor aporte al parque vehicular.

La falta de áreas verdes en la ciudad capital de Guatemala, ha provocado un incremento de gases tóxicos (Mellado, 2011), por lo que el uso de cubiertas vegetales verticales en espacios edificados en zonas con alto índice vehicular, contribuiría positivamente en el mejoramiento de la calidad del aire (Castro, 2002).

Esta investigación busca dar a conocer dos de las ventajas de las cubiertas vegetales verticales ya implementadas. El centro comercial Peri-Roosevelt instaló su cubierta vegetal vertical en diciembre del año 2016. Para medir la temperatura se colocaron termómetros en el exterior e interior de la cubierta vegetal vertical y realizaron lecturas una (1) vez por semana, según reportes del INSIVUMEH de 1:30 a 2:00 pm se reportan las máximas en temperaturas en la ciudad capital, se seleccionaron las especies árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook.), por su rápido crecimiento y metabolismo tipo C₄.

Las variables a medir fueron disminución y aumento de temperatura (en época lluviosa y en época seca) y aumento en biomasa (por absorción de CO₂). Utilizando la fórmula de peso húmedo se determinó que el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) muestra mayor absorción de dióxido de carbono (CO₂), contribuyendo significativamente en el

mejoramiento de la calidad del aire, a diferencia de la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook.) la cual no muestra contribución. Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de probabilidad debido a la notoria diferencia en la absorción de CO₂.

1. INTRODUCCIÓN

La Universidad de San Carlos de Guatemala está conformada por 10 facultades, siendo una de estas la Facultad de Agronomía, caracterizándose por ir a la vanguardia de la tecnología; contribuyendo de esta manera al desarrollo sostenible en la producción agrícola y el manejo de los recursos naturales, brindando una mejor oferta educativa, integrada, con responsabilidad, ética y respeto a la naturaleza para elevar la calidad de vida para los guatemaltecos. La presente tesis se elaboró para obtener el grado de Licenciatura en la Facultad de Agronomía.

El centro comercial Peri-Roosevelt se encuentra ubicado en la calzada Roosevelt 25-50 zona 7, donde según la Entidad Metropolitana Reguladora de Transporte y Tránsito del Municipio de Guatemala –EMETRA-, en la actualidad (2018) circulan aproximadamente 100 mil vehículos diariamente; en diciembre del año 2016 instaló su cubierta vegetal vertical con fines arquitectónicos, sin embargo contribuye de forma significativa en el mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad capital.

Las cubiertas vegetales verticales son sistemas tecnológicos amigables con el medio ambiente, debido a que por cada molécula de dióxido de carbono (CO₂) que absorben, liberan una molécula oxígeno puro al ambiente.

Una solución a dicho problema sería investigar si el uso de cubiertas vegetales verticales, es adecuado para disminuir los valores de gases tóxicos en el casco urbano de la ciudad de Guatemala. En este sentido se pretende responder las siguientes preguntas: (1) ¿Es el uso de cubiertas vegetales verticales, un mecanismo agrícola efectivo para la calidad del aire? y (2) ¿Si se utilizan cubiertas vegetales verticales, estas presentarán un aumento significativo en su biomasa, debido a que absorben mayor cantidad de gases contaminantes?

Este trabajo pretende caracterizar las cubiertas vegetales verticales, tomando completamente al azar cinco (5) cm de longitud en 20 plantas de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y cinco (5) cm de longitud en 20 plantas de portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook.) una vez por semana en un periodo de dos meses (25 de abril al 13

de junio de 2017) al final de la temporada seca e inicios de la temporada lluviosa, todas las muestra se procesaron en el Laboratorio de Edafología ubicado en la Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos – UVIGER-, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, la temperatura se leyó una vez por semana y según reportes del INSIVUMEH de 1:30 a 2:00 pm se reportan las máximas en temperaturas en la ciudad capital.

Las especies árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook.), se seleccionaron debido a su fácil aclimatación, rápido crecimiento y metabolismo tipo C₄.

El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) presenta mayor ventaja en biomasa, liberación de oxígeno y absorción de CO₂ debido a procesos fisiológicos que no ocurren en la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook.).

Con respecto a temperatura la cubierta vegetal vertical demostró su capacidad térmoreguladora bajando de 1 °C a 4 °C en periodos de temperatura máxima y manteniendo calor en periodos de temperaturas mínimas.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

El crecimiento poblacional en la ciudad capital de Guatemala, así como la migración campo-ciudad en busca de mayores fuentes de empleo, han incrementado de forma alarmante la densidad poblacional. Por tanto, la suma de los factores enumerados ha incrementado la presión ejercida sobre la calidad del aire que se respira en nuestra ciudad capital y amenaza con deteriorar gradualmente las condiciones de vida de los habitantes.

El aumento poblacional y la disminución de áreas verdes presenta una oportunidad para proponer alternativas agroecológicas y ambientales, que se ajustan al urbanismo actual de la ciudad capital de Guatemala, contribuyendo no solo a mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, sino también a buscar nuevas opciones que se ajustan a su sistema de vida (IPCC, 2008).

Según el informe ambiental del estado 2016 (9) para medir el Índice de Desempeño Ambiental se evalúan varios factores entre los que se encuentran la calidad del aire, polución del aire promedio de exposición $PM_{2.5}$ (Partículas en suspensión de menos de 2.5 micras), y polución del aire promedio superior a $PM_{2.5}$. Durante el periodo 2001-2010 el 21 % del total de emisiones de CO_2 corresponde a productos derivados del petróleo (MARN, 2017).

Durante el periodo 2005-2015 aumento el material particulado y gases contaminantes emitidos a la atmósfera en un 175 % debido al parque vehicular. La relación entre el PIB (Producto Interno Bruto) y las emisiones de CO_2 es proporcional, al aumentar el PIB aumentan las emisiones de CO_2 y cuando éstas lo hacen aumenta el PIB. Estos datos solo reflejan cómo el desarrollo económico impacta de forma negativa al medio ambiente (MARN, 2017).

Las cubiertas vegetales verticales son sistemas tecnológicos amigables como el medio ambiente, por cada molécula de dióxido de carbono (CO_2) que absorben, liberan una molécula oxígeno puro al ambiente. Otro de los beneficios de las cubiertas vegetales

verticales es una disminución de contaminación auditiva y visual, teniendo efectos positivos fisiológicos y psicológicos en las personas que manejan estrés o se encuentran cercanos a dichas cubiertas (Castro, 2002).

2.1.1 Deforestación

La deforestación no tiene que ver solamente con la pérdida de árboles. También tiene un gran impacto sobre el ambiente debido a la pérdida de árboles, animales, plantas medicinales, plantas nativas, agua (transpiración) y aire limpio, causando erosión, incremento del dióxido de carbono (CO₂) en el aire, entre otros. En este sentido la deforestación ha sido un factor determinante en el cambio del clima a nivel nacional y puede también verse agravado por el aumento en las temperaturas originadas por el cambio climático global, debido a las actividades humanas, y en especial la agricultura (USAC, 2013; Oliva, 2018).

2.1.2 Contaminación

En Guatemala, el legado del consumismo son los desechos líquidos, físicos (orgánicos e inorgánicos) y gaseosos, altos grados de polución por dióxido y monóxido de carbono, ácido sulfhídrico o partículas de diverso origen, "smog" y otros contaminantes de origen industrial. Las lluvias ácidas tienen grandes efectos sobre cultivos, flora, fauna y poblaciones humanas, mientras que los clorofluorocarbonos provocan la "ruptura de la capa de ozono" (USAC, 2013; Oliva, 2018).

Según el informe ambiental del estado 2016 (9), para el año 2015, el Sistema de Registro Fiscal de la SAT (2016) reportó un total de 2,970,678 vehículos a nivel nacional, siendo el departamento de Guatemala el que presenta el mayor aporte al parque vehicular, con más de 1 millón 300 mil unidades, lo que representa el 45 % del total nacional.

Asimismo, el departamento de Guatemala presenta una densidad vehicular que se estima en 631 vehículos/km² y aproximadamente 1 vehículo por cada 3 personas (2.54 personas/vehículo).

Según el Sistema de Registro Fiscal de la SAT el parque vehicular guatemalteco lo conforma, el 53 % la categoría de automóviles con 1 millón 500 mil, el 37 % es representado por vehículos motorizados con un valor que supera el millón de unidades, camiones, cabezales y transporte de carga; representan el 5 % del total nacional, mientras que los autobuses y microbuses, constituyen el principal medio de transporte colectivo, representan tan solo el 4 %, con un poco más de las 100 mil unidades contabilizados (MARN, 2017).

El informe sobre la calidad del aire indica que a partir del año 1,970 se presenta un registro de información relativa a la calidad del aire en la ciudad de Guatemala; en 1,995 a través del laboratorio de monitoreo del aire de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la información es recopilada de forma sistémica. La importancia en el monitoreo de las partículas en suspensión radica en el efecto dañino que tiene sobre la salud humana. En el caso de aquellas partículas suspendidas en la fracción menor a 2.5 micrómetros, las cuales poseen un ancho 20 veces menor a un cabello, la importancia de su monitoreo es debida a que éstas pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio (MARN, 2017; Oliva, 2018).

El informe de situación y evaluación de la calidad ambiental en Guatemala, indica que se afecta el recurso aire de varias maneras fácilmente detectables:

- Humo "negro" y "blanco" provenientes, principalmente de vehículos que transitan, en calles y avenidas de los centros urbanos.
- Incendios forestales provocados y/o accidentales con el propósito de habilitar tierras para cultivos.
- Afección por humo y olores nauseabundos que provienen del relleno-botadero municipal o clandestino.

Alto contenido de polvo o partículas en el aire por el tipo de suelo (ceniza volcánica), falta de asfalto en calles, alta deforestación y regímenes de viento.

- Humos de fábricas en áreas urbanas que afectan con puntuales y eventuales lluvias ácidas, pesticidas (caso de fábricas de fertilizantes).

El Laboratorio de Monitoreo del aire realiza a través de 6 estaciones de monitoreo un análisis representativo de la calidad del aire, han establecido tres tipos de puntos de muestreo:

1. Los ubicados en una zona urbana (con alto tráfico vehicular)
2. Los ubicados en una zona residencial (con bajo flujo vehicular) y
3. Los ubicados en un punto de medición a macro escala (con una extensa área de cobertura).

Dichas estaciones recaban datos de partículas totales en suspensión, partículas menores de 5 y 10 μ de diámetro, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y presencia de lluvia ácida. En el cuadro 1, se puede observar su ubicación (MARN, 2017).

Resaltando de sobre manera la estación ubicada en la calzada San Juan (CSJ), debido a su proximidad con el área de estudio.

Cuadro 1. Estaciones de monitoreo de la calidad del aire

Nombre de la estación	Ubicación	Coordenadas	Altitud m.s.n.m.	Parámetros medidos
Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá –INCAP-	Calzada Roosevelt	N 14°36.968' W 90°32.393'	1527	PM _{2.5} , NO ₂ y sedimentación ácida
Centro Histórico de la Ciudad	Museo de la Universidad de San Carlos	N 14°38.326' W 14°90.657'	1508	PM _{2.5} , NO ₂ y sedimentación ácida
Escuela de Formación de Profesores de Enseñanza Media – EFPEM-	Avenida Petapa	N 14°35.264' W 90°32.731'	1504	PM _{2.5} y NO ₂
Calzada San Juan CSJ	Calzada San Juan	N 14°37.362' W 90°32.885'	1540	PM _{2.5} y NO ₂
Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología – INSIVUMEH-	Zona 13	N 14°35.243' W 90°31.959'	1516	PM _{2.5} , NO ₂ y sedimentación ácida
Universidad de San Carlos de Guatemala	Edificio T-10, Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia	N 14°35.101' W 90°33.284'	1522	PM _{2.5} , NO ₂ y sedimentación ácida

Fuente: MARN, 2017.

2.1.3 Biomasa

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, conceptualiza biomasa es el conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, que haya tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. De forma que el termino Biomasa es un amplio concepto, que en sentido material energético se aplica a las materias hidrocarbonadas no fósiles, en las cuales la radiación solar ha conseguido la reducción del Hidrogeno y el Carbono mediante el proceso de la fotosíntesis; por esta razón se presenta de manera periódica y no limitada en el tiempo, es decir, de forma renovable ((BUN-CA), 2002).

2.1.4 Cubierta vegetal

Gernot Minke, arquitecto, catedrático de la Universidad de Kassel (Alemania) que además dirige el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales, dijo:

“Los techos verdes no son solamente agradables a la vista: forman un valioso biotopo en la ciudad, mejoran el aire y tienen considerables ventajas técnico-constructivas y también físico-constructivas; enfrían en verano y calientan en invierno y prolongan la vida útil del techo. Además son fáciles de realizar y más baratos que otros”.

El concepto de incorporar cubiertas vegetales en las edificaciones se remonta a lo que se conoce como arquitectura vernácula en diversas partes del planeta. Dos mil quinientos años atrás Babilonia era famosa por sus jardines colgantes (Zom, 2010; Alma R. Ortega Mendoza, 2012), y en el siglo XX, Le Corbusier en el año de 1927 publicó en la revista *L'Architecture Vivante* la “Théori du toit-jardin” (“Teoría de la cubierta jardín”). Pero las cubiertas vegetales como las conocemos hoy en día, provienen de Islandia, donde debido a los limitados y escasos recursos que presentan estas regiones, la tierra ha sido usada para la construcción de paredes y techos, haciéndose populares en toda Escandinavia (Mendoza, 2012).

Entonces cubierta vegetal vertical es aquel espacio o área ya sea interior o exterior, recubierta por diferentes especies de plantas, que pueden y deben generar condiciones de uso no solo para el hombre sino que también otros seres vivos, aportando desde el punto de vista estético como técnico, beneficios tanto para el edificio como para el medio ambiente y hasta interesantes espacios habitables (Mendoza, 2012). Existen varios diseños de cubiertas vegetales verticales, resaltando

A. Fachadas vegetales tradicionales

Las plantas crecen sobre una superficie vertical como una pared, desde el suelo donde tienen sus raíces. Los ejemplos más comunes incluyen a los edificios cubiertos de hiedra (Coto, 2013).

B. Fachadas vegetales que se comportan como una doble piel o de cables trenzados

Este sistema está basado en las fachadas vegetales tradicionales, pero con la diferencia que se utilizan superficies verticales, como enrejado de acero galvanizado, alambres, mayas como apoyo estructural de las plantas. El objetivo es crear una segunda piel o pantalla entre el la piel del edificio y el ambiente exterior (Coto, 2013).

C. Enrejados modulares

Son módulos formados por un sistema de tridimensional a base de perfiles y chapa de acero inoxidable, adecuándose a las tipologías de la fachada pudiendo acoplarse tanto en altura como en anchura fijándose dichos elementos a la fachada en cuestión (Coto, 2013). Este sistema se compone de cinco elementos:

- Contenedores
- Recipiente aislado
- Mantenimiento
- Monitoreo remoto de riego y fertilización
- Sistema de montaje para cualquier tipo de estructura

D. Fachada vegetal invernadero

Es un sistema constructivo que funciona como ventilación higiénica, ventilación térmica y protección solar. Además de actuar como un material de construcción, la incorporación de elementos vegetales al cerramiento de fachada.

El soporte para el sustrato posibilita una sustitución y una colocación rápida y fácil de las especies vegetales. Para ello, se plantea un sistema de placas rígidas de polipropileno (reciclado y reciclable) celulares, rellenas con el sustrato y envueltas con un geotextil lo suficientemente resistente como para sostener el sustrato neutro para el

desarrollo de las plantas, garantizando humedad óptima en condiciones normales (Coto, 2013).

E. Sistemas plantas precultivadas

Estos sistemas básicamente se componen de una estructura ligera, anclada a las fachadas del edificio o estructura donde se quiere instalar el jardín vertical, sobre la que se cuelgan unos paneles.

Dichos paneles son carcasas de forma rectangular, en forma de malla, de caja acero, celdas de polietileno o poliresinas, según el fabricante y modelo. En cuyo interior se deposita los sustratos necesarios para la planta y se procede a la plantación de las mismas. Los sistemas de riego, por goteo, se colocan por encima de cada panel confundiendo al final con el crecimiento de la planta (Coto, 2013). Estos pueden ser:

- Sistemas de paneles vegetados en cajas metálicas
- Sistemas de paneles vegetados en celdas drenantes
- Gaviones de metal

F. Sistemas hidropónicos

Este tipo de sistemas consiste la instalación de unas láminas donde se propicia el crecimiento vegetal y un sistema de riego con agua totalmente automatizada y con capacidad de recirculación de agua.

Estos sistemas se sectorizan para el riego con un sistema completamente automatizado donde el agua se deja caer en la parte superior del jardín e irá humedeciendo el soporte, escurriendo a una canaleta lineal de recogida.

Al final de la canaleta se colocará una cesta para recogida de impurezas y desde la canaleta conducirá el agua sobrante a un depósito enterrado desde donde un equipo

de bombas (ubicados en un cuarto de instalaciones) recirculará el agua de riego a la plantación vertical. Funcionando todo el sistema mediante una recirculación no siendo necesario el aporte de agua. Durante el proceso de recirculación las bombas peristálticas introducirán abono y fertilizante al agua de riego (Coto, 2013).

G. Hormigón vegetal

La innovación de este novedoso hormigón (multicapa vertical) es que se comporta como un soporte biológico natural para el crecimiento y desarrollo de determinados organismos biológicos, concretamente ciertas familias de microalgas, hongos, líquenes y musgos (Coto, 2013).

Las cubiertas vegetales verticales instalan en todo tipo de espacios, ya sea interior o exterior, en espacios pequeños o grandes (Urbanarbolismo, 2012), fijan CO₂ y liberar oxígeno y absorben contaminantes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Contaminantes de importancia que absorben las plantas

Sustancia Química	Causas	Efectos
Formaldehído	Aglomerado o productos de madera prensada, alfombras, productos hidrófugos, productos ignífugos, gas natural, keroseno, humo de tabaco.	Irritan los ojos, la nariz y la garganta. Pueden provocar dolores de cabeza y dermatitis alérgica.
Benceno, Xileno	Tintas, aceites, pinturas, plásticos, goma.	Irritan los ojos y la piel. La exposición prolongada puede ocasionar dolores de cabeza, pérdida de apetito y somnolencia.
Monóxido de carbono	Combustión de motores de vehículos, combustión de leña y gas, humo de tabaco.	Se combina con la hemoglobina de la sangra impidiendo su funcionamiento.
Tricloroetileno	Líquidos de limpieza en seco, tintas de impresión, pinturas, barnices, adhesivos.	Se consideran agentes cancerígenos.

Fuente: Urbanarbolismo, 2012.

2.1.5 *Portulaca de flor (P. grandiflora Hook)*

Clasificación taxonómica de *P. grandiflora* Hook

Reino	Plantae
Subreino	Viridiplantae
Infrareino	Streptophyta
Superdivisión	Embryophyta
División	Tracheophyta
Subdivisión	Spermatophytina
Clase	Magnoliopsida
Superórder	Caryophyllanae
Órder	Caryophyllales
Familia	Portulacaceae
Genero	<i>Portulaca</i> L.
Especie	<i>P. grandiflora</i> Hook

2.1.6 Morfología de *P. grandiflora* Hook

A. Tallo

Planta herbácea anual con raíz principal tuberosa y tallos erectos o postrados, radicantes, poco ramificados, cilíndricos, lisos, carnosos, glabros, verdosos o verdes purpúreos, con tricomas en los nudos, que puede alcanzar 20 cm de altura.

B. Hojas

Hojas alternas, linear-lanceoladas, cilíndricas, de 10 mm -15 mm (-30 mm) x 0,5 mm - 1mm (-3) mm, con la base atenuada, el margen entero y el ápice agudo o cuminado; son de textura carnosas, glabras, con el nervio central evidente.

C. Pecíolo

Pecíolo de 1 mm, 5 mm - 2 mm de longitud, cilíndrico. Pelos estipulares axilares blancos, de 2 mm - 8 mm de longitud.

D. Inflorescencias

Inflorescencias terminales, sésiles, con 1 - 3 (-5) flores que abren paulatinamente, sustentadas por un involucro de 5 - 8 hojas verticiladas. Flores sésiles, simples o dobles, de 2,5 cm de diámetro.

Cáliz con los sépalos algo desiguales, anchamente ovados, glabros, de 6 -7 mm de longitud, agudos y mucronados en el ápice; corola de 5 pétalos(o múltiples de 5 en las flores dobles) unidos en la base, obcordados, emarginados en el ápice, de 5 cm a 8 cm x 2 cm a 5 cm, de color rosa, rojo, púrpura, amarillo o blanco, generalmente manchados hacia la base de marrón o amarillo.

Androceo con 40 o más estambres con los filamentos de 1 mm, 5 mm - 2 mm (-4) mm de largo purpúreos, y las anteras anaranjadas. Estilo de 6 mm -7 mm de longitud, dividido en 5 - 6 estigmas lineares, recurvados, de 2 mm - 3 mm de longitud. Cápsula ovoide u oblonga, de 4 mm - 6 mm de diámetro, con opérculo hemisférico de 1 mm - 2 mm de altura; semillas 20-30 por cápsula, comprimidas, negras o grisáceas, de 0 mm, 5 mm - 0.7 mm de longitud, con la superficie papilosa (Standley, 1946).

2.1.7 Taxonomía de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.)

Clasificación taxonómica de *P. Oleracea* L.

Reino:	Plantae
Clase	Magnoliopsida
Superórder	Caryophyllanae
Órder	Caryophyllales
Familia	Portulacaceae
Genero	<i>P. oleracea</i> L.

2.1.8 Morfología de *P. oleracea* L.

A. Tallo

Planta anual prostrada o decumbente, con raíces fibrosas y tallos carnosos, glabos, verdosos o rojizos, de 10 cm -30 cm (-50) cm de longitud, muy ramificados, con pelos inconspicuos en los nudos.

B. Hojas

Hojas alternas o subopuestas, a menudo, algo apiñadas hacia el extremo de los tallos y bajo las flores, sésiles o subsésiles, con la lámina achatada, de obovada a pespatulada o linear-oblonga, de 1cm -3 cm x 0.5 cm -1.5 cm, con la base atenuada, el margen entero y el ápice obtuso, redondeado o casi truncado; son carnosas, glabras, de color verde brillante o verde purpúreas, con los nervios poco notables. Pelos axilares ausentes o pocos e inconspicuos.

C. Inflorescencias

Inflorescencias cimosas en las bifurcaciones de los tallos, con 1-6 flores, rara vez flores solitarias axilares, sustentadas por 2 - 6 hojas verticiladas a la manera de un involucre. Flores sésiles, amarillas, de 5 mm - 10 mm de diámetro, con brácteas ovadas, membranosas, de unos 3 mm de longitud. Cáliz con 2 sépalos de 2 mm - 4 mm de longitud, verdes, aquillados, unidos basalmente formando un tubo que persiste y rodea al opérculo; corola con 5 pétalos de obovados a obovado-oblongos, ligeramente unidos en la base, de 5 mm - 8 mm de longitud emarginados en el ápice, efémeros. Androceo con 7-12 (-15) estambres con los filamentos de 2 mm - 4 mm de longitud y las anteras ovoides de color amarillo. Estilo corto, con 4-6 divisiones estigmáticas de 1 mm de longitud. Ovario ovoide, glabro, parcialmente inmerso en el tubo del cáliz. Cápsula de ovoide a obovoide, de 3 mm – 9 mm x 2-4 mm, dehiscente por la parte media o ligeramente más abajo, con opérculo acampanado; semillas numerosas, redondeadas o reniformes, de color negro brillante, de 0,5 mm – 0,8 mm de longitud, con la superficie granulosa (Danin, 1978).

2.1.9 Metabolismo

El metabolismo es el conjunto de procesos físicos y químicos y de reacciones a las que está sujeta una célula; estos son los que les permitirán a las mismas sus principales actividades, como ser la reproducción, el crecimiento, el mantenimiento de sus estructuras y la respuesta a los estímulos que reciben.

A. Metabolismo primarios

Son procesos químicos pertenecientes al metabolismo primario de las plantas: la fotosíntesis, la respiración, el transporte de solutos, la translocación, la síntesis de proteínas, la asimilación de nutrientes, la diferenciación de tejidos, y en general la formación de carbohidratos, lípidos y proteínas que intervienen en estos procesos o son parte estructural de las plantas

B. Metabolismo secundarios

Los metabolitos secundarios de las plantas intervienen en las interacciones ecológicas entre la planta y su ambiente. También se diferencian de los metabolitos primarios en que cada uno de ellos tiene una distribución restringida en el Reino de las plantas, a veces a sólo una especie o un grupo de ellas, por lo que muchos de ellos son útiles en Botánica Sistemática.

C. Características que realiza el metabolismo en las plantas.

a. *Plantas de metabolismo fotosintético C₃*

Este tipo de planta fija el CO₂ realizando el ciclo de Calvin, catalizado por la enzima Rubisco. Existe un proceso respiratorio no mitocondrial que consume O₂ y produce CO₂ estimulado por la luz, conocido como foto respiración. Cobra importancia en las plantas C₃ porque disminuye la capacidad fotosintética:

b. *Plantas de metabolismo fotosintético C₄*

Como adaptación a ambientes más cálido y secos, surgen nuevos metabolismos. El CO₂ llega a las células mesófitas, y se fija por la enzima fosfoenolpiruvato (PEP) que tiene más afinidad por el CO₂ que la Rubisco. Este CO₂ se convierte en malato y aspartato que pasarán a las células de la vaina, donde se transformarán en CO₂ que sigue el ciclo de Calvin.

c. *Plantas de metabolismo fotosintético CAM*

Algunas plantas adaptadas a ambientes secos, como las cactáceas y piñas, utilizan la vía del metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) para reducir al mínimo la

fotorrespiración. Este nombre proviene de la familia de las plantas crasuláceas en las cuales los científicos descubrieron por primera vez esta vía.

2.1.10 Tipos de metabolismos de las plantas

Las modificaciones en estructura y fisiología de las plantas C₃, C₄ y CAM son resultado de la presión selectiva del ambiente y uso eficiente del agua frente a la asimilación de CO₂. En el cuadro 3, se observan las diferencias entre los diferentes metabolismos

2.1.11 Análisis estadístico

Muestreo o selección completamente al azar. En este tipo de diseño están incluidos los principios de repetición y de aleatorización, o sea que, es utilizado cuando no hay necesidad del control local, debido a que el ambiente experimental es homogéneo y los tratamientos se asignan a las unidades experimentales mediante una aleatorización completa, sin ninguna restricción.

Modelo estadístico

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

$i = 1, 2, 3, \dots, t$

$j = 1, 2, 3, \dots, n$

dónde:

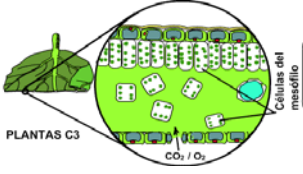
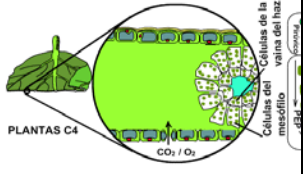
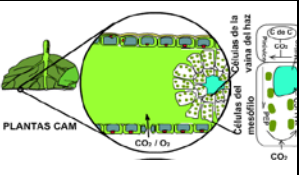
Y_{ij} = Variable respuesta de la ij-ésima unidad experimental

μ = Media general de la variable de respuesta

τ_i = Efecto del tratamiento i. (nivel del factor) en la variable dependiente.

ε_{ij} = Error experimental asociado a la ij-ésima unidad experimental.

Cuadro 3. Diferencias metabólicas entre plantas C₃, C₄ y CAM

METABOLISMO	PLANTAS C ₃	PLANTAS C ₄	PLANTAS CAM
Anatomía de la hoja	Células de la vaina del haz sin apenas cloroplastos	Células de la vaina del haz con grandes cloroplastos	Células con grandes vacuolas
Carboxilasa final	RuBisCO	RuBisCO	RuBisCO
Metabolismo adjunto	Ninguno	Transferencia CO ₂	Almacenaje CO ₂
Carboxilasa adjunta	Ninguna	PEP carboxilasa	PEP carboxilasa
Fotorespiración	Alta	Baja	Moderada
Abertura estomática	Día	Día	Noche
Tipos celulares implicados en el proceso	1	2	1
Anatomía	Normal	Kranz	Suculenta
Requerimiento teórico de energía (CO ₂ :ATP:NADPH)	1: 3: 2	1: 5: 2	1: 6.5:2
Sensibilidad de la fotosíntesis a cambios de (O ₂)	si	No	-
	En las plantas C ₃ todas las células tienen RuBisCO, así todas pueden tomar CO ₂ o O ₂ y hacer la fotorespiración.	Las células de la vaina tienen un suministro continuo de CO ₂ y pocas posibilidades de llegar el O ₂ por difusión. Por tanto no hacen fotorespiración. Las células del mesófilo no tienen ciclo de Calvin ni RuBisCO, por tanto no pueden tomar O ₂ .	Las plantas CAM tienen los estomas cerrados de día para no deshidratarse. El CO ₂ lo sacan del málico almacenado. Por la noche abren estomas, toman CO ₂ y forman málico que guardan en la vacuola.
			

Fuente: elaboración propia, 2017.

2.2 Marco referencial

2.2.1 Caracterización de la ciudad de Guatemala

La situación geográfica de la ciudad de Guatemala cuenta con la condición orográfica de poseer una vía libre para la circulación del viento proveniente del noreste la mayor parte del año, lo cual representa una adecuada dilución y dispersión de los contaminantes gaseosos y particulados, ya que los mismos pueden ser transportados por el viento (cuadro 4).

Cuadro 4. Parámetros de caracterización de la ciudad de Guatemala

PARÁMETRO	VALOR *
Área del valle de la Ciudad de Guatemala: principalmente conformada por la cuenca del río de Las Vacas y la cuenca del río Villa Lobos	850 km ²
Altura: depende de la región del área metropolitana, la cual se conforma desde el valle central hasta las montañas periféricas.	De 1,500 m a 2,300 m s.n.m.
Épocas Climáticas: 2 épocas climáticas, época seca y época lluviosa.	Época Lluviosa: de mayo a octubre
	Época Seca: de noviembre a abril

Fuente: INSIVUMEH, 2017.

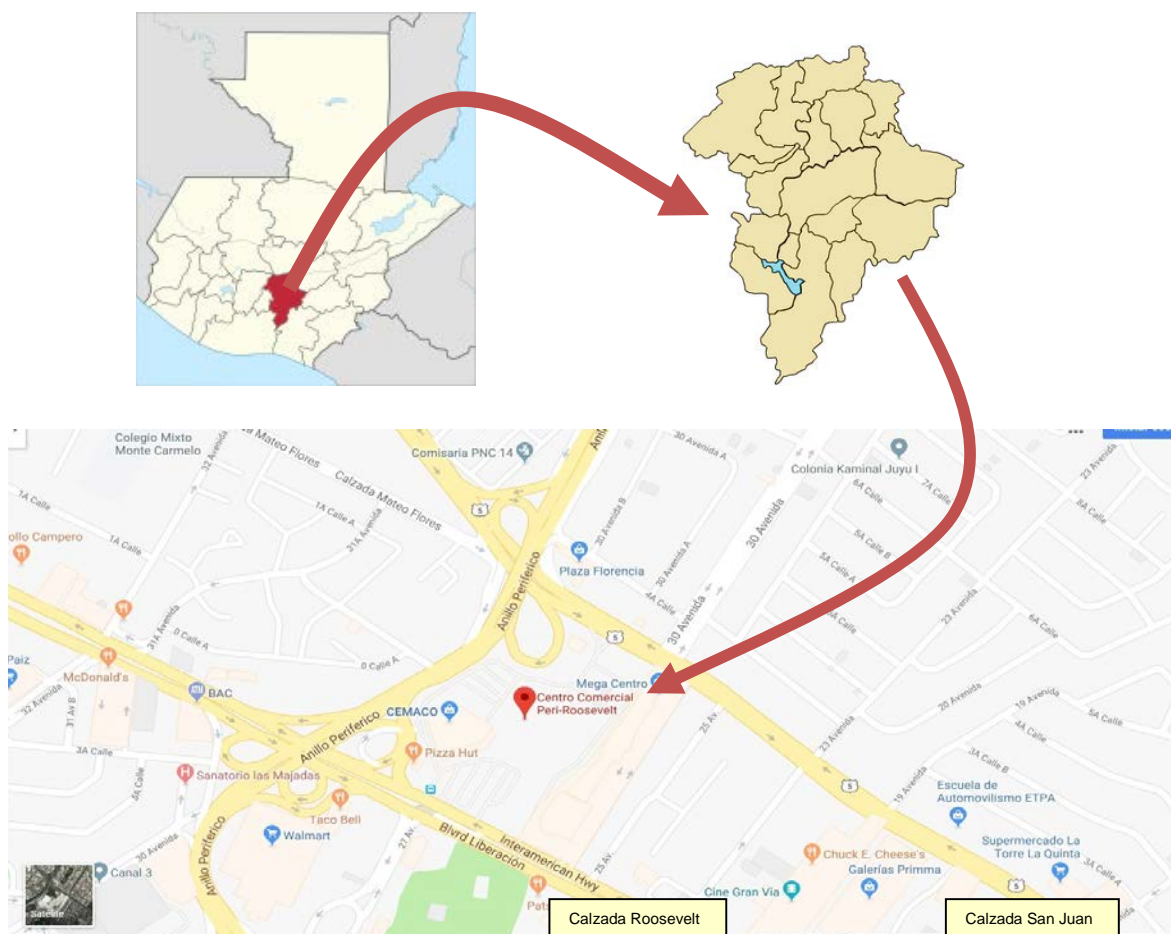
En la época lluviosa se tiene un promedio de precipitación pluvial de 1,100 mm a 1,200 mm de lluvia para el centro del valle de la ciudad, Según el artículo Calidad del aire en la ciudad de Guatemala, es durante la época lluviosa de mayo a octubre donde se observa un efecto de traslado de contaminantes de la atmosfera mediante la precipitación, mientras que en la época seca de noviembre a abril se presentan los valores más elevados de contaminación en el aire (Oliva, 2018).

Según el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (INSIVUMEH) en 2017 el centro del valle de la ciudad presentó la siguiente información climática precipitación media anual de 463,5 mm, temperatura mínima media anual de 15.9 °C y temperatura máxima media anual 36.2 °C. Siendo el año 2017 uno de los años más calurosos registrados.

El municipio de Guatemala tiene una extensión territorial de 229.5 km² cuadrados. Su territorio sirve de asiento a la capital del país, está dividida en 25 zonas municipales.

Según el censo nacional 2002 el 22.62 % de la población total habita en la ciudad capital, en donde la zona 7 presenta una densidad poblacional de 9,879 habitantes por km².

El centro comercial Peri-Roosevelt se encuentra ubicado en la calzada Roosevelt 25-50 zona 7, donde según la Entidad Metropolitana Reguladora de Transporte y Transito del Municipio de Guatemala –EMETRA-, en la actualidad (2018) circulan aproximadamente 100 mil vehículos diariamente.



Fuente. elaboración propia, 2018. Figura 1. Mapa de ubicación del centro comercial Peri-Roosevelt.

El complejo comercial Peri-Roosevelt se encuentra ubicado en el centro de tres arterias vehiculares de importancia con alta afluencia vehicular (figura 1), dentro de estas se encuentra la calzada San Juan y según los datos del Laboratorio de Monitoreo del Aire de la Facultad de Ciencias Químicas y Farmacia, en el año 2016 la estación ubicada en la calzada San Juan (cuadro 1) es el segundo punto con mayor concentración de partículas en suspensión, con un valor medio anual de $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (MARN, 2017).

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Evaluar las cubiertas vegetales verticales, como una alternativa para mejorar la calidad del aire en la ciudad capital.

3.2 Objetivos Específicos

1. Considerar la potencialidad de plantas con metabolismo C_4 como mecanismos de mitigación en la absorción de dióxido de carbono.
2. Relacionar dióxido de carbono absorbido y biomasa con calidad del aire.
3. El efecto térmico de las cubiertas vegetales verticales.
4. Determinar la relación costo beneficio de la inversión en cubiertas o jardines verticales.

4 HIPÓTESIS

Al implementar cubiertas vegetales verticales en áreas donde la afluencia vehicular es alta, se espera un aumento significativo en la biomasa de el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook), ya que el carbono absorbido es utilizado para la formación de tejido vegetal.

5 METODOLOGÍA

La metodología propuesta para llevar a cabo esta investigación, reúne las consideraciones y experiencias de diferentes autores, quienes han afinado las técnicas de muestreo a lo largo de los años, dependiendo del nivel de detalle y de los recursos existentes.

5.1 Materiales y equipo para el muestreo

- 1 regla milimétrica (20 cm)
- 1 navaja o tijera afilada
- 1 termómetros 100 °C
- Sobres de papel manila
- Cinta de aislar
- Marcador negro
- Escalera grande
- Casco

5.2 Metodología de la fase de muestreo

Para realizar este proceso se tomaron todas las medidas de seguridad industrial debido a que la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) se encuentra a 3,5 m de altura en el jardín (figura 2B), mientras que el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) se encuentra a 2,0 m de altura.

Dióxido de carbono absorbido por las plantas

PASO 1. Se cortó completamente al azar utilizando tijeras grandes y afiladas (previamente desinfectadas con alcohol al 70 %), 5 tallos de 5 cm de longitud de ambas especies vegetales (figuras 4E y 4F).

PASO 2. Las muestras vegetales se colocaron en un sobre manila tamaño media carta debidamente identificado con número de muestra, fecha de muestreo, nombre de la especie.

PASO 3. Cada sobre fue llevado inmediatamente al tercer nivel en el Laboratorio de Edafología ubicado en la Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos – UVIGER-, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, para realizar los análisis de laboratorio (fase de laboratorio).

PASO 4. Se repitió el paso 1, una vez por semana durante dos meses.

Lectura de temperatura externa e interna de la cubierta vegetal vertical

PASO 1. Se colocó el termómetro en el interior de la cubierta vegetal vertical, esto se logra traspasando una bolsa de la lona geotextil donde se coloca el sustrato para las plantas (figura 3C).

PASO 2. Se colocó el termómetro en el exterior de la cubierta sobre una superficie plana donde se sujetó con cinta adhesiva (figura 3D).

PASO 3. Las lecturas de temperatura interior y exterior del jardín se realizaron a las 2:00 pm el mismo día que se realizó la toma de muestra (figura 2B).

PASO 2. Se repitió el paso 3, una vez por semana durante dos meses.

5.3 Materiales y equipo de laboratorio

- Etanol al 70 %
- Balanza semi analítica
- Horno eléctrico

Calculo de Biomasa formada por las plantas

5.4 Metodología de la fase de laboratorio

No hay estudios o evaluaciones previas en Guatemala sobre cubiertas vegetales verticales, por lo que propongo la siguiente metodología. Todo el proceso de análisis se realizó en el Laboratorio de Edafología ubicado en la Unidad de Vinculación y Gestión de Recursos – UVIGER-, Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala

PASO 1. Limpiar con etanol al 70 % todas las superficies a utilizar.

PASO 2. Verificar el óptimo estado del horno electrónico, incluyó limpieza, buen estado de la espiga y encendido.

PASO 3. Llevar la temperatura del horno electrónico a 65 °C.

PASO 4. Verificar el óptimo estado de la balanza semi analítica, incluyó limpieza, buen estado de alambre, espiga, encendido y calibración.

PASO 5. Abrir cada sobre teniendo cuidado de no contaminar las muestras. Haciendo uso de una balanza semi analítica se pesó cada muestra (figuras 5G y 5H), anotando el dato total de cada muestra (peso húmedo) en un nuevo sobre identificado con la información obtenida durante la toma de muestra.

PASO 6. Colocar el sobre dentro horno electrónico (figura 7K) a 65 °C, para su secado, el factor tiempo desempeña un importante papel por lo que existe mayor gasto de recursos (electricidad y tiempo).

PASO 7. Las lecturas se realizaron después de 24 horas según el procedimiento estándar para secado foliar (peso seco) (figuras 6I y 6J).

PASO 8. Se repitió el paso 1, una vez por semana durante dos meses.



Fuente: elaboración propia, 2017.

Figura 2. **A.** Fachada cubierta vegetal vertical del centro comercial Peri-Roosevelt. **B.** Toma de muestra.



Fuente: elaboración propia, 2017.

Figura 3. **C.** Termómetro interno de la cubierta vegetal vertical. **D.** Termómetro externo.



Fuente: elaboración propia, 2017.

Figura 4. **E.** 20 muestras de cinco (5) cm de longitud de portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook). **F.** 20 muestras de cinco (5) cm de longitud de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.).



Fuente: elaboración propia, 2017.

Figura 5. **G.** Peso húmedo de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.). **H.** Peso húmedo de portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook).



Fuente: elaboración propia, 2017.
 Figura 6. I. muestras de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) secas. J. muestras de portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) secas.



Fuente: elaboración propia, 2017.
 Figura 7. K. Horno eléctrico.

5.5 Análisis de resultados

El peso seco de la muestra compuesta sirve para determinar el peso seco del total de tallos de cada una de las especies vegetales.

5.6 Porcentaje de humedad

Obtener el porcentaje de humedad a través de la formula

$$\% P_H = P_S - P_H / P_S$$

% P_H = Porcentaje de humedad

P_S = Peso seco

P_H = Peso húmedo

5.7 Hipótesis

Ho: $t=t_i$ las dos especies presentaran aumento de biomasa.

Ha: $t \neq t_i$ al menos una especie presentara aumento de biomasa.

5.8 Criterio para la selección del método

El pionero de jardines verticales o cubiertas verticales hidropónicas es el biólogo francés Patrick Blanc. Este tipo de sistemas consiste en instalar láminas donde hay una especie de bolsitas creadas en el fieltro permitiendo el crecimiento vegetal, el sistema de riego es totalmente automatizado con capacidad de recirculación. Durante el proceso de recirculación las bombas introducen abono y fertilizante. Así mismo evitan la aparición de insectos mediante la inclusión en el goteo de productos naturales que evitan la aparición de los mismos.

Permitiendo de esta manera crear un entorno con gran similitud a ecosistemas naturales. Guardan o reducen la temperatura ambiente a través de procesos de sombra y de evapotranspiración. Las hojas, raíces y microorganismos asociados a ellas limpian el aire al capturar contaminantes atmosféricos. Permite emplear numerosas tipologías de plantas por lo que tiene un mayor atractivo estético.

5.9 Procedimiento de instalación de la cubierta vegetal vertical

La integración de la vegetación en la edificación se puede realizar en todo tipo de espacios, ya sean exteriores o interiores.

5.9.1 Fase de montaje

El centro comercial Peri-Roosevelt instaló su cubierta vegetal vertical en diciembre del año 2016, “Panorama *d. arquitectura y paisaje*”, es una empresa dedicada a implementar jardines o cubiertas vegetales verticales u horizontales (interiores y/o exteriores).

La instalación del jardín o cubierta vegetal vertical es sencilla: consta de una serie de perfiles metálicos que forman una cámara de aire sobre los que se instala el jardín o cubierta vegetal vertical. Esta capa es el sustrato sobre el que crecen las raíces de las plantas, permanece continuamente húmeda gracias a un sistema de control de humedad y riego por goteo (figura 8).



Fuente: Panorama *d. arquitectura y paisaje* 2017.
 Figura 8. Detalle del sistema de la cubierta vegetal vertical.

5.10 Área De Estudio

El centro comercial Peri-Roosevelt se encuentra ubicado en la calzada Roosevelt 25-50 zona 7, donde circulan aproximadamente 100 mil vehículos diariamente según reportes de la Municipalidad de Guatemala; por lo que la emisión de gases contaminantes en los alrededores del área es el principal factor de selección.

5.11 Análisis estadístico

La selección de muestras se realizó a través de un muestreo o selección completamente al azar. En este tipo de diseño están incluidos los principios de repetición y de aleatorización, o sea que, es utilizado cuando no hay necesidad del control local, debido a que el ambiente experimental es homogéneo y los tratamientos se asignan a las unidades experimentales mediante una aleatorización completa, sin ninguna restricción.

5.12 Unidades de muestreo

La unidad de muestreo para este caso fueron las plantas seleccionadas árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook), las cuales fueron lo más homogéneas posibles, para que, sus efectos sean fácilmente detectados.

5.13 Aleatorización

Considerando

T = 5 plantas de la especie vegetal

r = 4 repeticiones para cada nivel

Número total de unidades experimentales incluidas en el experimento son

$t \times r = 5 \times 4 = 20$ plantas

Las plantas serán aleatorizadas sin restricciones.

5.14 Tamaño de la muestra

5 tallos de cada planta, de 5 cm de longitud. Se tomó esta medida debido a su fácil manipulación (figura 2E y 2F).

5.15 Factor

Es un experimento simple, cualitativo y de efecto fijo por lo que solo se medó el aumento en la biomasa.

5.16 Variables

A. Variables primarias

Las variables primarias tienen que ver directamente con el objeto central de investigación. Para medir éstas variables se utilizaron instrumentos de medición debidamente calibrados (termómetro y balanza semi analítica).

- Peso húmedo o fresco.
- Temperatura

B. Variables derivadas

Es la descripción cuantitativa del fenómeno asociada al resultado de absorción de dióxido de carbono CO₂.

- Biomasa en cada especie vegetal.

Relación costo-beneficio de la cubierta vegetal vertical

8 m² _____ U.S. \$ 4,313.91

1m² _____ W

W = Costo/m² U.S. \$

W X Cambio de dólar a Quetzal (*)

*Cambio de dólar a Quetzal Q. 7.70

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Conocer la potencialidad de plantas con metabolismo C₄ como mecanismos de mitigación en la absorción de dióxido de carbono.

El complejo comercial Peri-Roosevelt se encuentra ubicado al centro de tres arterias viales importantes en la ciudad capital, siendo éstas la calzada Roosevelt, la calzada San Juan y el anillo Periférico. En el año 2016-2017 el centro comercial remodeló sus instalaciones ubicando en la entrada principal sobre la calzada Roosevelt, una cubierta vegetal vertical a gran escala. Dicha cubierta cumple con varias funciones psicológicas, arquitectónicas, ornamentales, ambientales, entre otras. Siendo la función ambiental la de mayor relevancia ya que actúa como biofiltro natural de dióxido de carbono mejorando de ésta manera no solo la calidad de vida sino también la calidad del aire.

La cubierta vegetal vertical instalada en el centro comercial contiene gran variedad de especies vegetales o plantas, cada una aporta de forma individual beneficios significativos para el ambiente. Cada una de las plantas presentan diferentes características una de ellas es el tipo de metabolismo o fotosíntesis que presentan ya que en su mayoría son C₃ y solo dos especies presentan metabolismo C₄.

A pesar que el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook), pertenecen a la misma familia y presentan el mismo metabolismo C₄ tienen diferencia en la absorción de dióxido de carbono. Siendo la primera de éstas más eficiente absorbiendo $3.85141 \times 10^{+25}$ moléculas de CO₂, las cuales son utilizadas en diferentes procesos metabólicos.

El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) tiene entre sus características tallo fibroso por tanto absorbe mayor contenido de dióxido de carbono para elaborar lignina, carbohidratos (glucosa y hemicelulosa) y otros extractos (ácidos grasos); a diferencia de la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) la cual presenta tallo herbáceo y absorbe únicamente $3.92804 \times 10^{+23}$ moléculas de CO₂.

6.2 Relacionar dióxido de carbono absorbido y biomasa con calidad del aire

La implementación de cubiertas vegetales verticales vislumbra múltiples beneficios, como su capacidad de fitoremediación en la calidad del aire, debido a las interacciones fisicoquímicas entre las plantas. Lo anterior se produce por una estrategia de aprovechamiento recíproco en el cual las plantas aprovechan el dióxido de carbono producido por actividades vehiculares y liberan al ambiente oxígeno. La cantidad de dióxido de carbono y oxígeno liberado tiene una relación proporcional de 1:1, por lo que el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) absorbe y libera $3.85141 \times 10^{+23}$ kg de CO_2 , mientras que la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) absorbe y libera $6.2848 \times 10^{+21}$ Kg de CO_2 .

Contribuyendo de forma significativa en la calidad del aire el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) absorbiendo mayor dióxido de carbono y liberando oxígeno (figura 9).

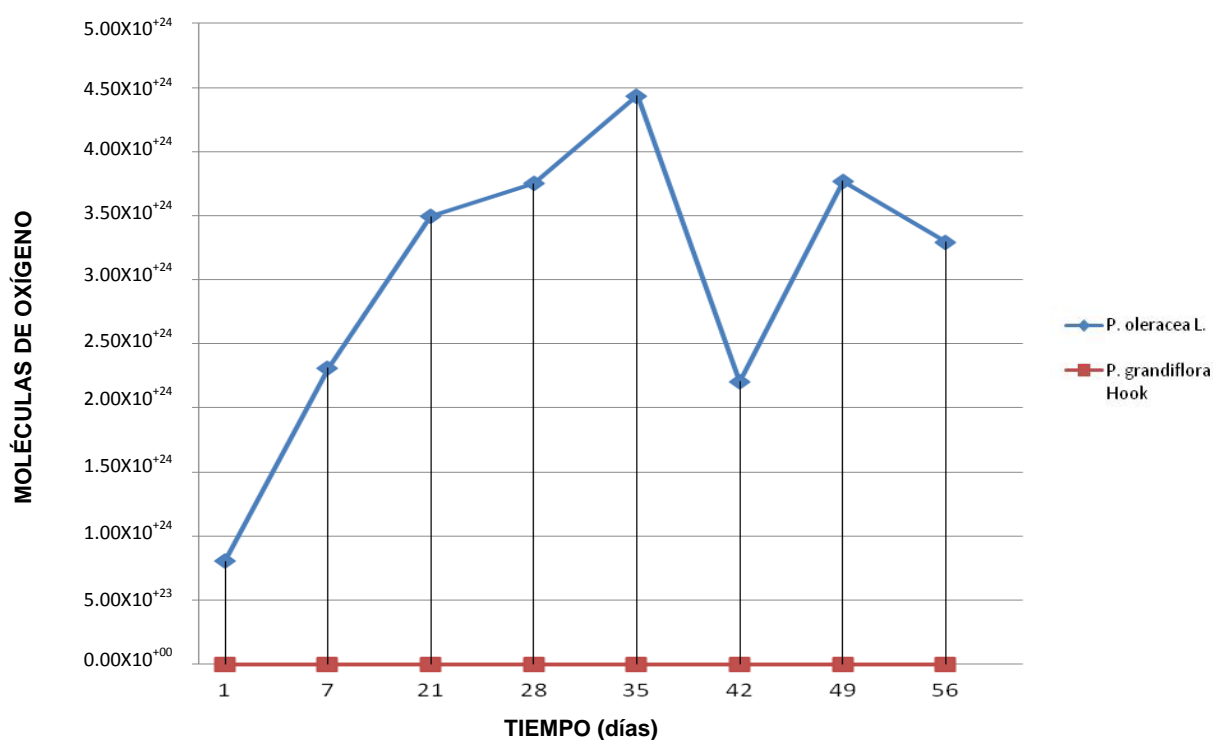


Figura 9. Moléculas de oxígeno liberado del 25 de abril al 13 de junio de 2017

En la figura anterior, se observa de forma gráfica cómo el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) absorbe mayor de dióxido de carbono y libera mayor cantidad de oxígeno al ambiente en el día 35, muestra tomada a el 23 de mayo (final de la época seca inicio de la época lluviosa), en comparación de la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) que no muestra absorción.

La ciudad capital y las diferentes actividades humanas han generado pérdida de paisajes naturales, con una disminución notable de la biodiversidad y cobertura vegetal, especialmente de la vegetación nativa, lo que origina desequilibrios ambientales en el casco urbano.

Es bien sabido que la vegetación tiene un sistema natural de extracción e inyección donde se extrae dióxido de carbono del ambiente a través del proceso de fotosíntesis (separación del átomo de carbono, de los átomos de oxígeno) y se inyecta oxígeno al ambiente mejorando así la calidad del aire (figura10).

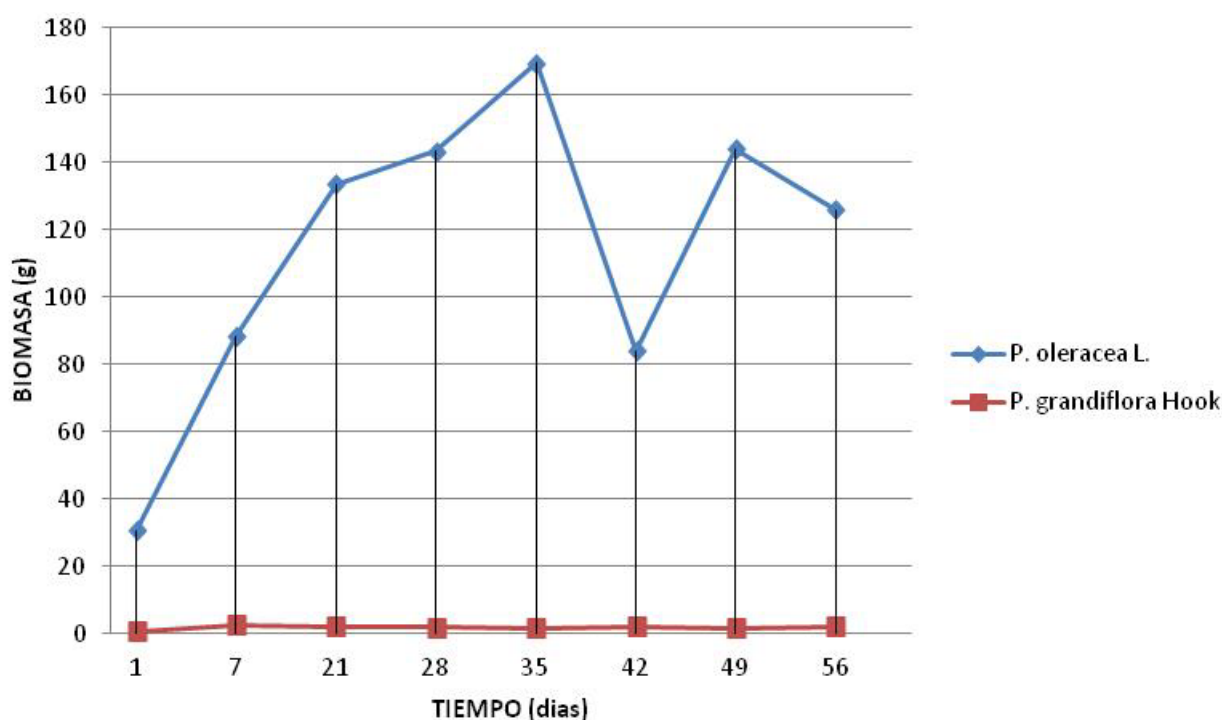


Figura 10. Biomasa formada de 25 de abril al 13 de junio de 2017

Para medir la biomasa formada se cortaron 5 cm de longitud de cada planta obteniendo en el caso del árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) 919.2103 g totales de biomasa fijando así mayor cantidad de dióxido de carbono, a diferencia de la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) la cual presenta 15 g totales. En la figura anterior se observa de forma gráfica como la biomasa y el dióxido de carbono absorbido por el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) son proporcionales y complementarios ya que el carbono fijado es utilizado para la formación de raíces, tallos y follaje. La portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) no muestra aumento significativo en su biomasa.

En el cuadro 5 se observa la diferencia de biomasa (g) entre las dos especies evaluadas:

Cuadro 5. Biomasa (g) de *P. oleracea* L y *P. grandiflora* Hook

<i>P. oleracea</i> L. Biomasa g	<i>P. grandiflora</i> Hook. Biomasa g
30.7360	0.9
88.2661	2.6
133.4800	2.1
143.2866	1.9
169.4262	1.8
84.1924	2.0
143.9356	1.7
125.8870	2.0

Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de probabilidad debido a la notoria diferencia en la absorción de CO₂ que existe entre las dos especies evaluadas y bajo condiciones ambientales equitativas el valor de $P(T \leq t)$ es 2.30598×10^{-06} , el cual es mucho menor que $\alpha = 0.05$ rechazando la hipótesis nula y se aceptando la hipótesis alterna, por tanto es estadísticamente significativo ya que al menos una especie presentó aumento de biomasa, (cuadro 6)

Cuadro 6. Análisis de probabilidad donde $P(T \leq t) 2.30598 \times 10^{-06} < \alpha = 0.05$

t-Test: Dos Muestras Asumiendo Variaciones Equitativas		
	<i>P. Oleácea</i>	<i>P. Grandiflora</i>
Media	114.9012898	1.875
Varianza	1974.829151	0.227857143
Observaciones	8	8
Varianza combinada	987.528504	
Diferencia media hipotética	0	
Df	14	
t Stat	7.193407233	
P(T<=t) one-tail	2.30598E-06	
t Critical one-tail	1.761310115	
P(T<=t) two-tail	4.61196E-06	
t Critical two-tail	2.144786681	

6.3 El efecto térmico de las cubiertas vegetales.

Los espacios habitables disminuyen día a día a consecuencia de diversas actividades humanas las zonas pavimentadas impiden la transpiración de la tierra. La organización meteorológica mundial manifiesta que la falta de espacios verdes podría ser la causa del aumento de 1 °C a 4 °C de temperatura en algunas ciudades de Latinoamérica, a provocando una disminución significativa en la humedad relativa, dando como resultado un efecto islas de calor.

Es bien sabido que durante los últimos años, la demanda de energía para enfriar y calentar en el sector de la construcción ha aumentado de manera significativa. Los materiales aislantes han sido ampliamente estudiados y utilizados con el fin de mejorar el comportamiento térmico de los edificios (A. de Gracia, 2011).

Aunque hay varios estudios relacionados a la cantidad de biomasa formada por las plantas, no hay estudios previos en Guatemala relacionados a la capacidad térmica de dichas plantas. En el 2017, en su tesis de post grado Tarracena, evaluó las ventajas térmicas de los jardines verticales en clima cálido seco de Guatemala, pero debido a que el jardín se encontraba en su etapa inicial y con poca proliferación vegetal no obtuvo diferencia significativa en la temperatura interna y externa de la edificación cubierta con el jardín, concluyendo que debe de dársele continuidad al ensayo y tomar nuevamente temperaturas cuando dicho jardín ya se encuentre implementado.

Las plantas son reguladores naturales de temperatura debido al control climático que ejercen sobre el ambiente donde se encuentran, esto se refleja en los datos obtenidos donde las temperaturas máximas, mínimas y precipitación registradas durante el muestreo (cuadro 7).

Cuadro 7. Temperatura máxima y mínimas registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017

Fecha	hora	T _{inter} (°C)	T _{ext} (°C)	T INSIVUMEH max (°C)	T INSIVUMEH min (°C)
25-abr	9:00 a. m.	20	25	26	16
	2:00 p.m.	20	27		
2-may	9:00 a. m.	22	25	29	18
	2:00 p.m.	29	25		
9-may	9:00 a. m.	21	24	26	17
	2:00 p.m.	28	23		
16-may	9:00 a. m.	19	20	27	17
	2:00 p.m.	22	24		
23-may	9:00 a. m.	20	22	27	17
	2:00 p.m.	19	20		
30-may	9:00 a. m.	20	23	26	16
	2:00 p.m.	19	21		
6-jun	9:00 a. m.	20	24	27	16
	2:00 p.m.	22	25		
13-jun	9:00 a. m.	19	22	26	17
	2:00 p.m.	21	23		

T INSIVUMEH Max °C = Temperatura máxima

T INSIVUMEH Min °C = Temperatura mínima

PPT= Precipitación

T inter °C = Temperatura interna

T ext. °C = Temperatura externa

En el cuadro 8 se observa una disminución de 4 °C durante las horas de máximas temperaturas en el valle de la ciudad capital.

Cuadro 8. Temperatura máxima externa e interna registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017

Temperatura según el INSIVUME (°C)	Temperatura en el área con cubierta vertical (°C)	Temperatura en el área sin cubierta vertical (°C)	Diferencia en (°C)
29	25	29	4

En el cuadro 9 la temperatura mínima disminuye únicamente 1 °C a 3 °C proporcionando energía (calor) y humedad en el ambiente.

Cuadro 9. Temperatura mínima externa e interna registradas del 25 de abril al 13 de junio de 2017

Temperatura según el INSIVUME (°C)	Temperatura en el área con cubierta vertical (°C)	Temperatura en el área sin cubierta vertical (°C)	Diferencia en °C
16	20	19	1-3

Estas diferencias comprueban la alta efectividad de las plantas como termoreguladores naturales (figura 11).

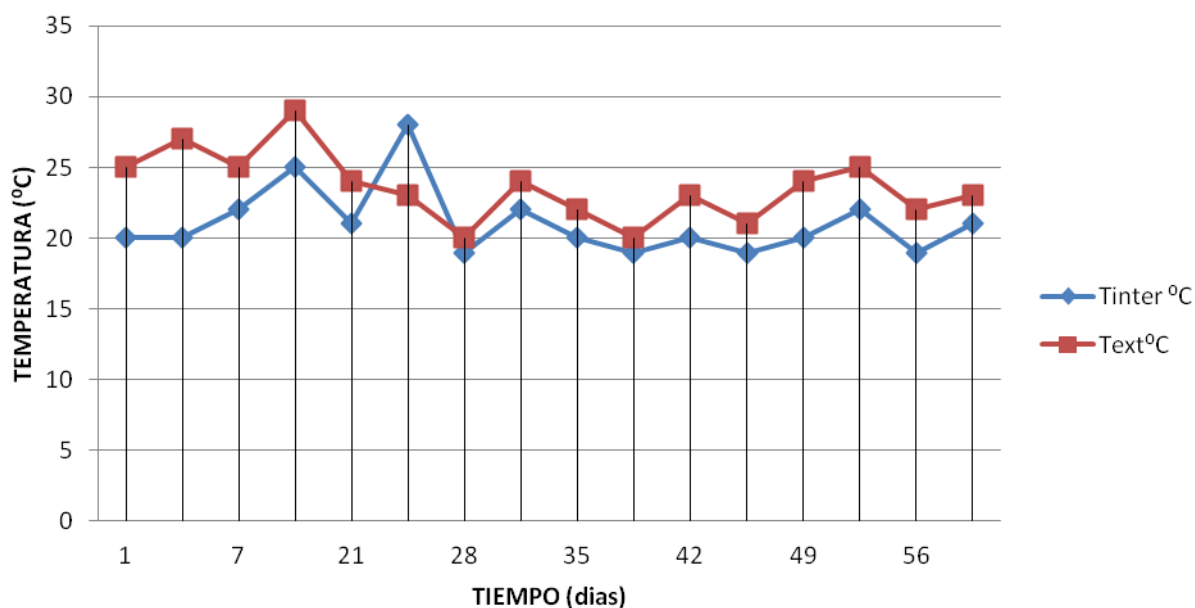


Figura 11. Temperatura externa vrs temperatura interna del 25 de abril al 13 de junio de 2017.

En la figura anterior se observa de forma gráfica la diferencia en las temperaturas máximas y mínimas presentes en el interior-exterior de la cubierta vegetal vertical, observándose claramente que durante el periodo de cambio de época seca a lluviosa (mes de mayo) las plantas se térmoregulan para adaptarse a dicho cambio.

6.4 Determinar la relación de beneficio costo de la implementación de cubiertas vegetales verticales.

Una cubierta vegetal vertical de alto valor artístico/estético, con 10 a 12 variedades de plantas con dimensiones 2 m de ancho por 4 m de altura (8 m²) tiene un precio total de U.S. \$ 4,313.91 en Guatemala. Dando un valor unitario U.S. \$ 539.24/m² equivalente a Q. 4,152.14/m².

Si un m² lo formaran 13 plantas de árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) o portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) el oxígeno liberado tendría un costo como el mostrado en el cuadro 10.

Cuadro 10. Relación costo vrs oxígeno (kg/m²)

Tipo de Portulaca	Oxígeno liberado al ambiente (kg/m ²)	costo 13 plantas/m ²
<i>P. oleracea</i> L.	4.814X10 ⁺²²	Q. 4,152.14
<i>P. grandiflora</i> Hook	7.856X10 ⁺²⁰	Q. 4,152.14

Siendo más rentable y eficiente la *P. oleracea* L, si se vendiera oxígeno.

Las cubiertas vegetales verticales muestran ventajas para el ambiente regulando la temperatura, absorbiendo dióxido de carbono y liberando oxígeno, éstos últimos contribuyen en el mejoramiento de la calidad del aire. Las plantas evaluadas el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) y portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) pertenecen a la misma familia, mismo metabolismo, diferenciándose significativamente al absorber dióxido de carbono y liberar oxígeno.

El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) forma 919.2103 g totales de biomasa, absorbe y libera 3.85141X10⁺²³ kg de dióxido de carbono y oxígeno (relación 1:1), fijando así mayor cantidad de carbono a diferencia de la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) formó 15 g totales de biomasa, absorbió y liberó 6.2848X10⁺²¹ Kg de dióxido de carbono y oxígeno, siendo más eficiente y significativo en el mejoramiento de la calidad del aire el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.).

Para el análisis estadístico se utilizó un análisis de probabilidad debido a la notoria diferencia en la absorción de CO₂ el valor de P(T<=t) es 2.30598X10⁻⁰⁶, el cual es mucho menor que α=0.05 rechazando la hipótesis nula y se aceptando la hipótesis alterna, por tanto es estadísticamente significativo ya que al menos una especie presento aumento de biomasa.

Con respecto a su efecto termoregulador se demostró que las cubiertas vegetales verticales en periodos de temperatura máxima bajan de 1 °C a 4 °C y mantiene calor en periodos de temperaturas mínimas.

El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) presenta mayor absorción de dióxido de carbono, a un costo de Q. 4,152.12 liberando y absorbiendo $4.814 \times 10^{+22}$ kg /m², mientras que por el mismo costo la portulaca de flor (*P. grandiflora* Hook) liberó y absorbió $7.856 \times 10^{+20}$ kg /m² de dióxido de carbono y oxígeno. Demostrando tener mayor rentabilidad en cuanto a venta de oxígeno el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.).

7. CONCLUSIONES

1. Por tanto es más eficiente y contribuye de manera significativa a mejorar la calidad del aire el árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) absorbe y libera $3.85141 \times 10^{+23}$ kg de dióxido de carbono y oxígeno, estableciendo así que el tipo de metabolismo no incide en la cantidad de carbono fijado, son los procesos metabólicos al formar compuestos carbonados orgánicos.
2. El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) formó 919.210 g de biomasa, absorbe y libera $4.814 \times 10^{+22}$ kg /m² de dióxido de carbono y oxígeno, demostrando mayor contribución en el mejoramiento de la calidad del aire.
3. La cubierta vegetal vertical demostró su capacidad de térmoregulador bajando 1 °C a 4 °C en periodos de temperatura máxima y manteniendo calor en periodos de temperaturas mínimas.
4. El árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) presenta mayor absorción de dióxido de carbono, a un costo de Q. 4,152.12 liberando y absorbiendo $4.814 \times 10^{+22}$ kg /m²

8. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda plantar árbol de jade enano (*P. oleracea* L.) en áreas de alta afluencia vehicular, ya que absorbe y libera $4.814 \times 10^{+22}$ kg /m² de dióxido de carbono y oxígeno.
2. Se recomienda implementar jardines verticales en edificaciones que presentan efecto isla o con exposición directa al sol ya que éstos en periodos de temperatura máxima bajan de 1 °C a 4 °C y mantiene calor en periodos de temperaturas mínimas.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Amir, AF; Yeok, SF; Abdullah, A; Abdul Rahman, AM. 2011. The most effective malaysian legume plants as biofacade for building wall application (en línea). *Journal of Sustainable Development* 4(1):103-111. Consultado 20 ene. 2017. Disponible en <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/jsd/article/view/8310/6792>
2. Benavides, R; Guaérrez, AM; Chún, E. 2000. Determinación del grado de contaminación con plomo en la ciudad de Guatemala y su comparación con los niveles detectados en los alrededores de las fábricas de acumuladores o baterías (en línea). Guatemala, SENACYT / Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía, Departamento de Aplicaciones Nucleares, Laboratorio de Contaminación Radiactiva Ambiental. 46 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://glifos.concyt.gob.gt/digital/fodecyt/fodecyt%201998.31.pdf>
3. CERIGUA (Centro de Reportes Informativos sobre Guatemala, Guatemala). 2008. Ciudad de Guatemala rebasa los niveles de contaminación (en línea). Guatemala. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.cerigua.blogspot.com/2008/04/ciudad-de-guatemala-rebasa-los-niveles.html>
4. Danin A., Baker I. & Baker H. G. 1978. Cytogeography and taxonomy of the portulaca oleracea L. polyploidy complex. *Israel Jour. Bot.* 27:177-211
5. De Gracia, A; Castell, A; Medrano, M; Cabeza, LF. 2011. Dynamic thermal performance of alveolar brick construction system (en línea). *Energy Conversion and Management* 52(7):2495–2500. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890411000677>
6. González Coto, JD.2013.Jardines Verticales como alternativa ecológica. CEGESTI. Éxito empresarial. No. 243. Consultado 20 de feb 2017. Disponible en www.cegesti.org

7. Hernández Real, M de J; Díaz Castro, SC. 2002. Importancia de las áreas verdes urbanas (en línea). *Ciencia y Desarrollo* 28(164):76-81. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/EdicionesAnteriores/img/Revista%20CyD%202002/Cyd164may-jun2002.pdf>
8. Herrera, JL. 2003. Estado actual del clima y la calidad del aire en Guatemala (en línea). *In Informe Ambiental de Guatemala y Bases para la Evaluación Sistemática del Estado del Ambiente* 2002-2005. Guatemala, IARNA. 95 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en [http://wikiguate.com.gt/w/images/8/8a/Estado actual del clima y calidad del aire en Guatemala.pdf](http://wikiguate.com.gt/w/images/8/8a/Estado_actual_del_clima_y_calidad_del_aire_en_Guatemala.pdf)
9. MARN. 2017. Informe Ambiental del Estado 2016- Guatemala. Guatemala. 274pp.
10. IPCC (Instituto Privado de Cambio Climático, Guatemala). 2007. Cambio climático 2007: informe de síntesis; contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. Ginebra, Suiza. 104 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
11. Kimball, BA. 1982. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations (en línea). Phoenix, Arizona, US, USDA, Water Conservation Laboratory, Agricultural Research Service. 50 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <https://naldc.nal.usda.gov/naldc/download.xhtml?id=50524&content=PDF>
12. Mendoza, R. 2012. Contaminante de mayor perjuicio gana presencia en la ciudad (en línea). *Siglo21*, Guatemala, 01 Oct2012:página 10. Consultado 13 oct. 2012. Disponible en <http://www.s21.com.gt/nacionales/2012/10/01/contaminante-mayor-perjuicio-gana-presencia-ciudad>
13. Oliva Soto, P.E. 2018. Calidad del Aire en la Ciudad de Guatemala. *Revista Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación –CTI-*. Secretaria Nacional de Ciencia y

- Tecnología. 4-7 p. Consultado 18 de Febrero de 2018. Disponible en <http://senacyt.gob.gt>.
14. Ortega Mendoza, AR; Carbajal Ávila, J; Pérez Juárez, A. 2007. Cubiertas vegetales, una revisión histórica y técnica (en línea). *Energía Solar ABC*-29:1-5. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.paginaspersonales.unam.mx/files/251/CUBIERTAS.pdf>
 15. PNUD; GEF; BUN-CA. 2002. Biomasa (en línea). San José, Costa Rica, BUN-CA. 42 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.bionica.info/biblioteca/BUNCA2002Biomasa.pdf>
 16. Rodríguez Laredo, DM. 2011. La gestión del verde urbano como un criterio de mitigación y adaptación al cambio climático (en línea). *Investig@ UMSA* 2(1):55-70. Consultado 20 ene 2017. Disponible en <http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rci/v2n2/v2n2a05.pdf>
 17. Rodríguez Mellado, JM; Rivero Pallarés, F. 2011. Indicador para la sostenibilidad de la actividad urbanística: balance CO₂ producido/ CO₂ absorbido de la aglomeración urbana de Sevilla (en línea). *In Congreso Nacional de Medio Ambiente* (9, 2011, España). Sevilla, España, CONAMA. 20 p. Consultado 20 ene 2017. Disponible en http://www.conama9.conama.org/conama9/download/files/CTs/985807_JRodr%EDguez.pdf
 18. [Schatán, C. 2000. Desarrollo económico y medio ambiente.](#) Hamburg, Institut für Iberoamerika-Kunde. 1-79 p.
 19. Standley P.C. & Steyemark JA. 1946. Portulacaceae, en *Flora of Guatemala*. *Fieldiana Bot.* 24(4):207-214
 20. Taracena, C. 2017. Ventajas de los jardines verticales sobre edificios de concreto en clima cálido-seco de Guatemala. Escuela de Estudio de Postgrado, Facultad de Ingeniería y Centro Universitario de El Progreso. Universidad de San Carlos de Guatemala.

21. Taylor, P; Luther, MB. 2004. Evaluating rammed earth walls: a case study (en línea). Solar Energy 76(1-3):79-84. Consultado 12 nov. 2012. Disponible en <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X03003062>
22. Urbanarbolismo. 2012. Aire acondicionado vegetal (en línea). España. 7 p. Consultado 10 ene. 2017. Disponible en <https://dl.dropboxusercontent.com/u/6192433/PDF%20Urbanarbolismo/PDF%20Aire%20acondicionado%20vegetal%20MQ.pdf>
23. USAC (Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala); MARN (Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, Guatemala). 2013. Primer Informe Indicativo de la Calidad del Aire Ambiente en las Cabeceras Departamentales de la Republica de Guatemala. Guatemala.
24. Zom, EG. 2010. Cubiertas Verdes. España, Naturación Urbana. 15 p.