

Sobrevivencia y cobertura de plantas en techos verdes durante el estiaje en Yucatán

E. E. Ordóñez-López¹, C. Zetina-Moguel, M. Pérez-Cortés

Fecha de recepción: 11 de julio de 2012 – Fecha de aprobación: 15 de agosto de 2012

RESUMEN

La búsqueda del confort térmico en edificaciones al menor costo energético es una aspiración humana; en Yucatán la alta temperatura ambiental estimula la búsqueda de tecnologías que maximicen el confort al interior de las viviendas. Los techos verdes son una de las opciones tecnológicas que se orientan a este objetivo. La selección adecuada de plantas y sustratos para techos verdes tiene efecto importante sobre su efectividad y costo económico. Los resultados obtenidos de este estudio pueden ser una guía para ingenieros civiles interesados en aplicar los sistemas de techo verde en la construcción de nuevas edificaciones. En este trabajo se explora el potencial de 18 especies de plantas utilizando cuatro variaciones de sustrato. Se seleccionaron las especies y se siguió un proceso de propagación, aclimatación y establecimiento. Se analizó la variación en número y área de cobertura (sombra en cm²) durante un período de 180 días. El estudio incluyó el análisis de sobrevivencia de organismos considerando los sustratos y el crecimiento de la cobertura. Se usó estadística descriptiva y análisis de regresión lineal y no lineal para modelar el crecimiento en cobertura usando los modelos lineal, exponencial, de raíz cuadrada de X y logístico. Los resultados sugieren que los mejores sustratos son los de menor peso seco y saturado y las especies *Kalanchoe gastonis bonnieri*, *Comelina repens*, *Portulaca pilosa*, *Portulaca umbraticola*, *Briophyllum pinnatum*, *Portulaca grandiflora* y *Kalanchoe fedtschenkoii purple* son apropiadas para su uso en techos verdes en Yucatán.

Palabras clave: Techos verdes, sobrevivencia de plantas, confort térmico.

Plant Survival and coverage in green roofs during the seasonal drought in Yucatan

ABSTRACT

The search for thermal comfort in buildings to lower energy cost is a human aspiration. The high environmental temperature in Yucatan stimulate the search for technologies that maximize comfort indoors. Green roofs are one of the technological options that are aimed to this objective. Appropriate selection of plants and substrates for green roofs have significant impact on their effectiveness and economic cost. The results of this study could be a guide for civil engineers interested in implementing green roof systems in the construction of new buildings. This paper explores the potential of 18 species of plants using four variations of substrate. Species were selected and followed a process of propagation, acclimatization and establishment. The variation in number and coverage area (shaded in cm²) for a period of 180 days. The study included analysis of survival of organisms considering the substrates and the growth of the hedge. We used descriptive statistics and linear regression analysis to model nonlinear growth in coverage using linear, exponential, square root of X and logistics. The results suggest that the best substrate is the lightest and species *Kalanchoe gastonis bonnieri*, *Comelina repens*, *Portulaca pilosa*, *Portulaca umbraticola*, *Briophyllum pinnatum*, *Portulaca grandiflora* and *Kalanchoe fedtschenkoii purple* are suitable for use on green roofs in Yucatan.

Keywords: Green roofs, drought tolerance, thermal comfort.

¹ Facultad de Ingeniería. Av. de Ind. no Contaminantes, Periférico Norte, s/n. Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida Yucatán. CP.97070. México. Correo electrónico: eordonez@fi.uady.mx

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de marzo de 2013. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 16, No.2, 2012, ISSN 1665-529-X.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realizó para estudiar el comportamiento, en cuanto a sobrevivencia y cobertura, de 18 especies de plantas durante el periodo de estiaje en Mérida, Yucatán. La comparación se hizo en un esquema experimental que consideró cuatro sustratos con características distintas basadas en las experiencias de diseño de techos verdes reportadas en la literatura. Se midió el efecto que la proporción de componentes minerales y orgánicos tienen en la tasa de sobrevivencia de plantas. Con el objeto de reducir la posibilidad de introducir alguna especie con potencial invasivo en el ecosistema local, dentro de las especies exóticas se seleccionaron aquellas que son descritas como adecuadas para techos verdes (Snodgrass 2010) y que son ampliamente utilizadas como especies ornamentales en la ciudad de Mérida, Yucatán, México.

Los techos verdes, o azoteas naturadas como se les conoce en México, son sistemas que han sido utilizados a lo largo de muchos años en diversos países tanto para fines ornamentales, como de ahorro de energía, amortiguamiento de la escorrentía de agua, cumplimiento con las normatividades en cuanto al porcentaje de áreas verdes, así como la creación de espacios habitables para otras especies (Cantor 2006, Osmundson 1999). En México estos sistemas empiezan a adoptarse paulatinamente, siendo en las grandes ciudades (Cd. de México, Monterrey, Guadalajara) en donde se han implementado principalmente.

El factor determinante en la elección del sistema de techo verde a implementar en un edificio es la capacidad estructural del mismo. En los techos con una capacidad estructural limitada será necesario hacer una elección cualitativa y cuantitativa de sustratos y plantas que tengan un peso saturado (por metro cuadrado) menor a la capacidad estructural del techo, considerando además un factor de seguridad amplio. Los techos verdes del tipo extensivo tienen un peso que varía entre 30 y más de 100Kg/m² (Weiler 2009). De esta manera, lo deseable desde el punto de vista estructural, es que el espesor del sustrato en el techo verde sea lo más pequeño posible para así reducir el peso del mismo. Sin embargo, a menor espesor las plantas contarán con menos espacio para las raíces, menores reservas de humedad y nutrientes lo que disminuirá su capacidad para soportar situaciones de sequía prolongada y limitará su crecimiento (Luckett 2009). Con el fin de reducir los costos de mantenimiento, los sustratos para techo verde deben mantener estables sus características físicas por periodos prolongados (del orden de décadas). Estos sustratos generalmente tienen una alta proporción de minerales expandidos (perlita, vermiculita, pizarra, arcilla, etc.) que, aún cuando tienen bajo peso, favorecen la capacidad drenante del sustrato, la aireación de las

raíces y la retención de humedad, además de que no se compactan fácilmente. Estos minerales son complementados con materiales ricos en materia orgánica como peat moss, humus de lombriz o tierra de hoja, los cuales generalmente tienen una densidad alta y tienden a compactarse, por lo que su proporción en el sustrato debe estar por debajo del 40% (Dunnett 2010).. Sin embargo, sustratos con poco contenido orgánico tienden a limitar el crecimiento y la resistencia de las plantas a condiciones ambientales adversas, por lo que es conveniente conocer el comportamiento de las plantas en el sitio en donde se desea instalar el sistema de techo verde para garantizar su éxito (Snodgrass 2010). La reducción de la componente orgánica del sustrato también es atractiva porque generalmente tiene un precio específico mayor al de las componentes minerales.

Actualmente existe una amplia literatura en la cual se puede encontrar una descripción bastante profunda de los sistemas constructivos, los tipos de plantas utilizados, diversos tipos de sustratos, las normas vigentes y los beneficios obtenidos con la aplicación de este tipo de sistemas, resaltándose el hecho de que se mencionan efectos importantes en el ahorro energético en las edificaciones que los utilizan, tanto para calefacción en los climas fríos, como de enfriamiento en los climas cálidos (Weiler 2009). En particular, existen varios trabajos en los que se ha observado el comportamiento de la vegetación en techos verdes bajo diversas condiciones de sustrato, irrigación, conjunto de especies utilizadas y periodos de tiempo. En la Universidad de Ciencias Aplicadas de Neubrandenburg, realizaron estudios de la dinámica de la vegetación sobre un periodo y conjunto de especies notablemente grande, 20 años y 110 especies en un área de 650m² (Kohler 2006). En la Universidad Estatal de Michigan estudiaron los efectos del riego, la composición y profundidad del sustrato para varias especies de *Sedum* bajo condiciones controladas (Monterusso 2005). También se han hecho estudios de sobrevivencia de especies de *Sedum* y especies nativas con un periodo de sequía de 88 días (VanWoert 2005). En esta misma universidad realizaron estudios de cobertura y sobrevivencia para un conjunto de 25 especies de plantas suculentas, principalmente *Sedums*, a lo largo de un periodo de 343 días (Durhman 2007). También existen trabajos en los que los resultados de estudios realizados en Europa son trasladados a los trópicos húmedos (Kohler 2002). Hay antecedentes de estudios en la Universidad Nacional de Singapur en los que se demuestran los beneficios de los techos verdes sobre los edificios y su entorno en el ambiente tropical (Wonga 2003). Otros beneficios de los techos verdes, como su relación al manejo de agua de lluvia y la calidad del agua han sido estudiados en la universidad de Florida (Lang 2010), también se ha

encontrado que en Bruselas la aplicación de los techos verdes puede reducir en 54% la escorrentía de lluvia en las edificaciones de manera individual y en 2.7% a escala regional cuando estos sistemas se aplican en el 10% de las edificaciones (Mentens 2006). El National Research Council of Canada realizó un estudio de 2 años de duración en el que se comparan los efectos sobre la temperatura interior de una edificación, encontrando que el uso del techo verde en promedio logró reducir la temperatura en 5°C en comparación con un techo con impermeabilizante claro y 11°C en comparación con un techo con impermeabilizante oscuro, también encontraron que durante más del 33% de los días en los que se realizó el estudio, la superficie exterior del techo con impermeabilizante oscuro alcanzó diferencias máximas de hasta 50°C sobre la temperatura de la superficie exterior del área con techo verde (Weiler 2009). Sin embargo, la mayor parte de la información hace referencia a experiencias obtenidas en lugares en que las condiciones ambientales son distintas a las que prevalecen en la Península de Yucatán.

Aunque existen algunos trabajos realizados en climas similares al de esta región, es notable la necesidad de realizar estudios más profundos y adquirir experiencias en cuanto a la aplicación de los techos verdes como un medio para reducir el flujo del calor causado por la radiación solar, hacia el interior de las edificaciones en el Estado de Yucatán. La aplicación de los techos verdes en las instituciones educativas de este Estado tiene el reto de que existe la posibilidad de que estos techos verdes no cuenten con el mantenimiento adecuado durante un periodo máximo de 2 meses (periodo vacacional). Por esta razón es importante que en su construcción se incluyan especies que puedan sobrevivir un periodo similar o mayor sin mantenimiento ni riego.

METODOLOGÍA

A. Selección de plantas

Las especies utilizadas en este estudio que son reportadas frecuentemente en la construcción de techos verdes son: *Sedum palmeri*, *Sedum oaxacanum*, *Sedum moranense*, *Sedum morganium*, *Sedum dendroideum*, *Sedum rubrotinctum* (Dunett 2010, Snodgrass 2010).

Las especies originarias de la flora silvestre del Estado

de Yucatán son: *Portulaca pilosa*, *Portulaca rubricaulis*, *Tradescantia bicolor* y *Comelina repens*.

Las especies ornamentales que se pueden conseguir fácilmente en viveros en Mérida Yucatán son: *Briophyllum pinnatum*, *Portulaca grandiflora*, *Portulaca umbraticola*, *Aptenia cordifolia*, *Kalanchoe fedtschenkoi purple*, *Kalanchoe gastonis bonnierii*, *Kalanchoe daigremontiana* y *Kalanchoe thyrsoiflora*.

B. Caracterización del sustrato

Las mezclas de sustrato están descritas en términos de las proporciones volumétricas de los componentes. El tamaño de las muestras fue de 4 litros (20cm x 20cm x 10cm) y se obtuvo el promedio de 4 repeticiones. Con el fin de caracterizar los sustratos en condiciones similares a las existentes en los techos verdes, el recipiente para la medición contenía en la totalidad de su parte inferior un drenaje utilizado frecuentemente en la construcción de este tipo de sistemas, el cual tiene 10mm de claro y está cubierto con una capa de fieltro de 2mm de espesor para favorecer el drenaje. Para medir el peso saturado se cubrió la parte superior de la muestra con fieltro y se dejó en reposo por 1 hora. El espesor se mantuvo constante en 0.1m para los cuatro sustratos.

El sustrato 4, que hipotéticamente debería ser el que más favorezca el crecimiento y resistencia de las plantas en el techo verde, tiene un peso en seco del 254% del peso del sustrato 1, que es el que sería menos favorable a las plantas. Sin embargo esta cantidad se reduce al 161% cuando la comparación se hace en términos del peso saturado. Por costo y por demanda de capacidad estructural en la edificación, el sustrato 1 es el adecuado, sin embargo es conveniente verificar que con él las plantas puedan desarrollarse adecuadamente y resistir las condiciones ambientales adversas presentes en la época de estiaje en el Estado de Yucatán.

C. Propagación.

Previo al inicio del experimento, las plantas se propagaron mediante esquejes y fueron plantados en charolas de polietileno de 50 cavidades de 5cm de profundidad. El sustrato utilizado consistió en una combinación de 50% de humus de lombriz y 50% de peat moss. Las plantas se mantuvieron 30 días protegidas de la exposición directa del sol y con riego cada 3 días.

Tabla 1. Composición y características de los sustratos. Para determinar estas características se usaron muestras de 4 litros de cada sustrato. El costo relativo está referido al sustrato más caro.

Sustrato	Perlita %	Vermiculita %	Humus %	Peso en seco [kg/m ³]	Peso saturado [kg/m ³]	Costo relativo %
1	45	45	10	251.3	630.2	89
2	40	40	20	386	780.6	92
3	35	35	30	508.5	939.3	96
4	30	30	40	639.3	1016.1	100

Tabla 2. Número de individuos por especie al inicio de la plantación. El número de individuos fue el mismo para los cuatro sustratos (10%, 20%, 30% y 40% de contenido orgánico).

Especie	Individuos
<i>A. cordifolia</i>	10
<i>K. fedtschenkoi purple</i>	10
<i>K. gastonis bonnierii</i>	5
<i>B. Pinnatum</i>	5
<i>K. daigremontiana</i>	5
<i>K. thyrsiflora</i>	5
<i>S. palmeri</i>	20
<i>S.oaxacanum</i>	20
<i>S.moranense</i>	20
<i>S.morganium</i>	10
<i>S.dendroideum</i>	20
<i>S.rubrotinctum</i>	20
<i>P. pilosa</i>	10
<i>P. rubricaulis</i>	10
<i>P. grandiflora</i>	10
<i>P. umbraticola</i>	10
<i>T. bicolor</i>	10
<i>C. repens</i>	10

D. Aclimatación.

Este periodo duró 3 semanas en las cuales las plantas, todavía en las charolas de propagación, se colocaron a la exposición directa del sol con riego diario.

E. Plantación y establecimiento.

Para garantizar el éxito en la plantación de los techos verdes, ésta debe realizarse en una época del año en que no existan temperaturas extremas o el riesgo de heladas. El material vegetal debe estar constituido por un conjunto diverso de especies. Esto disminuye el riesgo de pérdida de cobertura por enfermedades, plagas o daños ambientales (Luckett 2009).

Para este experimento la plantación se realizó el 8 de noviembre (día cero) en el área de pruebas de plantas y sustratos para techos verdes de la Facultad de Ingeniería de la UADY, la cual está ubicada sobre una edificación con techo a dos aguas. En este techo se cuenta con dos áreas, cada una dividida en una matriz de 4x4 bloques cuadrados de 0.5m por lado, totalizando 16m². Los bloques están separados 0.02m de la superficie del techo para permitir el correcto drenaje de los sustratos. (Figura 1). El establecimiento terminó el 18 de diciembre. A partir de este momento se fue realizando el conteo periódico del número de plantas sobrevivientes. Durante

este periodo el riego se realizó dos veces por semana.

F. Sobrevivencia.

El riego de las plantas se detuvo el 19 de diciembre. A partir de este momento las plantas sobrevivieron con base al agua de la precipitación natural. Las plantas fueron contadas periódicamente hasta el final de esta etapa. El primer conteo de esta etapa se realizó en el día 63 y el último se realizó el día 189.

G. Condiciones ambientales durante el experimento.

Los datos de los parámetros ambientales presentes durante la realización de esta investigación fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y también con registradores diseñados como parte del proyecto FOMIX 108931.

De las gráficas en la Figura 2 podemos observar que durante el periodo del experimento la temperatura ambiente mostró una tendencia a la alza mientras que la humedad relativa presentaba una tendencia a la baja. La fluctuación diaria de la temperatura estuvo por encima de los 20°C, mientras que la de la humedad se mantuvo generalmente por encima de 40%.



Figura 1. Área de pruebas de plantas y sustratos, Facultad de Ingeniería, UADY.

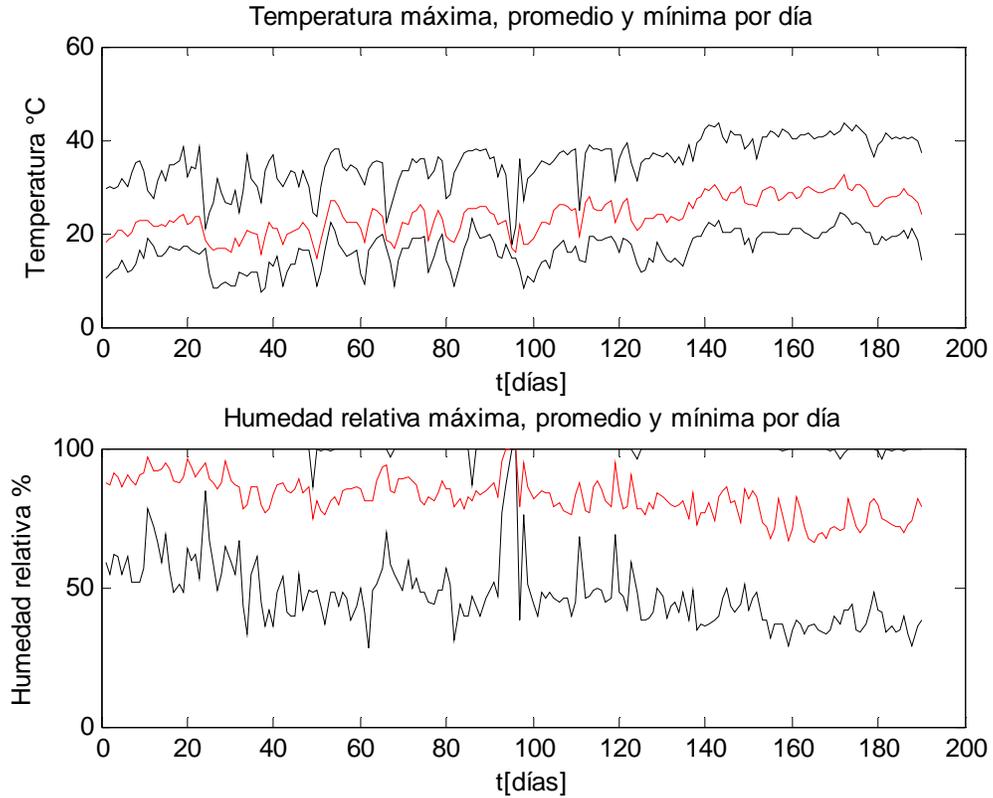


Figura 2. Variación de temperatura y humedad ambiental a lo largo del experimento.

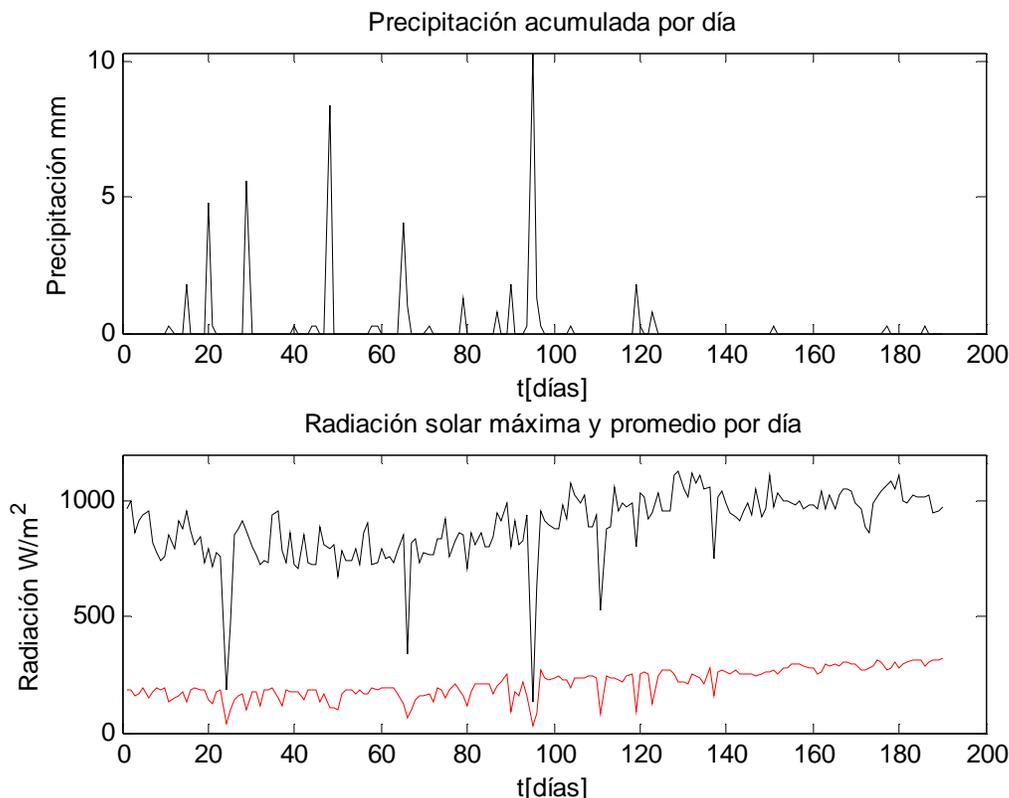


Figura 3. Variación de la precipitación y radiación solar a lo largo del experimento.

La precipitación total en el periodo del experimento en el cual no se proporcionó riego (a partir del 19 de diciembre) fue de 34.02mm, siendo febrero el mes con mayor precipitación (14.58mm) y abril el de menor (0.25mm). Estos valores contrastan notablemente con la precipitación mensual posterior a la finalización del experimento (150.83mm del mes de junio, 107.3 del mes de julio y 434.84 del mes de agosto). Se puede observar también (Figura 3) que la poca precipitación se concentró en unos pocos eventos en la primera parte del experimento. La radiación solar también mostró una tendencia a la alza a lo largo del experimento.

H. Crecimiento en cobertura.

Se evaluó la evolución del área cubierta por cada una de las especies y se exploraron modelos de crecimiento de la cobertura de cada especie. Se midieron la cobertura en cm^2 al inicio (cobertura mínima) y al final (cobertura máxima) en el período de estudio y se calculó el rango o cambio en la cobertura durante el período de estudio. El análisis del crecimiento de cobertura se hizo utilizando los siguientes modelos: Lineal, Exponencial y Logístico. La estimación de los parámetros de los modelos se hizo por regresión lineal con modelos de calibración y regresión no lineal (Seber y Wild, 1989; Sen y Srivastava, 1990). Los análisis estadísticos y de regresión se hicieron con el Statgraphics v.5.1.

Los modelos ajustados para el análisis de la cobertura fueron los siguientes:

1: Modelo lineal

$$Ct = a + b * t \quad (1)$$

Ct = Cobertura al tiempo t en cm^2

a y b son constantes del modelo (a = ordenada al origen y b = pendiente)

t = tiempo en días

2: Modelo exponencial

$$Ct = e^{(a+b*t)} \quad (2)$$

Ct = Cobertura al tiempo t en cm^2

a y b son constantes del modelo (a = punto de corte y b = pendiente)

t = tiempo en días

3: Modelo Raíz cuadrada-X

$$Ct = a + b\sqrt{t} \quad (3)$$

Ct = Cobertura al tiempo t en cm^2

a y b son constantes del modelo (a = punto de corte y b = pendiente)

t = tiempo en días

4.- Modelo logístico

$$Ct = \frac{K \cdot C_0 e^{r \cdot t}}{(K + [C_0 \cdot e^{r \cdot t}] - 1)} \quad (4)$$

Ct = Cobertura al tiempo t (en días)

K = cobertura máxima

r = tasa de crecimiento

P_o = Parámetro de ajuste

e = Constante (2.71828183)

t = tiempo en días

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3 se presentan los resultados de sobrevivencia en porcentaje para todas las especies comprendiendo el periodo completo del experimento. Considerando el grupo total de plantas, no se encontró una relación significativa entre el porcentaje de sobrevivencia y el contenido de materia orgánica del sustrato. Sin embargo, de manera más específica, se pudieron observar tres grupos de especies. El primero consistió de especies cuya población permaneció más o menos constante, el segundo formado por especies cuya

población creció y el tercero constituido por especies cuya población se redujo sustancialmente.

A. Especies con alta sobrevivencia.

Con *P. pilosa* y *K. fedschencoi* el número de plantas permaneció casi constante a lo largo del experimento independientemente del tipo de sustrato (Figura 4). Algo similar sucedió con *S. rubrotinctum*, *P. rubricaulis*, *P. grandiflora*, *S. dendroideum*, *S. moranense* y *A. cordifolia* aunque en estos casos la sobrevivencia creció ligeramente en el sustrato con mayor contenido orgánico (Figura 4).

A. Especies con incremento en la población.

En el caso de *K. thyrsoiflora* el número de plantas creció en los sustratos con 20% y 30% y se mantuvo constante en los otros dos. Para *P. umbraticola* el número de ejemplares creció para 10% y 40% y se mantuvo constante para los sustratos con 20% y 30% de componente orgánico (Figura 5).

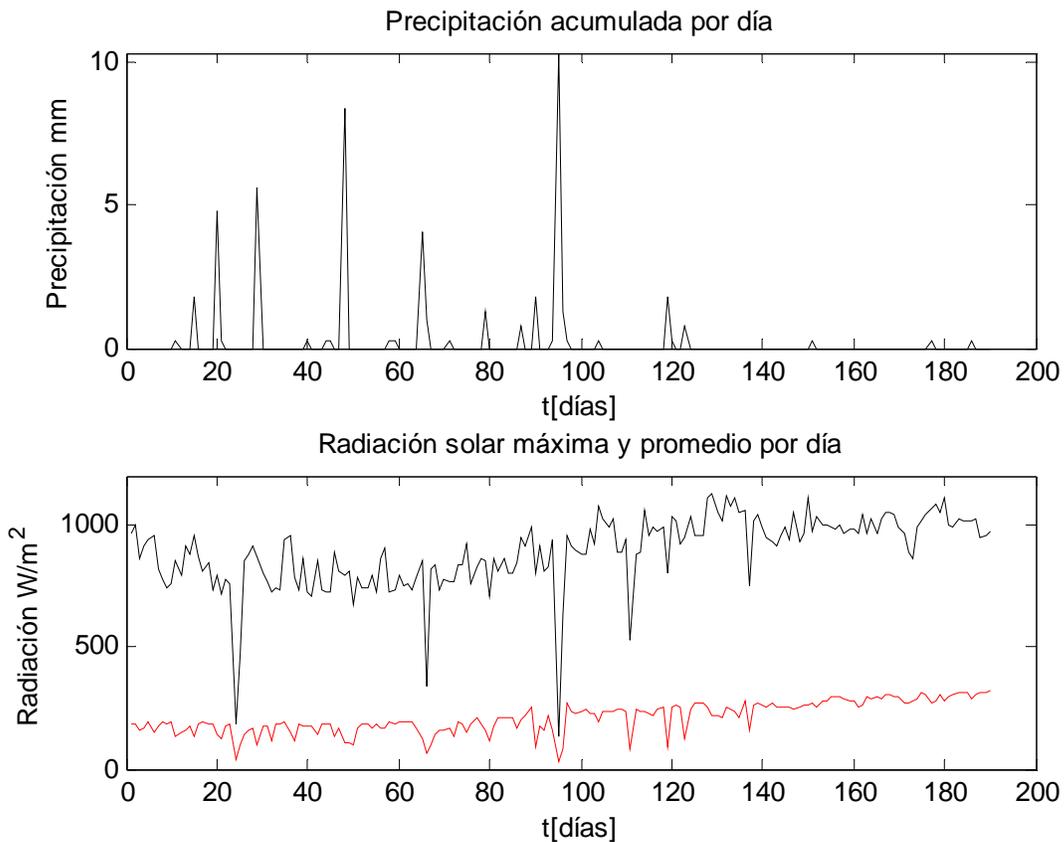


Figura 3. Variación de la precipitación y radiación solar a lo largo del experimento.

Tabla 3. Sobrevivencia en porcentaje, para las cuatro composiciones de sustrato (contenido de materia orgánica del 10%, 20%, 30% y 40%), de todas las especies estudiadas y considerando el periodo total del experimento.

Contenido orgánico del sustrato %	10	20	30	40
Especie	Sobrevivencia en %			
<i>A. cordifolia</i>	80%	70%	90%	70%
<i>K. fedtschenkoi purple</i>	100%	100%	100%	100%
<i>K. gastonis bonnieri</i>	100%	160%	120%	120%
<i>B. pinnatum</i>	100%	140%	100%	100%
<i>K. daigremontiana</i>	340%	260%	360%	300%
<i>K. thyrsoiflora</i>	100%	140%	120%	100%
<i>S. palmeri</i>	15%	10%	15%	20%
<i>S. oaxacanum</i>	20%	25%	10%	0%
<i>S. moranense</i>	80%	80%	90%	75%
<i>S. morganium</i>	0%	0%	0%	0%
<i>S. dendroideum</i>	70%	80%	85%	80%
<i>S. rubrotinctum</i>	100%	90%	100%	95%
<i>P. pilosa</i>	100%	90%	100%	100%
<i>P. rubricaulis</i>	100%	100%	90%	100%
<i>P. grandiflora</i>	60%	70%	80%	60%
<i>P. umbraticola</i>	100%	80%	100%	70%
<i>T. bicolor</i>	120%	100%	110%	120%
<i>C. repens</i>	10%	10%	0%	40%

Para *B. pinnatum* el mayor incremento en el número de ejemplares se dio en el sustrato con 20% de componente orgánico, mientras que en el sustrato con 10% el número se mantuvo constante. Para *K. daigremontiana* el número de ejemplares creció independientemente del tipo de sustrato, siendo en los sustratos de 10% y 30% en los que se registró un cambio mayor.

B. Especies con baja sobrevivencia.

Los ejemplares de las especies *S. palmeri*, *S. oaxacanum*, *S. morganium*, *T. bicolor*, y *C. repens* habían prácticamente desaparecido al final del experimento. Sin embargo sus poblaciones soportaron en buena medida periodos sustanciales. Para *S. morganium* el declive empieza alrededor de los 80 días (Figura 6), mientras que para *S. palmeri*, *S. oaxacanum*, *T. bicolor* y *C. repens* se dio entre los 100 y 125 días.

C. Resultados del análisis de cobertura.

La Tabla 4 presenta las coberturas mínimas y máximas de cada especie así como los rangos o crecimiento alcanzado durante el período de estudio. En algunos casos la máxima cobertura se alcanzó antes del final del

período de estudio y en la última etapa se presentó una disminución del área cubierta (*Sedum aoxacum*, *Sedum morganium*). En otras especies la cobertura no varió durante el período de estudio (*Sedum palmeri* y *Sedum rubrotinctum*).

La Tabla 5 presenta los resultados del análisis del comportamiento de la cobertura de cada especie en el período de tiempo. El ajuste a los modelos implica un crecimiento en la cobertura desde el inicio del experimento hasta el final del período de observaciones. El modelo lineal, exponencial y Raíz cuadrada de X suponen que la cobertura podría ser mayor al valor alcanzado, por su parte el modelo logístico incluye un parámetro (K) que representa el valor teórico asintótico de la cobertura que puede alcanzar la especie.

Las Tablas 6, 7, 8 y 9 presentan las estimaciones de los parámetros de los modelos utilizados (Ecuaciones 1 a 4) y los subíndices son el nombre científico de las especies para las cuales se estimaron los parámetros de cada modelo.

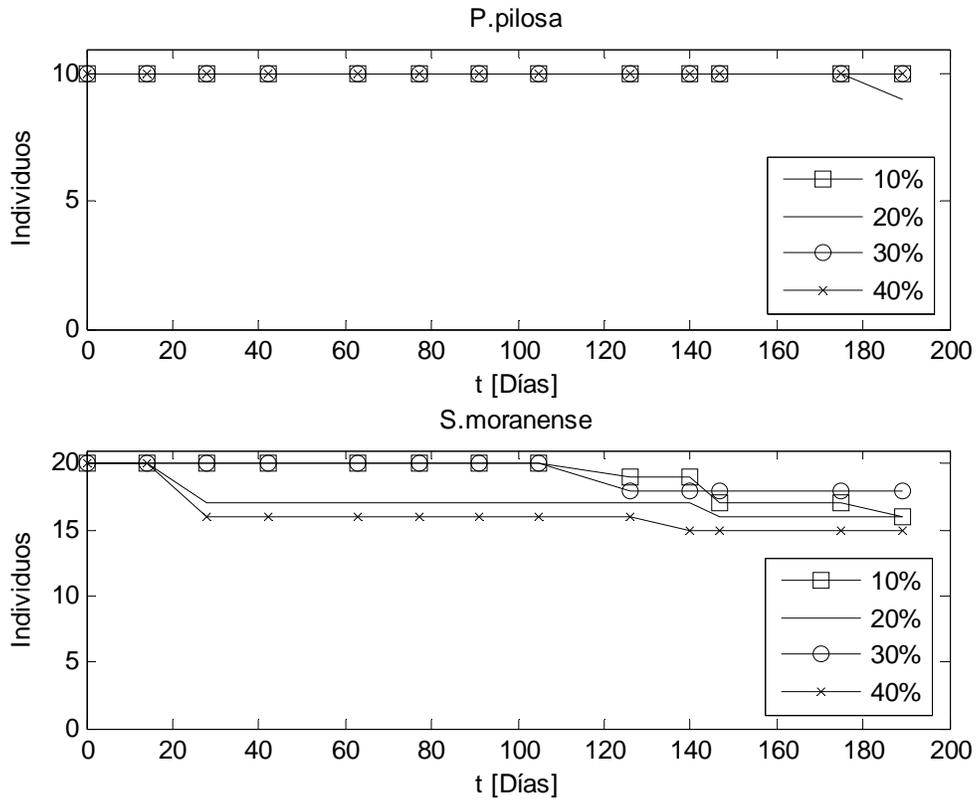


Figura 4. Número de individuos en especies con poblaciones constantes

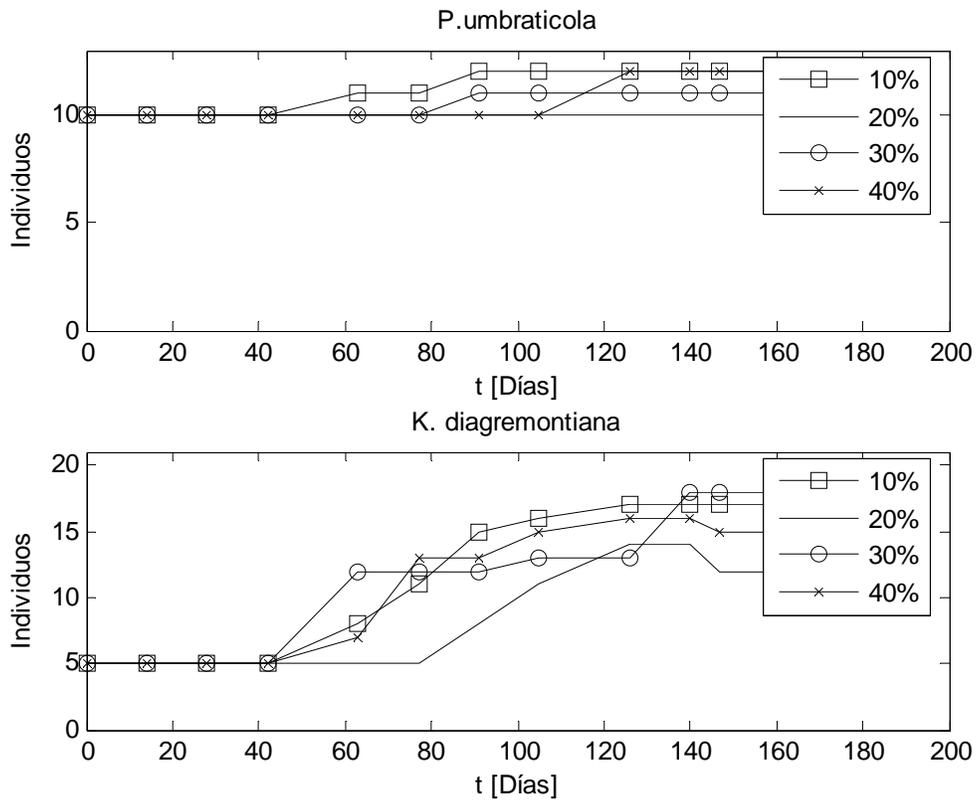


Figura 5. Número de individuos en especies con crecimiento en la población.

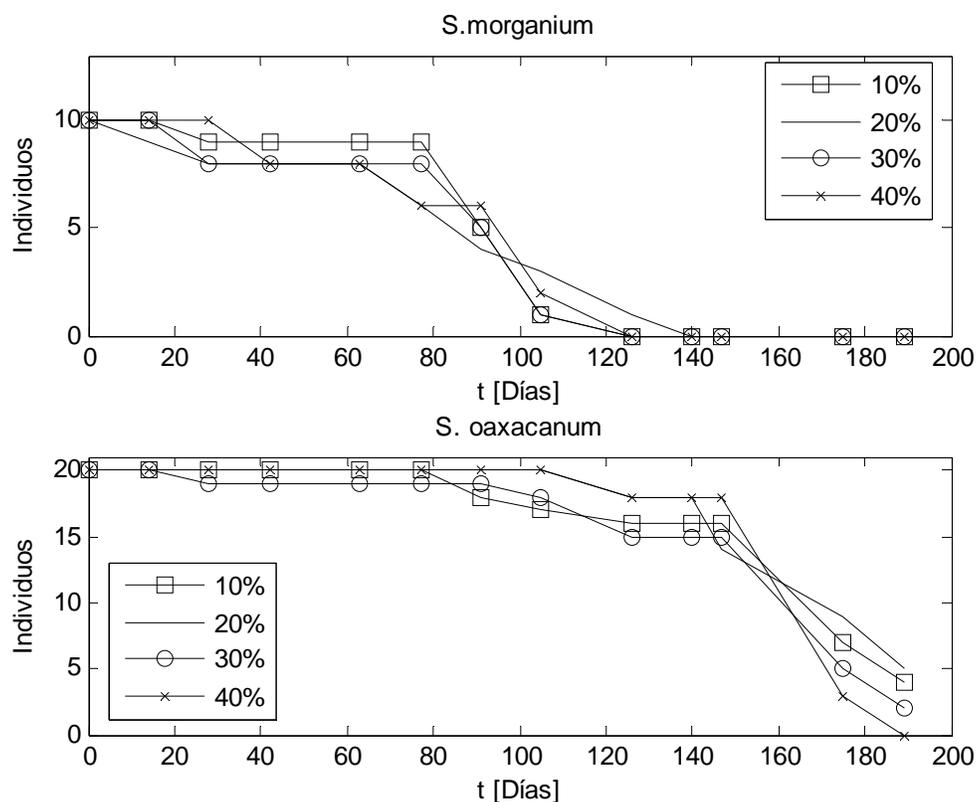


Figura 6. Número de individuos en especies con reducción en la población.

Tabla.4. Mínimos y máximos de cobertura en cm^2 de las especies estudiadas. Las especies fueron ordenadas en función del rango o crecimiento de la cobertura durante el período de estudio, este rango o diferencia entre el mínimo y máximo no necesariamente prevaleció hasta el final del estudio debido a la mortalidad de las plantas. En la última columna se presenta el origen o uso de las plantas, ornamentales (O), nativas (N) o usadas en techos verdes (TV).

Especie	Cobertura mínima cm^2	Cobertura máxima en cm^2	Rango de cobertura cm^2	Origen o uso de las plantas
<i>K. gastonis bonnierei</i>	100	306	206	O
<i>C. repens</i>	9	210	201	N
<i>P. pilosa</i>	1	195	194	N
<i>P. umbraticola</i>	1	156	155	O
<i>B. pinnatum</i>	144	272	128	O
<i>P. grandiflora</i>	9	132	123	O
<i>K. fedtschenkoi purple</i>	100	210	110	O
<i>S. dendroideum</i>	25	121	96	TV
<i>K. thyrsoiflora</i>	100	156	56	O
<i>T. bicolor</i>	121	169	48	N
<i>A. cordifolia</i>	25	64	39	O
<i>P. rubricaulis</i>	1	36	35	N
<i>S. oaxacanum</i>	1	36	35	TV
<i>S. moranense</i>	1	30	29	TV
<i>K. daigremontia</i>	16	36	20	O
<i>S. morganium</i>	1	20	19	TV
<i>S. palmeri</i>	25	25	0	TV
<i>S. rubrotinctum</i>	9	9	0	TV

Tabla 5. Especies, modelos que dan mayor explicación a la cobertura de la especie en el período de tiempo analizado y coeficiente de determinación (% de varianza explicada por el modelo o R²) estimado con ajuste para los grados de libertad.

Especie	Modelo	R ² Ajustado a los grados de libertad
<i>A. cordifolia</i>	Exponencial	89.98
<i>K. fedtschenkoi purple</i>	Exponencial	98.38
<i>K. gastonis bonnierii</i>	Exponencial	97.67
<i>B. Pinnatum</i>	Exponencial	96.38
<i>K. daigremontiana</i>	Raíz cuadrada de X	93.46
<i>K. thyrsiflora</i>	Raíz cuadrada de X	94.61
<i>S. palmeri</i>	No creció	
<i>S. oaxacanum</i>	Disminuyo su cobertura	
<i>S. moranense</i>	Logístico	91.97
<i>S. morganium</i>	Disminuyo su cobertura	
<i>S. dendroideum</i>	Logístico	70.28
<i>S. rubrotinctum</i>	No creció	
<i>P. pilosa</i>	Logístico	99.95
<i>P. rubricaulis</i>	Logístico	70.08
<i>P. grandiflora</i>	Lineal	98.26
<i>P. umbraticola</i>	Logístico	99.21
<i>T. bicolor</i>	Raíz cuadrada de X	96.08
<i>C. repens</i>	Logístico	79.91

Tabla 6. Parámetros del modelo lineal para las especie (subíndices), estimado puntual de los parámetros y error estándar de las estimaciones.

Modelo Lineal		
Parámetros	Estimado	Error estándar
a <i>Portulaca grandiflora</i>	2.400	7.275
b <i>Portulaca grandiflora</i>	0.657	0.062

Tabla 7. Parámetros del modelo exponencial para las especie (subíndices), estimado puntual de los parámetros y error estándar de las estimaciones.

Modelo Exponencial		
Parámetros	Estimación	Error estándar
a <i>Aptenia cordifolia</i>	3.271	0.150
b <i>Aptenia cordifolia</i>	0.005	0.001
a <i>Kalanchoe fedtschenkoi purple</i>	4.586	0.035
b <i>Kalanchoe fedtschenkoi purple</i>	0.004	0.000
a <i>Kalanchoe gastonis bonnierii</i>	4.626	0.059
b <i>Kalanchoe gastonis bonnierii</i>	0.006	0.001
a <i>Briophyllum pinnatum</i>	4.955	0.058
b <i>Briophyllum pinnatum</i>	0.004	0.000
a <i>Tradescantia bicolor</i>	123.160	5.160
b <i>Tradescantia bicolor</i>	3.718	0.531

Tabla 8. Parámetros del modelo Raíz cuadrada de X para las especie (subíndices), estimado puntual de los parámetros y error estándar de las estimaciones.

Modelo de Raíz cuadrada de X		
	Estimación	Error estándar
a <i>Kalanchoe daigremontiana</i>	15.380	2.844
b <i>Kalanchoe daigremontiana</i>	1.564	0.293
a <i>Kalanchoe thvrsiflora</i>	103.383	7.098
b <i>Kalanchoe thvrsiflora</i>	4.329	0.730
a <i>Tradescantia bicolor</i>	123.160	5.160
b <i>Tradescantia bicolor</i>	3.718	0.531

Tabla 9. Parámetros del modelo logístico para las especie (subíndices), estimado puntual de los parámetros y error estándar de las estimaciones.

Modelo Logístico		
Parámetros	Estimado	Error estándar
K <i>Portulaca pilosa</i>	153.580	32.272
Co <i>Portulaca pilosa</i>	1.291	0.267
r <i>Portulaca pilosa</i>	0.048	0.002
K <i>Portulaca rubricaulis</i>	120.764	3766.700
Co <i>Portulaca rubricaulis</i>	0.253	7.801
r <i>Portulaca rubricaulis</i>	0.100	0.522
K <i>Portulaca umbraticola</i>	49.374	26.830
Co <i>Portulaca umbraticola</i>	4.391	2.762
r <i>Portulaca umbraticola</i>	0.025	0.006
K <i>Sedum dendroideum</i>	513.042	54103.000
Co <i>Sedum dendroideum</i>	0.236	24.467
r <i>Sedum dendroideum</i>	0.110	1.691
K <i>Sedum moranense</i>	251.435	7951.880
Co <i>Sedum moranense</i>	0.110	3.422
r <i>Sedum moranense</i>	0.093	0.509
K <i>Comelina repens</i>	482.672	41515.800
Co <i>Comelina repens</i>	0.380	32.126
r <i>Comelina repens</i>	0.097	1.363

CONCLUSIONES

Todas las especies seleccionadas pueden sobrevivir periodos de sequía mayores a 60 días con poco impacto en el tamaño de sus poblaciones, destacándose *P. pilosa*, *K. fedtschenkoii*, *S. rubrotinctum*, *P. rubricaulis*, *P. grandiflora*, *S. dendroideum*, *S. moranense* y *A. cordifolia*.

Para el conjunto total de especies no existe correlación entre el contenido del componente orgánico y la tasa de sobrevivencia de las plantas, por lo que el sustrato 1 (con menor contenido orgánico, el más ligero y económico de los cuatro) es adecuado y recomendable para su uso en techos verdes.

Se sugiere un uso moderado de *K. thyrsoiflora*, *P. umbraticola*, *K. gastonis bonnieri* y *B. pinnatum* debido a la que sus poblaciones tienden a incrementarse mucho más rápido que el del resto de las especies y a que los restos del material vegetativo de desecho pueden dar lugar a la aparición de nuevos ejemplares.

P. pilosa es una especie muy resistente al daño mecánico por lo que se sugiere utilizarla cerca de los andadores en el techo verde y también en combinación con especies de mayor porte.

Se pudo observar que *K. diagremontiana* puede salir del sistema de techo verde y propagarse en el entorno, por lo que no se recomienda su uso.

El mayor incremento en cobertura lo alcanzaron

especies ornamentales y nativas con aumentos de cobertura de más de 200 cm², entre las especies utilizadas para techos verdes solo *S. dendroideum* se acerca a un crecimiento de cobertura similar. *K. gastonis bonnieri* es la especie que mayor incremento en cobertura alcanza, sin embargo la cobertura inicial fue de 100 cm²; *C. repens*, *P. pilosa* y *P. umbraticola* son especies que alcanzan una gran cobertura iniciando de una cobertura pequeña (9,1 y 1 respectivamente) y esto puede representar una ventaja cuando se combinan con especies de mayor porte, sin embargo su uso puede ser perjudicial en combinación con plantas de porte similar a las que pueden cubrir por completo.

Las especies *K. gastonis bonnieri*, *C. repens*, *P. pilosa*, *P. umbraticola*, *B. pinnatum*, *P. grandiflora* y *K. fedtschenkoii purple* son especies que permiten aumentos de cobertura de más de 100 cm², de manera que en este sentido se pueden considerar de utilidad para su uso en techos verdes.

Los modelos que se usaron para representar el crecimiento de la cobertura y los parámetros estimados son las primeras aproximaciones para la predicción del crecimiento de estas especies bajo las condiciones experimentales que se usaron (aplicación en techos verdes). Sin embargo pueden servir como guía para generar hipótesis del crecimiento de la cobertura de las especies que se estudiaron en este trabajo y para sustentar predicciones preliminares en el uso de las especies para techos verdes.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo proporcionado por el CONACyT y el Gobierno del Estado de Yucatán para el desarrollo de esta investigación, bajo el proyecto FOMIX 108931. Los datos de las variables ambientales fueron proporcionados por el IC Juan Ernesto Vázquez Montalvo, encargado de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la UADY.

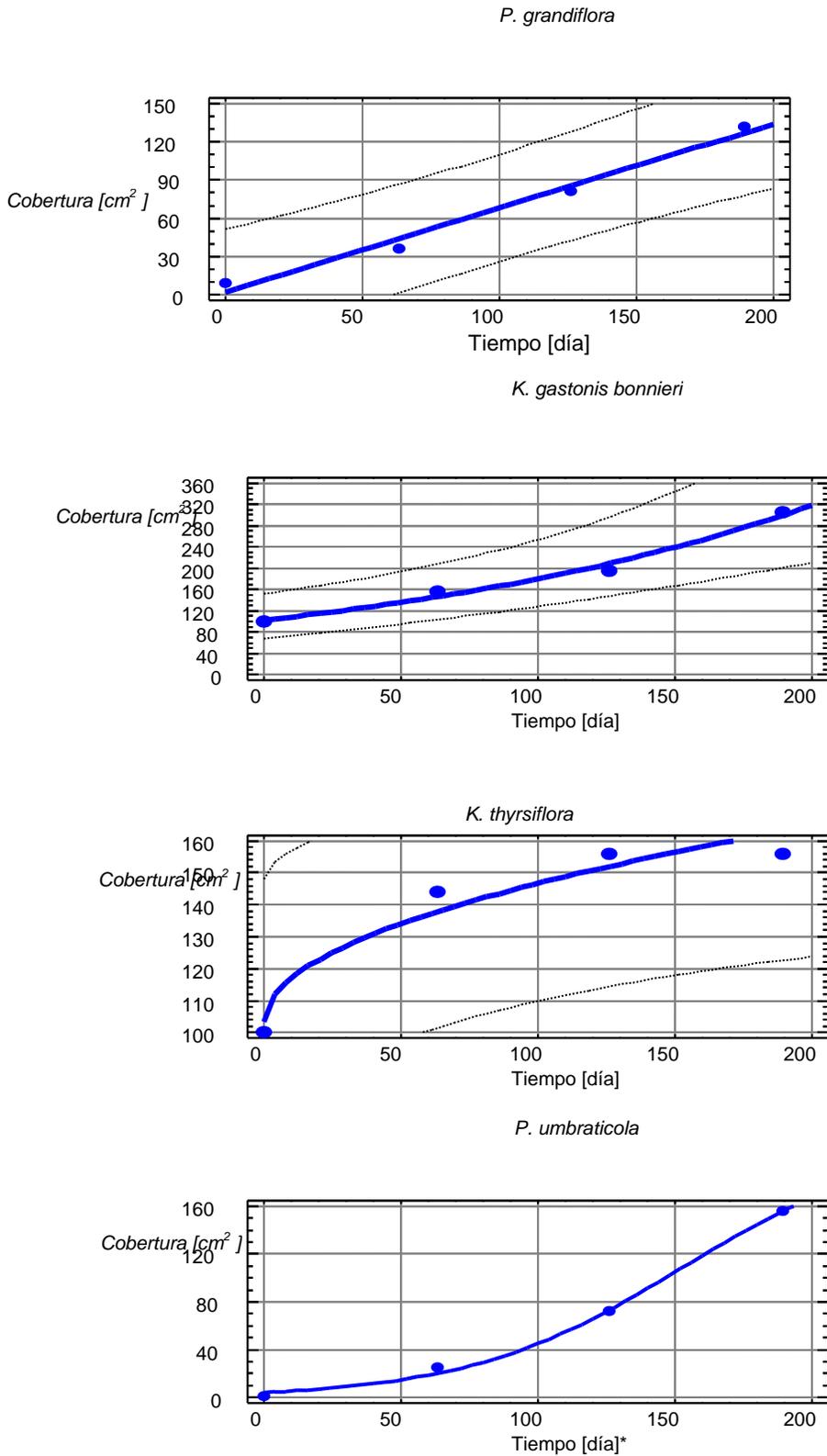


Figura 7. Gráficos de ajuste de las coberturas observadas (puntos) y predichas (línea central gruesa) por los modelos lineal, ecuación 1 (*P. grandiflora*); exponencial, ecuación 2 (*K. gastonis bonnieri*); raíz cuadrada de X, ecuación 3 (*K. thyrsiflora*) y logístico, ecuación 4 (*P. umbraticola*).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cantor S. L. (2006). *Green Roofs in Sustainable Landscape Design*. Ed. W. W. Norton.
- Dunnett N., Kingsbury N. (2010). *Planting Green Roofs and Living Walls*. Ed. Timber Press Inc.
- Durhman A. K., Rowe D. B., Rugh C. L. (2007), *Effect of substrate Depth on Initial Growth, Coverage, and Survival of 25 Succulent Green Roof Plant Taxa*, Horticultural Science, volume 42, número 3.
- Kohler M., Schmidt M., Wilhelm F., Laar M., Assunção Paiva V. L., Tavares S., (2002) *Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics*, Environmental Management and Health, Vol. 13 Iss: 4, pp.382 – 391
- Kohler M. (2006). *Long-Term Vegetation Research on Two Extensive Green Roofs in Berlin*, Urban Habitats, volumen 4, número 1, ISSN 1541-7115
- Lang S. B. (2010). *Green Roofs As An Urban Stormwater Best Management Practice For Water Quantity And Quality in Florida And Virginia*, a Dissertation presented to the Graduate School of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy University of Florida.
- Luckett K. (2009). *Green Roof Construction and Maintenance*. Ed. McGraw Hill.
- Mentens J., Raes D., Hermy M., (2006) *Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century*. Landscape and Urban Planning, volume 77 número 3.
- Monterusso M. A., Rowe D. B., Rugh C. L. (2005), *Establishment and Persistence Of Sedum spp. And Native Taxa for Green Roof Applications*, Horticultural Science, volumen 40, número 2.
- Osmundson T. (1999). *Roof Gardens History, Design and Construction*. Ed. W. W. Norton & Company.
- Seber G. A., F and C.J. Wild C. J. (1989). *Nonlinear Regression*. John Wiley and Sons. USA. 768 pp.
- Sen A., M.Srivastava (1990). *Regression analysis: Theory, methods and applications*. Ed. Springer. USA. 348 pp.
- Snodgrass C., Snodgrass L. (2006), *Green Roof Plants: A Resource and Planting Guide*, Ed. Timber Press.
- VanWoert N. D., Rowe D.B., Andresen J. A., Rugh C. L. y Xiao L (2005), *Watering Regime and Green roof Substrate Design Affect Sedum Plant Growth*, Horticultural Science, volumen 40, número 3.
- Weiler S. K., Scholz-Barth K. (2009). *Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design and Construction of Building Over Structure*, Ed. Wiley.
- Wonga N. H., Chena Y., Ong C. L. Siab A. (2003) Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. Building and Environment, volúmen 38, número 2.

Este documento debe citarse como: Ordóñez-López E. E., Zetina-Moguel C., Pérez-Cortés M., (2012). **Sobrevivencia y cobertura de plantas en techos verdes durante el estiaje en Yucatán**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 16-2, pp 93-107, ISSN 1665-529-X.