



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
COORDINACIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



DISEÑO AGRONÓMICO Y ESTRUCTURAL DE UN PROTOTIPO DE
INVERNADERO DE BAMBÚ

Por:

Mauricio Jesús Romero Méndez

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Producción Agropecuaria



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA
COORDINACIÓN DE POSGRADO
MAESTRÍA EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA



DISEÑO AGRONÓMICO Y ESTRUCTURAL DE UN PROTOTIPO DE
INVERNADERO DE BAMBÚ

Por:

Mauricio Jesús Romero Méndez

Tesis presentada como requisito parcial para obtener el grado de
Maestro en Producción Agropecuaria

ASESORES

Dr. Juan Carlos Rodríguez Ortiz

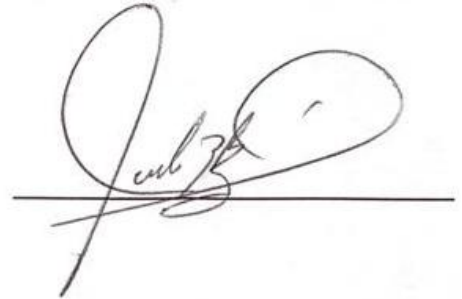
Dr. Federico Villarreal Guerrero

Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui

La presente tesis titulada “**DISEÑO AGRONÓMICO Y ESTRUCTURAL DE UN PROTOTIPO DE INVERNADERO DE BAMBÚ**” fue realizada por el C. Ing. Mauricio Jesús Romero Méndez como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Producción Agropecuaria y fue revisada y aprobada por el suscrito Comité de Tesis:

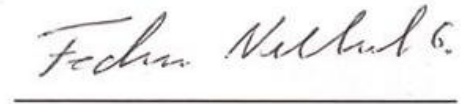
Dr. Juan Carlos Rodríguez Ortiz

Asesor principal

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Juan Carlos Rodríguez Ortiz', written over a horizontal line.

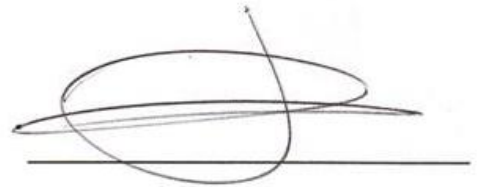
Dr. Federico Villarreal Guerrero

Asesor

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Federico Villarreal Guerrero', written over a horizontal line.

Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui

Asesor

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Jorge Alonso Alcalá Jáuregui', written over a horizontal line.

Ejido Palma de la Cruz, Municipio Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., a los 17 días del mes de diciembre de 2013.

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme alcanzar este logro y guiarme en todo momento.

A mi esposa por su amor incondicional, apoyo, compañía y confianza.

A mis hijas, por ser la motivación de mi vida.

A mis padres por su sacrificio, ejemplo y amor.

A mis hermanos que me han acompañado en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado que me permitió concluir mis estudios.

A los directivos y personal del Centro de Investigación y Estudios de Posgrado de la Facultad de Agronomía y Veterinaria, por el apoyo y facilidades prestadas.

Al Dr. Juan Carlos Rodríguez Ortiz, Director de Tesis, por sus consejos y su paciencia, y por el esfuerzo y dedicación en el asesoramiento del presente trabajo.

Al Dr. Federico Villareal Guerrero por su valiosa asesoría y colaboración.

Al Dr. Jorge Alonso Alcalá Jáuregui por sus observaciones y sugerencias.

Al Ing. Isidoro Lara Compeán por el valioso esfuerzo que compartimos a lo largo del presente trabajo.

CONTENIDO

	Página
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
CONTENIDO.....	v
ÍNDICE DE CUADROS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
SUMMARY	x
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	2
Hipótesis	3
REVISIÓN DE LITERATURA	4
Agricultura Protegida	4
Definición y relevancia.....	4
Tipos de invernaderos.....	5
Diseño de invernaderos.....	5
Diseño agronómico.....	5
Diseño estructural.....	6
Modelos a escala.....	7
Generalidades del Bambú.....	8
Importancia como material estructural.....	8
Ventajas.....	9
Desventajas.....	9
Aspectos ambientales del uso del bambú.....	9
Cambio climático.....	9
Secuestro de carbono.....	10
Beneficios ambientales del uso del bambú.....	10
MATERIALES Y MÉTODOS.....	12
Primera Etapa.....	12

Preparación y montaje de las probetas.....	13
Diseño experimental.....	16
Segunda Etapa.....	16
Diseño agronómico.....	16
Diseño estructural.....	16
Diseño de la cimentación.....	17
Modelo a escala.....	17
Tercera Etapa.....	18
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
Primera Etapa.....	20
Compresión.....	20
Flexión.....	22
Tensión.....	23
Densidad.....	25
Segunda Etapa.....	28
Diseño agronómico.....	28
Diseño estructural.....	28
Marco estructural básico.....	28
Diseño de cimentaciones.....	35
Tercera Etapa.....	36
Beneficio ambiental del uso de bambú.....	36
CONCLUSIONES.....	39
LITERATURA CITADA.....	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Nombre	Pág
1	Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de compresión (kg cm^{-2}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas.....	21
2	Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de flexión (kg cm^{-2}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas.....	23
3	Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de tensión (kg cm^{-2}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas.....	24
4	Valores obtenidos de densidades (g cm^{-3}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas.....	26
5	Criterios adoptados para el diseño agronómico.....	29
6	Memoria de cálculo de CO_2 secuestrado en la biomasa de bambú estructural.....	37
7	Memoria de cálculo de emisiones de CO_2 liberado a la atmósfera durante la producción de acero.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1 Tipos de invernaderos.....	6
2 Montaje de probetas para la prueba mecánica de compresión.....	13
3 Montaje de probetas para las prueba mecánica de flexión.....	14
4 Montaje de probetas para las prueba mecánica de tensión.....	15
5 a) Preparación de probetas para determinación de densidad y (b) medición de densidad por el método de desplazamiento de agua	15
6 Maqueta de carrizo (<i>Phragmites australis</i>) a escala 1:5.....	19
7 Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de compresión (Tukey, 0.05).....	21
8 Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de compresión (Tukey, 0.05).....	22
9 Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de flexión (Tukey, 0.05).....	23
10 Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de flexión (Tukey, 0.05).....	24
11 Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de tensión (Tukey, 0.05).....	25
12 Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de tensión (Tukey, 0.05).....	25
13 Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de densidad (Tukey, 0.05).....	27
14 Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de densidad (Tukey, 0.05).....	27
15 Marco estructural básico del invernadero analizado con el software Staad-Pro	30
16 Detalle del marco estructural básico.....	31
17 Modelo completo del prototipo de invernadero de bambú.....	32
18 Unión central de los marcos. a) Vista frontal de la unión central del marco. b) Vista superior de la unión del marco.....	33
19 Detalle de las uniones en armaduras del techo.....	34
20 Ubicación de las zapatas.....	35
21 Detalle del diseño de las zapatas.....	36

RESUMEN

El uso del bambú en sustitución del acero en la construcción de invernaderos puede aportar ventajas tales como reducir el alto costo de los materiales y el impacto sobre el medio ambiente. Para el presente estudio, se plantearon tres etapas para cada uno de los siguientes objetivos: 1. Determinar las principales propiedades mecánicas y físicas de cuatro variedades de bambú: *Bambusa vulgaris var. striata*, *Bambusa vulgaris "verde"*, *Bambusa oldhamii* y *Gigantochloa verticillata* colectadas en la región Huasteca de San Luis Potosí, para seleccionar las más idóneas y utilizar esta información en el diseño estructural de invernaderos. 2. Proponer el diseño agronómico y estructural de un prototipo de invernadero con estructura de bambú para la zona altiplano de San Luis Potosí, y 3. Estimar las ventajas ambientales del uso del bambú en la construcción de invernaderos a través de la fijación de CO₂ atmosférico en su biomasa. En la primera etapa, se estudiaron las siguientes propiedades mecánicas y físicas: resistencia a compresión, flexión y tensión, densidad y contenido de humedad. Se realizó un análisis estadístico como arreglo factorial, donde se consideró como factor "A", las cuatro variedades y como factor "B", las tres secciones de los culmos, y comparación de medias por medio de la prueba de tukey (nivel de confianza 5%). Los valores medios fueron de 827.08, 1,388.36 y 901.22 kg cm⁻² de resistencia a compresión, flexión y tensión, respectivamente y no se observaron diferencias significativas entre las variedades. En la segunda etapa, para el diseño agronómico, se consultó la literatura especializada para determinar las características deseables de un invernadero para zonas áridas extremas, y para el diseño estructural se apoyo en el software Staad-Pro, para verificar su resistencia mecánica y estabilidad frente a fuerzas extremas. Se concluyó con un prototipo de tipo capilla a dos aguas con medidas de 9 m de ancho por 15 m de fondo, y 135 m² de superficie, altura cenital de 4.5 m y de 3 m en las canaletas y ventanas laterales. En la etapa tres, se estimó la ventaja ambiental del uso del bambú en la construcción de este invernadero a través de la fijación de CO₂ atmosférico en su biomasa en una cantidad de 463.8 kg de CO₂, además de evitar una emisión a la atmósfera de 1147.5 kg de CO₂ por no utilizar el acero.

SUMMARY

The use of bamboo instead of steel in the greenhouse construction can provide benefits such as reducing the high cost of materials and the impact on the environment. For this study, three stages for each of the following objectives were performed:

- 1.-Determine the mechanical and physical properties of four varieties of bamboo: *Bambusa vulgaris striata* , *Bambusa vulgaris* " green " and *Bambusa oldhamii Gigantochloa verticillata* collected in the Huasteca region of San Luis Potosí, to select the most suitable and use this information in the structural design of greenhouses.
- 2.- Propose the agronomic and structural design of a greenhouse prototype with a structure of bamboo for the area of the Altiplano region of San Luis Potosi, and
3. Estimate the environmental advantages of the use of bamboo in greenhouse construction by fixing atmospheric CO₂ into biomass. In the first stage, the following mechanical and physical properties were studied: compression, bending and tension resistances, density and moisture content. A statistical analysis was performed as factorial, where the four varieties were considered as factor "A", and factor "B" included the three sections of the culms, and comparison of means by Tukey test (level 5 %). Mean values were 827.08, 1,388.36 and 901.22 kg cm⁻² compression, bending and tension resistances, respectively and no significant differences between the strains were observed. In the second stage, for the agronomic design, the literature was consulted to determine the desirable characteristics of a greenhouse for arid regions with extreme conditions. For the structural design, the Software Staad-Pro was used to verify the bamboo's mechanical strength and stability against extreme forces. The stage was concluded on a prototype with properties including a gable roof and dimensions of 9 by 15 feet (135 m²), 4.5 m of height from ground to the ridge and 3 m from ground to the gutters and side windows. In step three, the environmental benefit of using bamboo to build this greenhouse was estimated. The fixation of atmospheric CO₂ into biomass was calculated as 463.8 kg of CO₂. Moreover, the construction of this greenhouse prevented the emission into the atmosphere of 1147.5 kg of CO₂ from the steel industry.

INTRODUCCIÓN

La creciente demanda mundial de alimentos y la necesidad de conservar los recursos naturales, obliga a la comunidad científica y tecnológica a buscar estrategias de producción agrícola sustentable; esto es, económicamente redituable, socialmente justa y ambientalmente respetuosa.

La producción en invernadero representa una sólida estrategia que ha comprobado ser altamente productiva alrededor del mundo, con producciones muy por encima de lo logrado en campo abierto y más segura frente a los siniestros meteorológicos. Sin embargo, su elevado costo representa una limitante para su implementación por parte de productores de bajos recursos, quienes representan el 82% de los productores del país (Villa-Issa, 2011) y 6,737,884 de personas que se ocupan en el sector primario (agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal, pesca y caza) (INEGI, 2013). Se estima que el costo de un invernadero de tecnología media en México es de alrededor de \$250 pesos m⁻² (\$25,000,000 ha⁻¹) (SAGARPA, 2010), inversión inicial que no es posible cubrir por este núcleo de productores, quienes se resignan a continuar con sus sistemas de producción tradicionales, la mayoría de ellos poco productivos y sujetos a l condiciones meteorológicas extremas en ciertos periodos del año.

Por otro lado, el principal material estructural utilizado en invernaderos, el acero, tiene dos inconvenientes serios para poder ser usado por los productores señalados, estos son: 1) su precio, el cual ha alcanzado máximos históricos en los últimos años y representa el 80 % de la inversión total de un invernadero (Moreno *et al.*, 2011); y 2) ambiental, se estima que por cada tonelada de acero producido se emite a la atmósfera en promedio 1.7 toneladas de CO₂, el cual es uno de los principales gases de invernadero, además se atribuye a la industria del hierro y del acero ser responsable de un 4-5% del total de las emisiones mundiales de CO₂ (World Steel Association, 2008).

Como una alternativa al uso del acero, como material estructural en invernaderos, se tiene a los culmos de las plantas de bambú, debido a que han demostrado alrededor del mundo cualidades requeridas para estos fines, como son: alta relación resistencia/peso (Ubolsook y Thepa, 2011). Además, su cultivo propicia beneficios ambientales como la conservación del suelo, control de la erosión, regulación del caudal

hídrico, aportación de materia orgánica, contribución a la biodiversidad y rápido crecimiento, además de que es una de las especies vegetales con mayor tasa de secuestro de CO₂ en el mundo (Villegas, 2003). Castañeda-Mendoza *et al.* (2005) estimaron la acumulación media anual de carbono en una plantación de bambú en 12.98 ton ha⁻¹, con 50% de concentración de carbono en tejido vegetal. En cuanto a la inversión inicial en la construcción de invernaderos, se han reportado costos de hasta el 10 % en comparación con el valor convencional de una estructura metálica (INBAR, 2008).

Otra ventaja importante es su disponibilidad de manera permanente a través de su cultivo. En el estado de San Luis Potosí, México, se cultivan diversas especies de bambú en la zona tropical conocida como Huasteca Potosina, donde presentan una excelente adaptación generando plantas con culmos que llegan a alcanzar más de 16 m de altura y 5 a 10 cm de grosor. A pesar de haber sido introducidas desde hace más de 10 años, aún no se conocen sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales son necesarias para el diseño estructural y agronómico de un invernadero.

Para contar con invernaderos funcionales, y que provean las condiciones apropiadas para la producción vegetal, es necesario partir de un adecuado diseño, que considere en conjunto los requisitos agronómicos y estructurales.

El diseño agronómico de un invernadero se entiende como la definición de las características que debe tener una estructura de invernadero para optimizar el ambiente del cultivo que se desarrollará en su interior, en función del clima exterior, a fin de obtener el mayor rendimiento y calidad de los cultivos, a la vez que se busca la mayor rentabilidad posible, relacionado con el diseño funcional de los mismos.

Por otro lado, el diseño estructural comprende los cálculos para la correcta estimación de las posibles cargas debidas a el propio peso de la estructura, de la cubierta, y las eventuales sobrecargas debidas al viento, nieve y en su caso las sobrecargas interiores derivadas del sistema de cultivo y, para conseguir que las estructuras resistan sus efectos (Bernat, 1987).

Objetivos

1. Determinar las principales propiedades mecánicas y físicas de cuatro variedades de bambú: *Bambusa vulgaris* var. *striata*, *Bambusa vulgaris* "verde", *Bambusa oldhamii* y

Gigantochloa verticillata colectadas en la región Huasteca de San Luis Potosí, con el fin de seleccionar las más idóneas y utilizar esta información en el diseño estructural de invernaderos.

2. Proponer el diseño agronómico y estructural de un prototipo de invernadero con estructura de bambú para la zona altiplano de San Luis Potosí.

3. Estimar la ventaja ambiental del uso del bambú en la construcción de invernaderos a través de la fijación de CO₂ atmosférico en su biomasa.

Hipótesis

El tallo de bambú posee propiedades físicas y mecánicas que le dan una alta resistencia a fuerzas de compresión, tensión y flexión, y por lo tanto, es técnicamente factible utilizarlo como un material estructural alternativo al acero para el diseño con criterios agronómico y estructural de un invernadero para la producción de hortalizas.

REVISIÓN DE LITERATURA

Agricultura Protegida

El cultivo protegido es un sistema agrícola especializado en el cual se lleva a cabo un cierto control del medio edafoclimático alterando sus condiciones (suelo, temperatura, radiación solar, viento, humedad y composición atmosférica); mediante estas técnicas de protección se cultivan plantas modificando su entorno natural para prolongar el período de recolección, alterar los ciclos convencionales, aumentar los rendimientos y mejorar su calidad, estabilizar las producciones y disponer de productos cuando la producción al aire libre se encuentra limitada (Castilla, 2007).

Definición y relevancia

El conjunto de técnicas y sistema de producción permiten modificar el ambiente natural en el que se desarrollan los diferentes cultivos, y en base a estas alcanzar un óptimo crecimiento y desarrollo vegetativo de las plantas, lograr rendimientos elevados, fruta de alta calidad, producciones fuera de temporada, algo que es imposible de lograr en cultivos tradicionales, aunado con el alto riesgo de plagas y enfermedades, así como problemas de clima, suelo y cultura de cada región.

La eficiencia y la funcionalidad son las dos características principales que deben tener los invernaderos. Por eficiencia se entiende la idoneidad para condicionar alguno de los principales elementos del clima, no de manera estática o incontrolable, sino entre límites bien determinados de acuerdo con las exigencias fisiológicas del cultivo. La funcionalidad es el conjunto de requisitos que permiten la mejor utilización del invernadero (Jiménez, 2011; Matallana y Montero, 1995).

Por otro lado, la globalización, los tratados de libre comercio las demandas fitosanitarias y de inocuidad en los productos alimenticios que se están imponiendo por parte de los consumidores de hortalizas frescas, están limitando considerablemente la producción tradicional de estos cultivos, forzando esto a nuevas alternativas de producción como lo es la “agricultura protegida y sustentable”.

Los cultivos protegidos son tecnologías agrarias modernas y promisorias que permiten extender los calendarios de cosecha de las hortalizas tradicionales, y aseguran

su suministro fresco a la población y el turismo, inclusive en los períodos en que la oferta de la producción proveniente del campo abierto resulta en extremo limitada (Jiménez, 2011; Casanova *et al.*, 2003).

Un invernadero facilita la manipulación de algunos parámetros físicos, como son temperatura de aire y del suelo, humedad relativa, porcentaje de CO₂ en el ambiente, iluminación, etc., en las condiciones optimas para el desarrollo de las plantas que se cultivan en su interior o al menos en condiciones ventajosas respecto al ambiente exterior. Estos parámetros físicos juegan un papel dominante y no son dependientes entre sí: cuando se modifica uno, los otros pueden verse afectados (Castellanos, 2009).

Tipos de invernaderos

Hay diversas clasificaciones de los tipos de invernaderos (Figura 1). Atendiendo a su forma arquitectónica se distinguen dos formas básicas: invernadero unimodular o monocapilla, constituido por un invernadero aislado de otras estructuras y, el invernadero multimodular o multicapilla, formado por una serie de invernaderos unidos, en disposición de módulos paralelos asociados. Atendiendo a la geometría de cubierta hay numerosas variantes; las cubiertas de sección curva adoptan forma semicircular, semielíptica o de ojiva (arco gótico) entre otras. El empleo de madera en las estructuras, restringe el empleo de geometrías curvas, por la dificultad de su construcción (Castilla, 2007).

Diseño de invernaderos

El problema del diseño, estriba en dar forma a una estructura que cumpla una determinada función con un grado de seguridad razonable y que en las condiciones normales de servicio tenga un comportamiento adecuado y además, que su costo se mantenga dentro del límite aceptable. (Jiménez, 1999). Para este objetivo, es necesario conciliar dos aspectos fundamentales del diseño: el agronómico y el estructural.

Diseño agronómico

El objetivo del diseño agronómico de invernaderos es definir los materiales de cubierta, el tamaño, la forma, la orientación y otras características que estos deben tener

en la localidad donde se pretendan establecer, para lograr las mejores condiciones ambientales para el crecimiento y desarrollo de los cultivos que crezcan en su interior, pero buscando el mayor nivel de rentabilidad económica posible. El diseño agronómico de invernaderos es específico para cada caso y para cada localidad, pero se pueden hacer aproximaciones preliminares de diseño para un cierto cultivo en localidades representativas de climas específicos (Sánchez del Castillo, 2007).

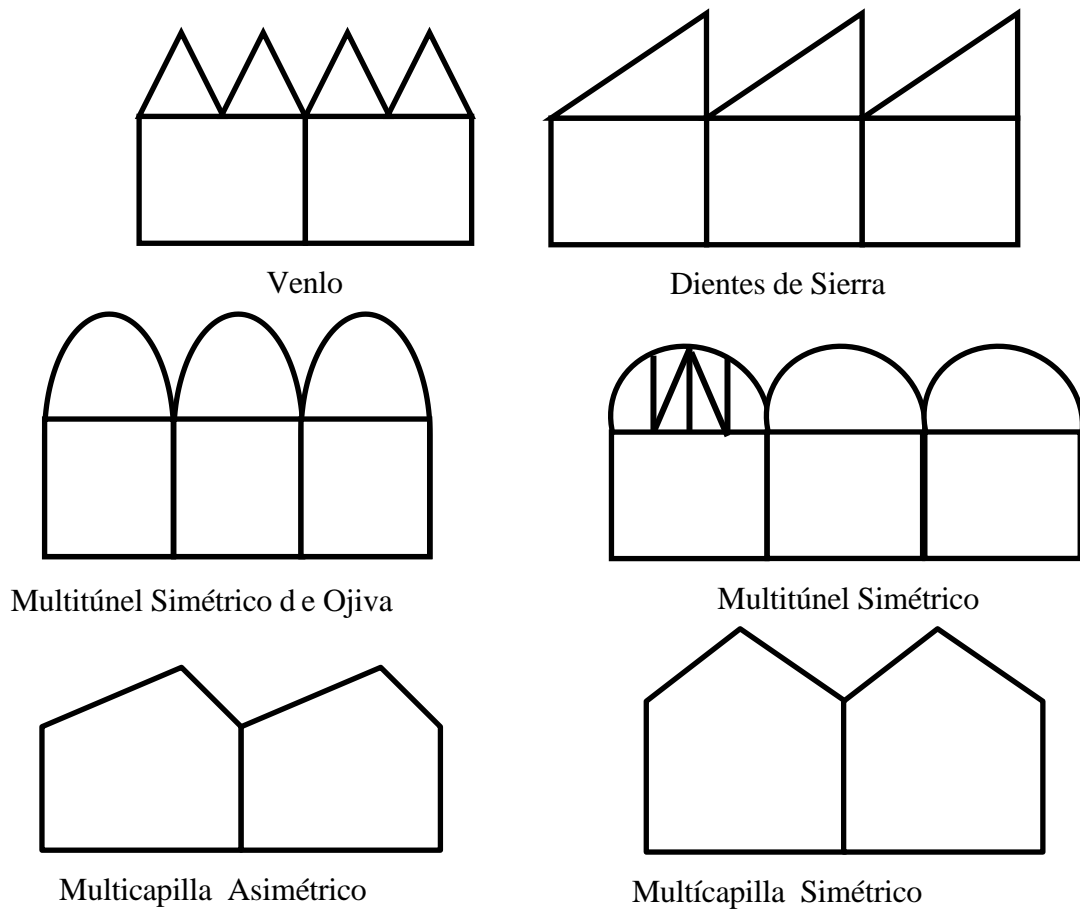


Figura 1. Tipos de invernaderos.

Diseño estructural

El diseño estructural según la NMX-E-255-CNCP-2008 es el proceso a seguir para el diseño de invernaderos con cubiertas plásticas, así como los principios generales, requisitos de resistencia mecánica, estabilidad, estado de servicio y durabilidad para el

proyecto y la construcción de estructuras de invernaderos con cubiertas de películas plásticas, para la producción agropecuaria.

Para el diseño de toda estructura, es necesario considerar todas las cargas o acciones que se suponen van a actuar sobre ella durante su vida útil, para situarla dentro de un margen de seguridad. En la determinación de la magnitud de estas acciones, se presenta cierto grado de incertidumbre, principalmente en las acciones variables y accidentales, por lo que en el mejor caso la magnitud es aproximada (Jiménez, 1999).

Todo invernadero y cada una de sus partes deben diseñarse para cumplir con los requisitos básicos siguientes: tener seguridad adecuada contra la aparición de todo estado límite de falla posible ante las combinaciones de acciones más desfavorables que puedan presentarse durante su vida útil y, no rebasar los estados límites de servicio ante combinaciones de acciones que corresponden a condiciones normales de operación (NMX-E-255-CNCP-2008).

Los requerimientos mínimos de análisis, se deberán realizar mediante procesos de análisis estructurales de tipo electrónico (por ejemplo: SAP 2000, STAAD PRO o similares) de acuerdo a los métodos de elementos finitos, los cuales se encuentran establecidos en la literatura de análisis estructural (NMX-E-255-CNCP-2008).

De acuerdo a la Norma Mexicana para el diseño de estructuras para invernaderos (NMX-E-255-CNCP-2008), los aspectos relevantes a considerar en las estructuras son los materiales utilizados. Estos deben ser económicos, ligeros, resistentes y esbeltos, que formen estructuras poco voluminosas a fin de evitar sombras sobre las plantas, ser de fácil mantenimiento y conservación, modificables y adaptables. Por tanto, debe procurarse que en la adquisición de estos materiales se cumplan las especificaciones de fabricación mencionadas en las normas, para cumplir con las especificaciones mínimas de un buen diseño, resistencia mecánica, estabilidad y durabilidad, incluyendo las cimentaciones.

Modelos a escala

También se considera como un método de diseño aquel en el que no se lleva a cabo un análisis estructural en gabinete para llegar al dimensionamiento. Mediante este

método, se construye una estructura a escala natural para comprobar si su comportamiento ante las cargas que actúen sobre ella es satisfactorio (Jiménez, 1999).

Generalidades del Bambú

De las 1,250 especies de bambúes en el Mundo, alrededor de 450, una tercera parte, son originarias de América (Gib, 2005). En México existen 8 géneros y 36 especies nativas de bambúes leñosos (Cortes, 2007).

En México, también se han introducido cerca de 30 especies (Cedeño e Irigoyen, 2011). *Bambusa vulgaris* y *Bambusa oldhamii* fueron plantadas en México en 1940; la primera es la especie introducida más extendida en el territorio y es cultivada en dos de sus diversas variedades: *B. vulgaris* var. *striata* y el llamado *B. vulgaris* “verde” (Cortés, 2005). *Bambusa vulgaris*, es la principal especie introducida y la tercera en área de distribución en México, se muestra hacia las llanuras costeras y montañas de la porción sur y sureste del país, con puntos aislados en la Sierra de Jalisco y Sierra Plegada de Tamaulipas y Nuevo León (Rodríguez y Galicia, 2005). La *B. oldhamii* es probablemente nativo del sur de China, que no crece silvestre encontrado sólo bajo cultivo en México, puede alcanzar dimensiones de 55 pies y cinco pulgadas de diámetro cuando madura; los culmos tienen un color verde profundo y soporta temperaturas bajas (Cedeño e Irigoyen, 2011).

Importancia como material estructural

El uso del bambú en México se encuentra restringido principalmente a la fabricación de muebles y construcciones rurales cercanas a las zonas donde crece esta especie. La distribución geográfica de los bambúes se presenta básicamente en las regiones tropicales y los estados con el mayor número de especies en nuestro país son Chiapas, Veracruz y Tabasco, las cuales fueron introducidas de Asia y Sudamérica (Ordóñez-Candelaria, 1999).

Ubolsook y Thepa (2011) utilizaron los siguientes valores de propiedades físicas y mecánicas del bambú *Dendrocalamus asper* para el diseño de estructuras de invernaderos en Tailandia: contenido de humedad: menor a 15%; resistencia a la flexión: 1,399 kg cm⁻², compresión: 734.19 kg cm⁻² y tensión: 3202 kg cm⁻².

Ventajas

Es uno de los materiales usados desde la más remota antigüedad por el hombre para aumentar su comodidad y bienestar. En el mundo de plástico y acero de hoy, el bambú continúa aportando su centenaria contribución y aun crece en importancia. Gran parte de la humanidad utiliza a diario el bambú debido a que se representa como una alternativa ante materiales más costosos y tal vez a un futuro su utilización sea de forma masiva (Rodríguez, 2006).

Desventajas

Es un material de crecimiento muy rápido pero solo se puede empezar a explotar después de 3 a 5 años de que se a sembrado. Si no se le da un tratamiento previa a cualquier tipo de construcción tiende a tener una vida útil en promedio de 5 años y/o puede tender pandearse (Rodríguez, 2006).

Aspectos Ambientales del Uso del Bambú

Cambio climático

La concentración de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera se incrementó de 285 ppm al final del siglo XIX, antes de la revolución industrial, a alrededor de 366 ppm en 1998 como consecuencia de las emisiones antropogénicas de carbono (C) hacia la atmósfera. El incremento en la atmósfera de estos llamados gases de invernadero se reconoce ahora como un factor que contribuye al cambio climático y al calentamiento global, los cuales tendrán efectos importantes en el siglo XXI, si bien todavía inciertos, son de esperar serios efectos negativos (IPCC, 2001 citado por FAO, 2002).

Esto condujo en 1997 a un acuerdo internacional en Kyoto (el Protocolo de Kyoto), a través del cual la mayoría de los países fueron convocados a reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmósfera (FAO, 2002). El Protocolo de Kyoto reconoce que las emisiones netas de carbono pueden ser reducidas ya sea disminuyendo la tasa a la cual se emiten a la atmósfera los gases de invernadero o incrementando la

tasa por la cual esos gases son retirados de la atmósfera gracias a los sumideros (FAO, 2002).

Secuestro de carbono

La reforestación, sobre todo en los suelos degradados con bajo contenido de materia orgánica, será una forma importante de secuestro de carbono a largo plazo, tanto en la biomasa como en el suelo. Cualquier acción tomada para secuestrar el carbono en la biomasa y los suelos, incrementaría el contenido de materia orgánica de estos últimos, con incrementos en la fertilidad, productividad de la tierra para la obtención y seguridad de alimentos, así como prevención de la degradación del suelo, lo cual, a su vez, tendría un impacto positivo sobre el medio ambiente, la agricultura y la biodiversidad de los ecosistemas. Por tanto, estas podrían constituir situaciones en las que todos salen ganando (FAO, 2002).

Beneficios ambientales del uso del bambú

El bambú es una de las plantas productoras de biomasa que crecen más rápido; es una de las plantas con mayor capacidad fotosintética, con fotosíntesis tipo C4 (Gib, 2005). Se estima que una hectárea de bambú captura 40 % más de bióxido de carbono que una hectárea de coníferas o eucaliptos en 10 ó 14 años (González, 2007 citado por Lárraga-Sánchez *et al.*, 2011). Crece tres veces más rápido que los eucaliptos y se puede cosechar constantemente a partir del quinto año por un periodo de 80-120 años, lo que no es común en especies maderables (Kibwage *et al.*, 2008 citados por Lárraga-Sánchez *et al.*, 2011).

Las plantaciones de bambú abren la posibilidad de integrar a los pequeños propietarios de las comunidades rurales en la creación de micro-industrias, con tecnologías de bajo costo para la producción de bioenergía en rotaciones cortas, ayudando a mitigar el calentamiento global mediante el secuestro de carbono atmosférico (Dagilis y Trucke, 1998; Ganapathy *et al.*, 1999; Lobovikov *et al.*, 2009, citados por Castañeda-Mendoza *et al.*, 2012). Las especies de bambú, especialmente la *Bambusa oldhamii*, son de crecimiento rápido, con alta productividad, y se pueden usar para plantaciones en algunas zonas tropicales de México, ya sea en proyectos de captura

de carbono o biomasa y de bio-energía. Castañeda-Mendoza *et al.* (2012) estimaron que la biomasa total aérea en una plantación de *Bambusa oldhamii*, después de ocho años de estudio era de 144.36 ton ha⁻¹, y considerando la cosecha anual de culmos de cuatro años de edad, la biomasa aérea en pie era de 117.28 Mg ha⁻¹.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se realizó en tres etapas de acuerdo a los objetivos planteados.

Primera Etapa

Consistió en determinar las propiedades físicas y mecánicas de cuatro especies de bambú, que son necesarias para el diseño estructural de un invernadero.

Se seleccionaron cuatro variedades de plantas de bambú cultivados en la zona huasteca del estado de San Luis Potosí, México: *Bambusa oldhamii*, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa vulgaris* var *striata* y *Gigantochloa verticillata*. El lugar de la colecta pertenece al campo agrícola experimental del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el municipio de Huehuetlán, San Luis Potosí, México, ubicado a 21° 28' 43" de latitud norte y 98° 58' 30" de longitud oeste con una altitud de 92 msnm. En la clasificación de Köppen el clima es denominado Cfga (clima templado húmedo sin estación seca, temperatura media anual de 23°C y precipitación anual de 1800 mm) (Pineda, 2005). Los materiales vegetales fueron establecidos hace 10 años provenientes del estado de Veracruz, México.

Se colectaron tres culmos por planta de entre 3 y 4 años de edad, con alturas de más de 12 m y grosores de entre 5 y 9.6 cm. Los culmos se cortaron a los primeros seis metros a partir de la base, la parte apical fue desechada por considerarse aún inmaduros. Los culmos de seis metros fueron divididos en tres secciones de tamaños iguales: basal, media y superior. Se dejaron secar a la sombra y temperatura ambiente hasta peso constante.

Las propiedades físicas y mecánicas que se estudiaron fueron: humedad, densidad, compresión, flexibilidad y tensión. Estas son necesarias para el diseño de estructuras, como los invernaderos, y por carecer de una norma específica de construcción con bambú en México, se tomó como referencia la norma técnica Colombiana, NTC 5525 2007 "Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth.", del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, que se basa en la norma ISO 22157 (2004) "Bamboo: Determination of physical and mechanical properties".

Cada una de las pruebas mecánicas y físicas se realizaron en tres ocasiones en tres diferentes niveles de los culmos seleccionados (sección baja, media y alta) de las cuatro variedades para un total de 36 mediciones por cada propiedad (unidades experimentales). Las pruebas mecánicas se practicaron en el laboratorio de mecánica de suelos y materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Las propiedades físicas se realizaron en el Laboratorio de Suelos de Facultad de Agronomía y Veterinaria de la misma Universidad.

Preparación y montaje de las probetas

Los ensayos de compresión (Figura 2) se llevaron a cabo en una la prensa marca AUTOMAX 5 y los de flexión y de tensión en una máquina de ensayo universal marca Forney (Figuras 2, 3 y 4).

Las probetas para la prueba de resistencia a la compresión se prepararon acorde a la mencionada norma NTC 5525 2007 colombiana, sin nudos, con una longitud igual al diámetro externo y sus extremos con superficies planas y en ángulo recto respecto a la longitud. La probeta se colocó en forma tal que el centro del cabezal de la prensa se ubicó en el centro de la sección transversal de la probeta (Figura 2).

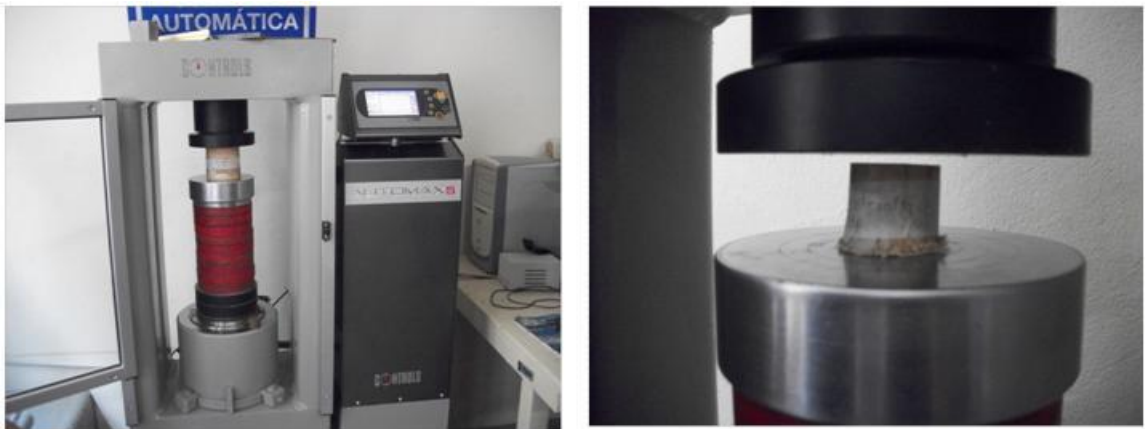


Figura 2. Montaje de probetas para la prueba mecánica de compresión

Las probetas para las pruebas de resistencia a la flexión se montaron con una longitud entre los centros de los apoyos de 30 veces el diámetro exterior, con un número variable de nudos por probeta. El montaje de los culmos para flexión fue en cuatro puntos, aplicando la carga de los centros de las monturas del dispositivo de carga en dos puntos

en el tercio medio de la distancia entre los apoyos, como se muestra en la Figura 3. Para evitar en lo posible el aplastamiento del culmo, se utilizaron para los apoyos placas y soporte metálicos de 15 cm de largo.



Figura 3. Montaje de probetas para la prueba mecánica de flexión.

Las probetas para las pruebas de resistencia a la tensión paralela a las fibras se prepararon con una longitud total de 60 cm, en cuya parte media, se dejó una porción de ensayo de una sección transversal rectangular con dimensiones de 2.5 cm de ancho y 10 cm de longitud independientemente del espesor de la pared. Para el montaje de las probetas en la máquina de ensayo se estableció una distancia entre los sujetadores de los extremos de 30 cm (Figura 4).



Figura 4. Montaje de probetas para la prueba mecánica de tensión

Las probetas para la determinación del contenido de humedad se prepararon inmediatamente después de los ensayos mecánicos en igual número que el de unidades experimentales; la forma de la probeta fue prismática, con anchura aproximada de 2.5 cm y altura de 2.5 cm y con espesor igual al espesor de la pared. La determinación de humedad se realizó mediante el pesaje de la pérdida de masa de la probeta de ensayo durante el secado hasta una masa constante, expresada como un porcentaje de la masa de la probeta de ensayo después del secado a 103°C durante 24 horas.



(a)

(b)

Figura 5. (a) Preparación de probetas para determinación de densidad y (b) medición de densidad por el método de desplazamiento de agua.

Para la determinación de la densidad (masa/volumen), se utilizaron las probetas preparadas en la determinación del contenido de humedad mediante las mediciones de la masa y el volumen anhidro por inmersión de cada una (Figura 5).

Diseño experimental

Se realizó análisis estadístico como arreglo factorial, donde se consideró como factor “A” a las cuatro variedades y como factor “B” a las tres secciones de los culmos. La comparación de medias se realizó por medio de la técnica de Tukey con un nivel de confianza de 5%. Ambas pruebas se realizaron con el software "Paquete de Diseños Experimentales FAUANL Versión 2.5" (Olivares, 1994).

Segunda Etapa

Consistió en diseñar un prototipo de invernadero con material de bambú de 135 m² con base en la consulta bibliográfica y en los resultados de las pruebas físicas y mecánicas.

Diseño agronómico

Para el diseño agronómico se consultó la literatura especializada para determinar las características deseables de un invernadero para zonas áridas. Se recurrió a autores de reconocido prestigio en la producción de invernadero a nivel nacional y se complementó con autores extranjeros. Estos fueron: Castellanos (2009); Sánchez del Castillo (2007); Castellanos (2004); Matallana y Montero (1995). Las características a definir en el diseño agronómico del invernadero: forma, altura, ventilación, acción del viento, cargas vivas y muertas por tutoreo, características de la cubierta, barrera física para plagas

Diseño estructural

Con base en las condiciones agronómicas deseables definidas en el punto anterior, se plantearon propuestas de “marcos estructurales básicos” que favorecieran dichas condiciones. Estos modelos se capturaron en el software Staad-Pro, con la información de sus diferentes elementos estructurales, su disposición y sus medidas, así como los valores de resistencias físicas y mecánicas del bambú, la velocidad de diseño del viento

y otras fuerzas y acciones que actúan sobre las estructuras. Con este software se simuló el comportamiento de las estructuras ante condiciones extremas y se calcularon los esfuerzos máximos en diferentes puntos críticos de la estructura para verificar que estos se encontraran en los márgenes de seguridad. Finalmente se eligió el mejor modelo por su simplicidad y estabilidad estructural.

STAAD Pro es el software comercial para el análisis estructural en tres dimensiones diseñado con una arquitectura abierta para el análisis estático, dinámico de estructuras de concreto, acero, aluminio, madera, en puentes, edificios, torres, estadios, etc. Fue desarrollado por la empresa “Research Engineer International” y ha evolucionado por más de 20 años. En 2005 “Research Engineer International” fue adquirida por la empresa “Bentley Systems”. STAAD Pro es el único programa de análisis y diseño estructural cuyo desarrollador cumple con todos los estrictos requisitos de la NUPIC/NRC (Comisión Regulatoria Nuclear) y tiene los reglamentos de construcción de la mayoría de los países incluyendo EE.UU., Gran Bretaña, Canadá, Australia, Francia, Alemania, España, Noruega, Finlandia, Suiza, India, China, Zona Euro, Japón, Dinamarca, México y Holanda (Bentley Systems, 2013).

Diseño de la cimentación

Se basó en el “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal” (GDF, 2004), el cual especifica la resistencia de diseño ante estados límite de falla y factores de resistencia especificados, para que tanto la estructura como su cimentación resistan las fuerzas cortantes, momentos torsionantes de entrepiso y momentos de volteo inducidos por sismo combinados con los que correspondan a otras sollicitaciones, y afectados del correspondiente factor de carga.

Modelo a escala

Con el fin de diseñar las uniones a utilizar entre los elementos estructurales, de acuerdo a los tipos de uniones recomendadas en el “Manual de Construcción con Bambú Guadua” (Hidalgo, 1976), así como definir la ubicación y orden de su instalación, se construyó una maqueta del prototipo de invernadero diseñado en el paso previo, a escala 1:5. Se utilizaron para ello tallos de carrizo (*Phragmites australis*), ya que estos tienen

una morfología igual a la de los culmos del bambú. Se seleccionaron diámetros de tallos de carrizo respetando la escala señalada con los diámetros comunes de los culmos de bambú (Figura 6).

Tercera Etapa

Para cumplir con el objetivo número tres, se tomó como referencia el prototipo de invernadero diseñado en la segunda etapa, para calcular la cantidad de CO₂ que sería secuestrado en la biomasa de bambú a utilizar en su construcción.

La biomasa total de bambú utilizada se calculó de acuerdo a las dimensiones obtenidas en el plano final del prototipo; el carbono secuestrado se estimó considerando un contenido de carbono equivalente a 50% de la biomasa de bambú (Brown, 2002).

Así mismo, se estimaron las emisiones de CO₂ que se generarían durante el proceso de producción del acero a utilizar en la construcción de un invernadero convencional de dimensiones y características equivalentes a las del prototipo de bambú.



Figura 6.- Maqueta de carrizo (*Phragmites australis*) a escala 1:5

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Primera Etapa

En las figuras 7 a la 14 se presentan los gráficos de los análisis de varianza factorial obtenidos de las propiedades físicas y mecánicas.

Compresión

No se encontró diferencia significativa en las interacciones ni entre las variedades y los niveles de culmo (Figuras 7 y 8). El valor promedio más alto fue de 893.41 kg cm⁻² de la especie *B. oldhamii*, y el más bajo fue 794.74 kg cm⁻² de la especie *B. vulgaris* var *striata* (Cuadro 1). La información de compresión es importante en el diseño estructural del invernadero debido al esfuerzo constante del que estarán sujetos los culmos de las columnas por efecto del peso de la propia estructura, de las cargas muertas, y las cargas vivas. Las cargas muertas están representadas por los elementos que duran colgados de la estructura por un periodo mayor a 30 días (ej. el cultivo). Las cargas vivas corresponden a elementos que permanecen colgados de la estructura del invernadero por periodos menores a 30 días.

Xiaobo (2004) obtuvo resultados similares en pruebas de resistencia practicadas en bambú de la especie *Phyllostachys pubescens*, en las que el análisis de varianza mostró que no había diferencia significativa entre diferentes alturas de bambú en tensión máxima de compresión paralela a la dirección longitudinal, con promedio de 865.73 kg cm⁻² en culmos de 3 años.

Cuadro 1. Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de compresión (kg cm^{-2}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas.

Especie	Sección	Repetición			Promedio sección	Promedio especie
		1	2	3		
<i>Gigantochloa vert</i>	Inferior	982.25	724.26	815.71	840.74	
<i>Gigantochloa vert</i>	Media	897.38	867.45	807.46	857.43	781.19
<i>Gigantochloa vert</i>	Superior	593.46	836.95	505.76	645.39	
<i>B. vulgaris striata</i>	Inferior	658.41	877.14	638.40	724.65	
<i>B. vulgaris striata</i>	Media	749.75	937.63	786.78	824.72	794.74
<i>B. vulgaris striata</i>	Superior	843.92	843.29	817.36	834.86	
<i>B. oldhami</i>	Inferior	851.90	846.43	768.25	822.20	
<i>B. oldhamii</i>	Media	864.67	1,029.47	962.80	952.31	893.41
<i>B. oldhami</i>	Superior	906.00	867.86	943.33	905.73	
<i>B. vulgaris</i>	Inferior	780.01	769.57	754.47	768.02	
<i>B. vulgaris</i>	Media	891.95	1,063.22	782.09	912.42	838.96
<i>B. vulgaris</i>	Superior	955.54	726.44	827.40	836.46	

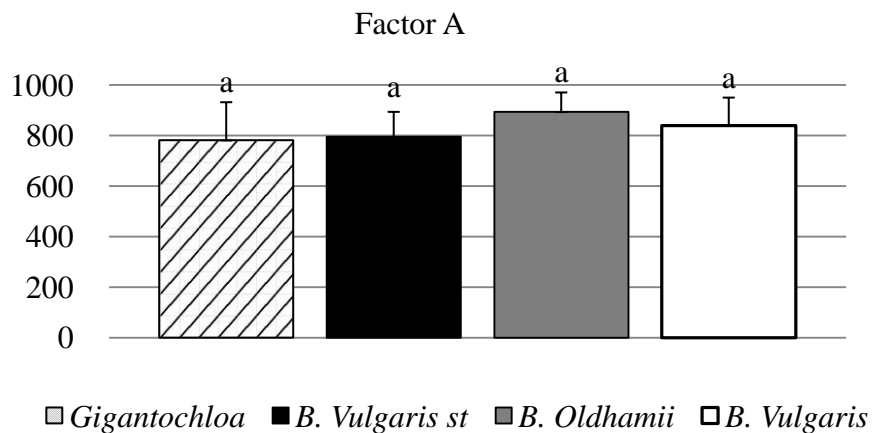


Figura 7. Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de compresión (Tukey, 0.05)

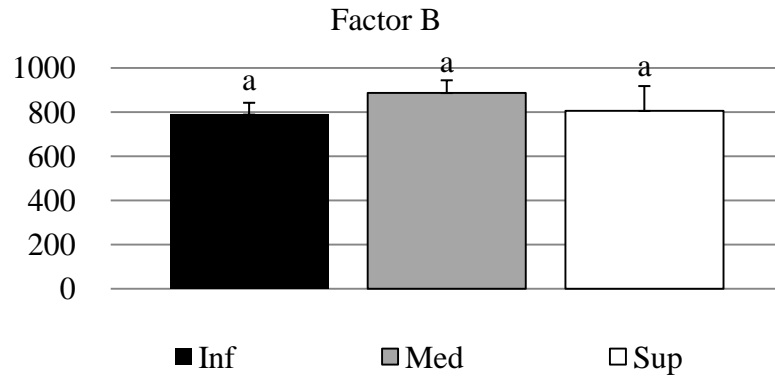


Figura 8. Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de compresión (Tukey, 0.05).

Flexión

No se encontró diferencia significativa en las interacciones ni entre las variedades (Figura 9). Las cuatro especies fueron estadísticamente iguales, con el valor promedio más alto de $1,450.03 \text{ Kg cm}^{-2}$ de la especie *Gigantochloa verticillata*, y el más bajo fue $1,241.35 \text{ kg cm}^{-2}$ de la especie *B. oldhamii* (Cuadro 2). En cuanto a la altura de las secciones se encontró que la flexión disminuye de forma significativa hacia la parte superior de los culmos (Figura 10). La información de flexión es útil en el diseño estructural del invernadero debido a que la fuerza más significativa que ejerce un esfuerzo sobre la estructura del invernadero es la debida al viento. Las columnas de las paredes, especialmente las que están de frente a la dirección dominante del viento, deben ser capaces de soportar la presión máxima, que bajo el escenario más adverso sea producida. Este tipo de presión ejerce un esfuerzo de flexión sobre las columnas. El distanciamiento entre columnas debe ser tal que la presión ejercida por el viento no sobrepase los esfuerzos permisibles del material utilizado como estructura del invernadero.

Xiaobo (2004) refiere resultados similares en el efecto de la ubicación de la muestra vertical a lo largo de la caña de bambú que no fue significativa sobre la resistencia a la flexión, con un promedio de $1574.4 \text{ kg cm}^{-2}$ en culmos de tres años de las *Phyllostachys pubescens*.

Cuadro 2. Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de flexión (kg cm^{-2}) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas

Especie	Sección	Repetición			Promedio sección	Promedio Especie
		1	2	3		
<i>Gigantochloa vert</i>	Inferior	2,037.08	2,241.34	1,639.47	1,972.63	
<i>Gigantochloa vert</i>	Media	1,643.19	1,131.26	1,807.38	1,527.28	1,450.03
<i>Gigantochloa vert</i>	Superior	1,223.35	699.27	627.91	850.17	
<i>B. vulgaris striata</i>	Inferior	2,056.05	1,689.78	1,887.97	1,877.93	
<i>B. vulgaris striata</i>	Media	1,851.84	1,525.32	1,148.46	1,508.54	1,435.44
<i>B. vulgaris striata</i>	Superior	957.83	744.09	1,057.63	919.85	
<i>B. oldhami</i>	Inferior	1,336.35	1,362.55	1,397.35	1,365.42	
<i>B. oldhami</i>	Media	1,265.17	1,229.53	1,787.41	1,427.37	1,241.35
<i>B. oldhami</i>	Superior	813.66	942.73	1,037.37	931.25	
<i>B. vulgaris</i>	Inferior	1,816.31	2,248.78	1,164.77	1,743.29	
<i>B. vulgaris</i>	Media	1,844.63	1,300.47	1,215.22	1,453.44	1,426.64
<i>B. vulgaris</i>	Superior	1,318.08	842.24	1,089.29	1,083.20	

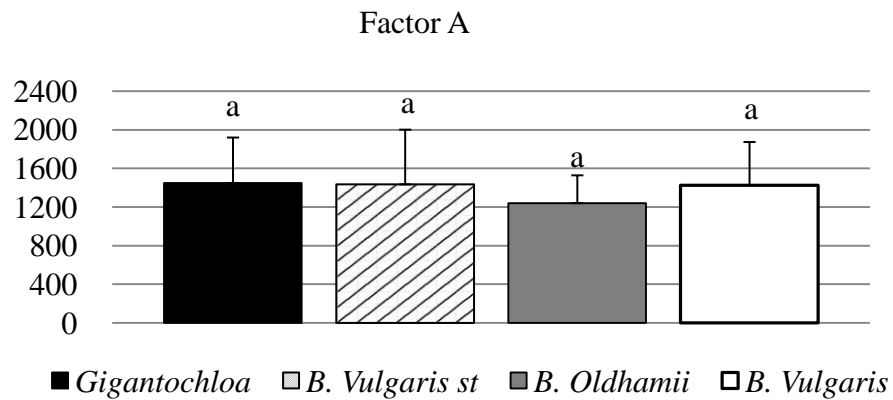


Figura 9. Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de flexión (Tukey, 0.05).

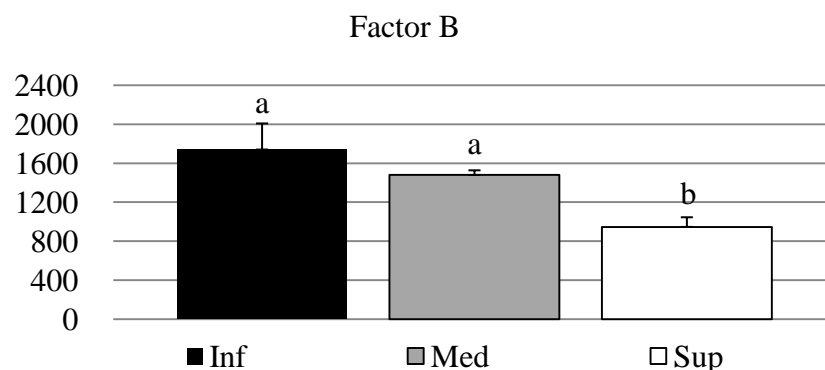


Figura 10. Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de flexión (Tukey, 0.05).

Tensión

No se encontró diferencia significativa en las interacciones ni entre las variedades y los niveles de culmo (Figuras 11 y 12). El valor promedio más alto fue de 1,014.06 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ de la especie *B. oldhamii* y el más bajo fue 779.20 $\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$ de la especie *B. vulgaris striata* (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores obtenidos de los esfuerzos últimos de tensión ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas

Especie	Sección	Repetición			Promedio sección	Promedio Especie
		1	2	3		
<i>Gigantochloa vert</i>	Inferior	865.94	1,073.71	982.45	974.03	
<i>Gigantochloa vert</i>	Media	869.00	868.12	870.27	869.13	926.10
<i>Gigantochloa vert</i>	Superior	792.74	1,097.14	915.51	935.13	
<i>B. vulgaris striata</i>	Inferior	555.44	838.58	1,326.00	906.68	
<i>B. vulgaris striata</i>	Media	879.10	551.02	850.81	760.31	779.20
<i>B. vulgaris striata</i>	Superior	598.31	984.00	429.52	670.61	
<i>B. oldhami</i>	Inferior	842.62	1,117.91	753.76	904.77	
<i>B. oldhami</i>	Media	826.02	1,295.56	1,446.84	1,189.47	1,014.06
<i>B. oldhami</i>	Superior	724.24	1,171.58	948.00	947.94	
<i>B. vulgaris</i>	Inferior	1,202.94	1,037.84	1,350.46	1,197.08	
<i>B. vulgaris</i>	Media	833.76	845.00	855.42	844.73	885.52
<i>B. vulgaris</i>	Superior	629.21	600.00	615.00	614.74	

La información de tensión será útil en el diseño del invernadero debido a que el viento, además de ejercer un esfuerzo de presión sobre las columnas del invernadero, también produce fuerzas de succión significativas. Es muy común que las paredes y los techos que no están frente a la dirección del viento predominante, estén sujetas a esfuerzos de succión.

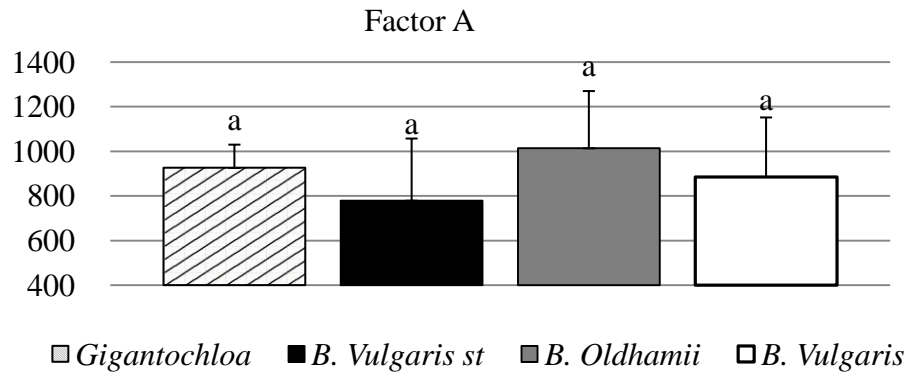


Figura 11. Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de tensión (Tukey, 0.05).

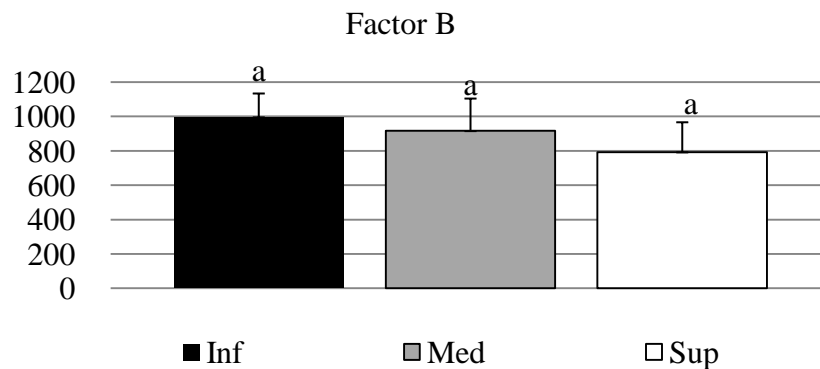


Figura 12. Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de tensión (Tukey, 0.05).

Densidad

Se encontró diferencia significativa entre las variedades (Figura 13) y alturas de culmo (Figura 14) y en interacciones. Las especies *Gigantochloa verticillata*, *B. vulgaris striata* y *B. oldhamii* fueron estadísticamente iguales entre ellas, los valores promedios

obtenidos fueron de 0.92, 0.84 y 0.83 g cm⁻³ respectivamente, mientras que *B. vulgaris* tuvo una densidad promedio de 0.76 g cm⁻³ (Cuadro 4). Entre secciones se obtuvo que la parte superior es más densa que la sección inferior, y éstas, a su vez iguales a la sección media. Los valores promedio obtenidos fueron 0.88, 0.85 y 0.78 g cm⁻³, respectivamente para las secciones alta, media y baja. Los valores de densidad serán útiles para monitorear a través del tiempo el estado estructural de los culmos, debido a su naturaleza orgánica, tiende a una descomposición y desgaste, el cual puede ser estimado mediante la determinación de esta propiedad y recurrir a reparar o sustituir en tiempo justo.

Cuadro 4. Valores obtenidos de densidades (g cm⁻³) en tres diferentes secciones de culmo de cada una de las especies estudiadas

Especie	Sección	Repetición			Promedio sección	Promedio especie
		1	2	3		
<i>Gigantochloa vert</i>	Inferior	0.84	0.93	0.93	0.90	0.92
<i>Gigantochloa vert</i>	Media	0.93	0.96	0.87	0.92	
<i>Gigantochloa vert</i>	Superior	0.98	0.95	0.90	0.94	
<i>B. vulgaris striata</i>	Inferior	0.85	0.88	0.66	0.80	0.84
<i>B. vulgaris striata</i>	Media	0.86	0.89	0.78	0.84	
<i>B. vulgaris striata</i>	Superior	0.96	0.97	0.73	0.88	
<i>B. oldhami</i>	Inferior	0.77	0.70	0.72	0.73	0.83
<i>B. oldhami</i>	Media	0.93	0.82	0.82	0.85	
<i>B. oldhami</i>	Superior	0.94	0.77	0.98	0.90	
<i>B. vulgaris</i>	Inferior	0.69	0.78	0.62	0.69	0.76
<i>B. vulgaris</i>	Media	0.82	0.85	0.69	0.78	
<i>B. vulgaris</i>	Superior	0.85	0.77	0.81	0.81	

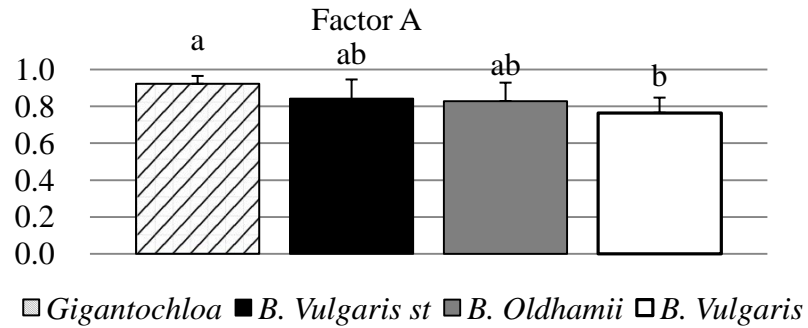


Figura 13. Comparación de medias de las cuatro variedades (factor A) en la prueba de densidad (Tukey, 0.05).

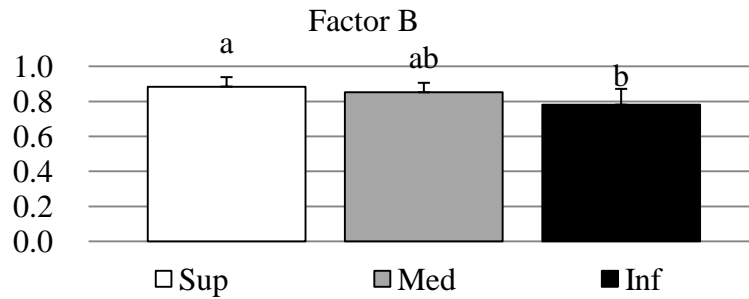


Figura 14. Comparación de medias de tres secciones de culmo (factor B) en la prueba de densidad (Tukey, 0.05).

Las cuatro variedades de bambú estudiadas, en general, muestran propiedades físicas y mecánicas similares, por lo que cualquiera de ellas puede ser considerada para el diseño y construcción de invernaderos indistintamente. Sin embargo, por la mayor abundancia de la especie *Bambusa oldhamii* en la zona de colecta, se tomaron los valores medios de sus propiedades para el cálculo estructural.

Segunda Etapa

Diseño agronómico

El Cuadro 5 muestra las características y especificaciones del diseño agronómico del prototipo de invernadero resultado de la revisión de la literatura para la zona del Altiplano de San Luis Potosí, con un clima árido extremoso.

Diseño estructural

Marco estructural básico

En las figuras 15 y 16 se presenta el diseño propuesto para el marco estructural básico, que integra las características y especificaciones que resultaron del diseño agronómico, mostrando una simulación, por medio del software Staad-Pro, de su comportamiento estructural con los esfuerzos en los puntos críticos. Cada marco está apoyado en cuatro columnas separadas a 3 m de distancia y cada una formada por dos culmos de bambú. Cada una de las tres secciones comprendidas entre dos columnas vecinas, se une en la parte superior mediante una armadura, como se muestra en las figuras. Con este software, se definió estructuralmente a continuación una separación entre los marcos estructurales básicos de 2.5 m.

Con este patrón de separaciones se puede extender en sentido longitudinal el tamaño de invernadero que se requiera, o en sentido transversal, agrupando dos o más estructuras, en este caso considerando un sistema de captación y evacuación del agua de drenaje en las juntas de las naves. Para el presente trabajo, se definió para la siguiente fase de construcción, un número total de 15 marcos básicos estructurales, de lo cual resulta una superficie del invernadero de 9 X 15 m (135 m²).

Cuadro 5. Criterios adoptados para el diseño agronómico.

Características	Resultados	Justificación
Orientación	Noroeste	Ventilación eficiente de acuerdo a la dirección predominante del viento de la zona (224.98°- SO). La transmisividad de la luz y su uniformidad dentro del invernadero son adecuadas para la latitud.
Forma	Capilla a dos aguas	La forma del bambú restringe el empleo de geometrías curvas en los techos. La forma de capilla permite una adecuada entrada de iluminación y el drenaje del agua de lluvia.
Inclinación del techo.	18.5°	La inclinación del techo permite la entrada de luz directa y difusa eficientemente. Es adecuada para el drenaje de lluvias intensas de la zona, de acuerdo a la longitud de la vertiente.
Altura	Altura a canaletas a 3 m. Altura máxima de 4.5 m	Con estas dimensiones se tienen un volumen de aire interior por cada m ² de invernadero de 3.75, el cual permite una adecuada estabilidad y régimen térmico y la circulación del aire interior. La altura máxima permite el crecimiento de los cultivos hortícolas de mayor altura.
Porcentaje de ventilación	Ventanas laterales cubren 25%	La ventilación es adecuada para el intercambio eficiente de aire.
Cargas: vivas y muertas	Resistencia a cargas por tutoreo de 25 kg m ⁻²	Permite el cultivo de hortalizas con necesidades de tutoreo desde la estructura
Material de la cubierta	Lámina de polietileno flexible transparente cal 720	Material de alta transmisividad de luz. Es económico y es factible la instalación sobre los culmos de bambú del perfil sujetador.
Barrera física contra insectos	Malla antiáfidos (26 X 40 filamentos por pulg ² , calibre 12 de filamento)	Es una barrera física permeable al aire que impide el paso de insectos como trips, áfidos, mosquita blanca, ninfas de gusano minador, pulgones, etc.,

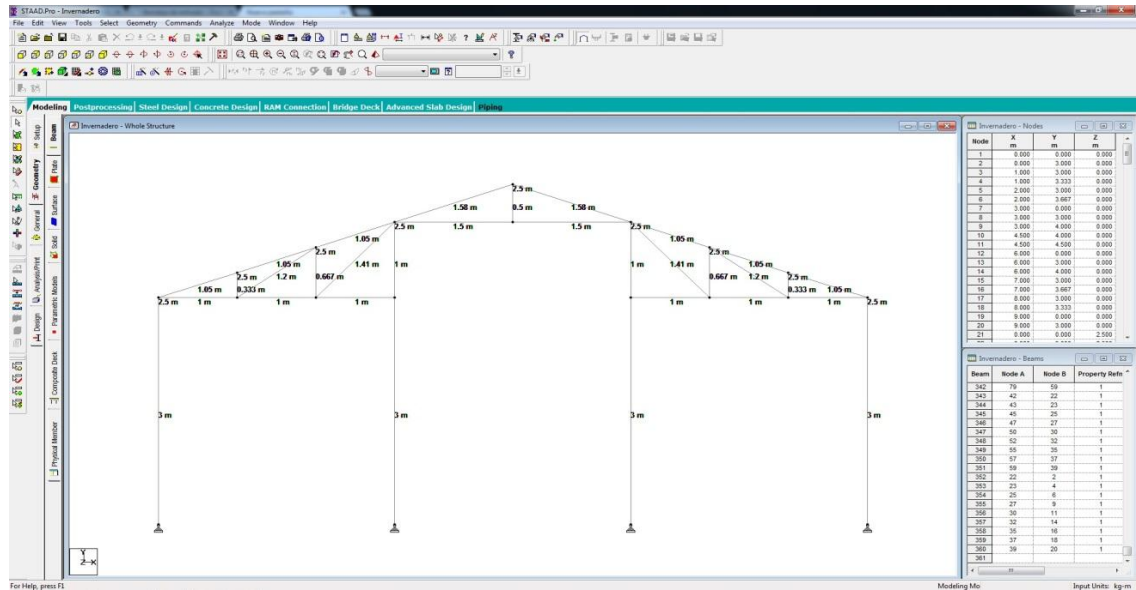


Figura 15. Marco estructural básico del invernadero analizado con el software Staad-Pro.

La Figura 17 muestra el prototipo completo (imagen generada en el software Staad Pro), con la disposición, medidas y ensamblaje general del total de marcos estructurales básicos. Los marcos estructurales básicos están apoyados en 4 columnas, cada una constituida por dos culmos de bambú. En el techo los marcos se unen con un total de 9 hileras de largueros. La estructura tiene una altura de 4.5 m en la parte cenital (Figura 18) y las paredes laterales de 3 m de altura, se cubren con ventanas móviles enrollables de hasta 2.2 m, y con de pantallas fijas de 0.8 m divididas en dos secciones (superior e inferior).

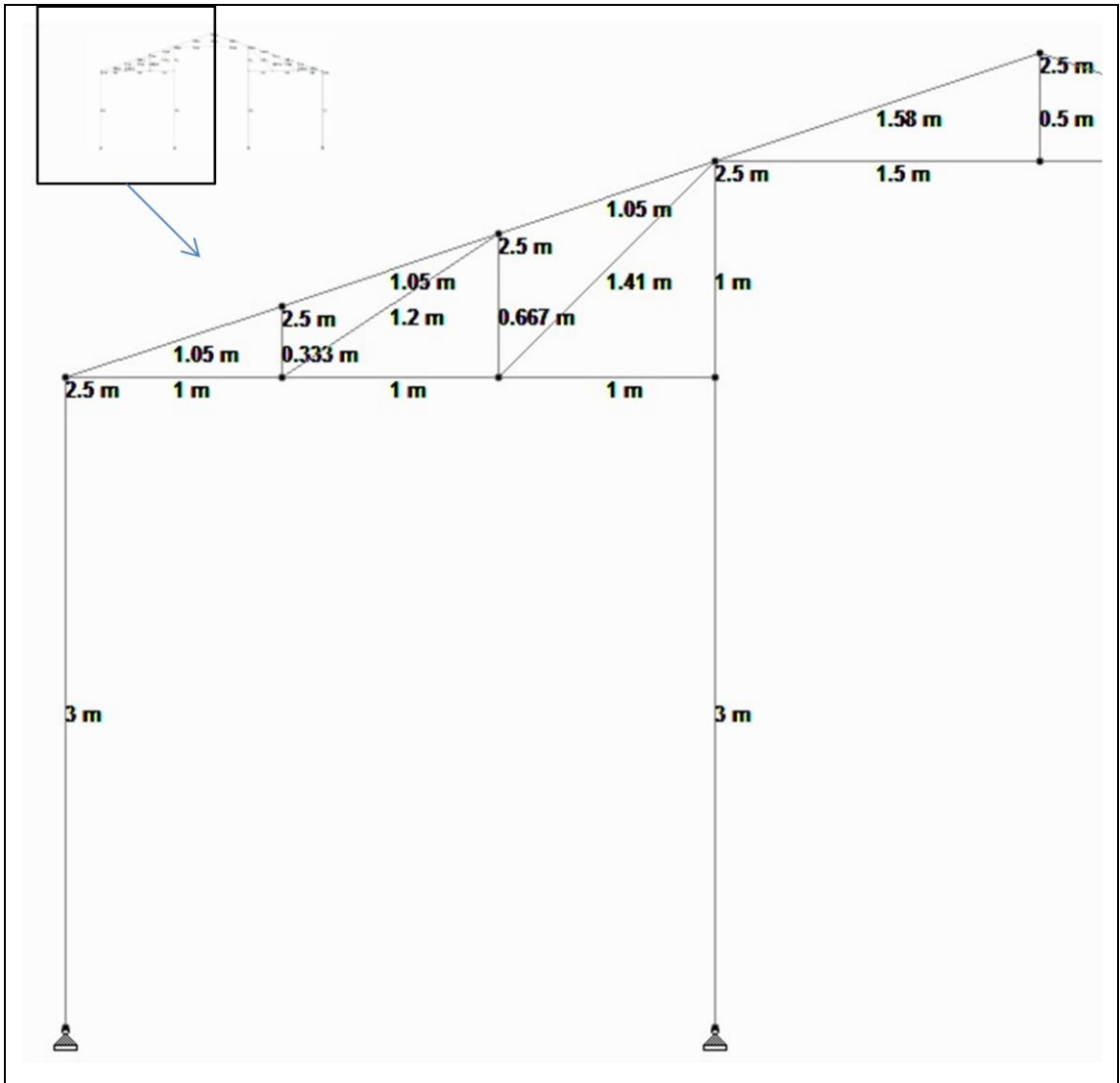


Figura 16. Detalle del marco estructural básico

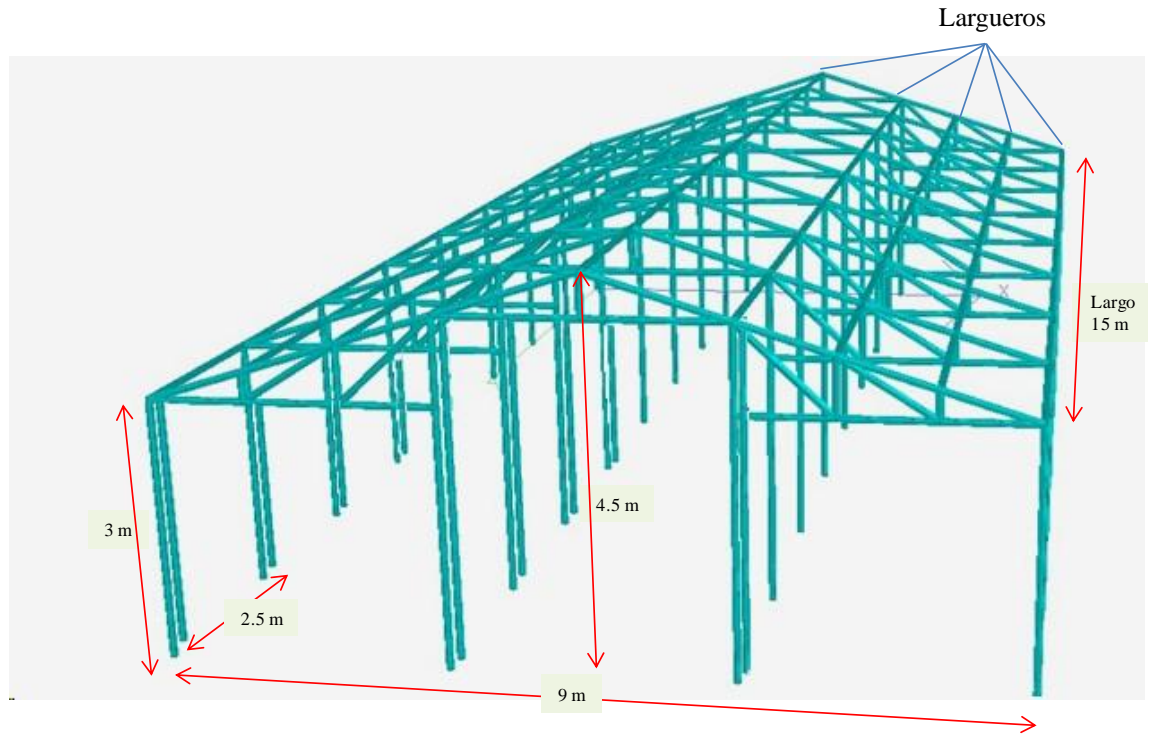


Figura 17. Modelo completo del prototipo de invernadero de bambú.

Las figuras ilustran los planos de las uniones diseñadas por medio del modelo a escala construido como parte del diseño estructural. Se utilizan segmentos de varilla roscada de 3/8" y tuercas y rondanas para los diferentes tipos de uniones de acuerdo a lo recomendado Hidalgo (1976).

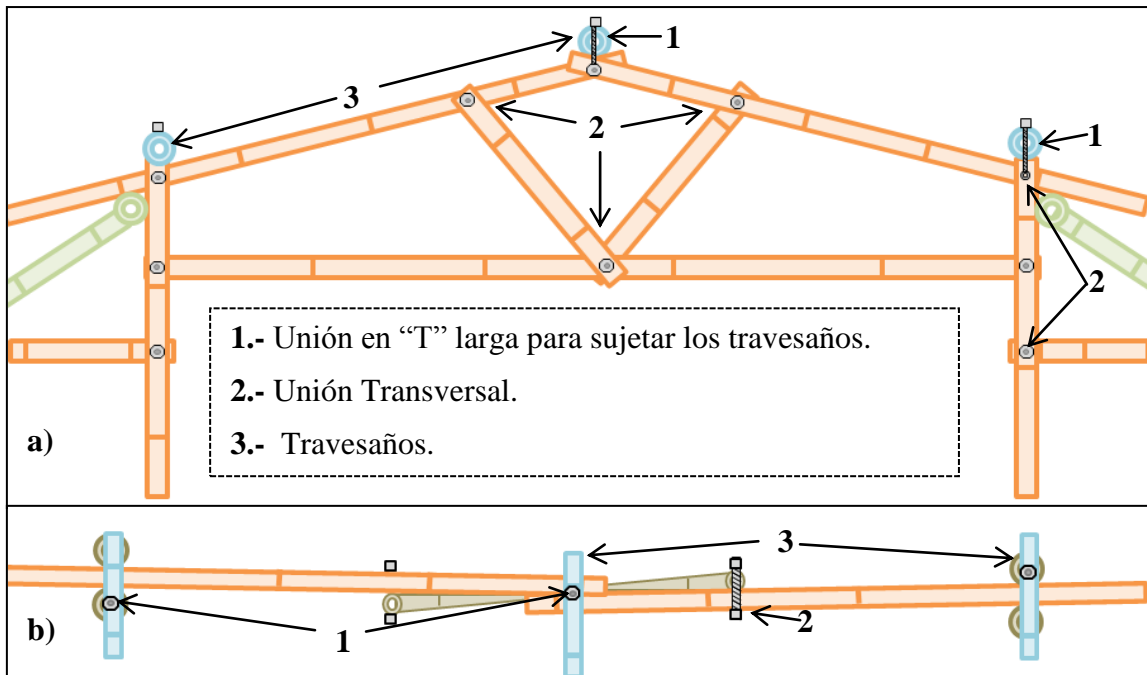


Figura 18. Unión central de los marcos. **a)** Vista frontal de la unión central del marco. **b)** Vista superior de la unión del marco.

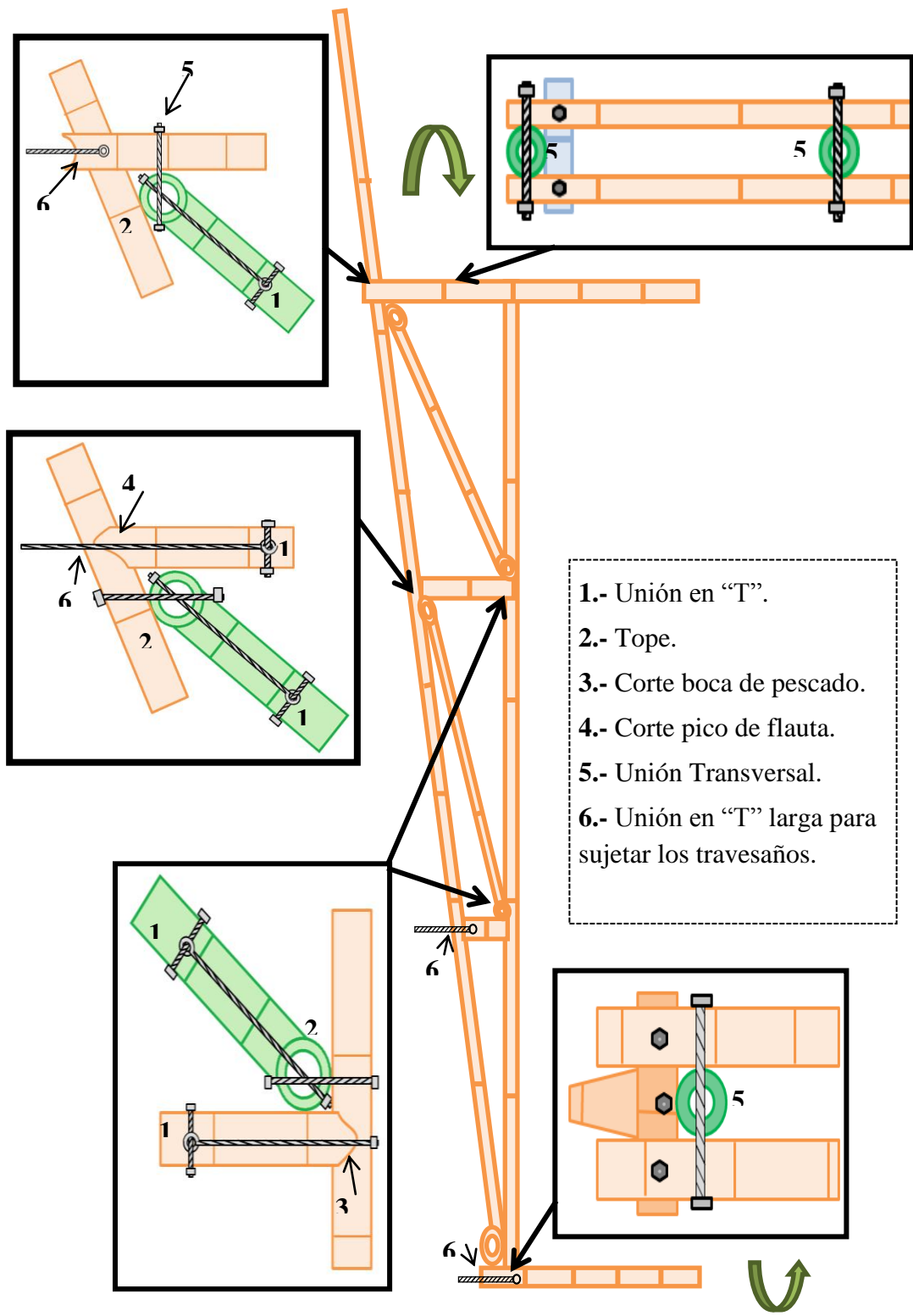


Figura 19.- Detalle de las uniones en armaduras del techo

Diseño de cimentaciones

La disposición de las zapatas para la cimentación del invernadero se muestra en la Figura 20, con un total de 28 elementos. La Figura 21 presenta el modelo de cimentación diseñado con base en el “Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal” (GDF, 2004), en el cual la profundidad de la cimentación de 55 cm, está calculada de acuerdo a la profundidad en la que se encontró material sólido del subsuelo en el que se planea la construcción del invernadero. En cada zapata, se proyecta colocar dos postes de bambú montados sobre una varilla del No 4 con un relleno de concreto para su fijación y sujeción.

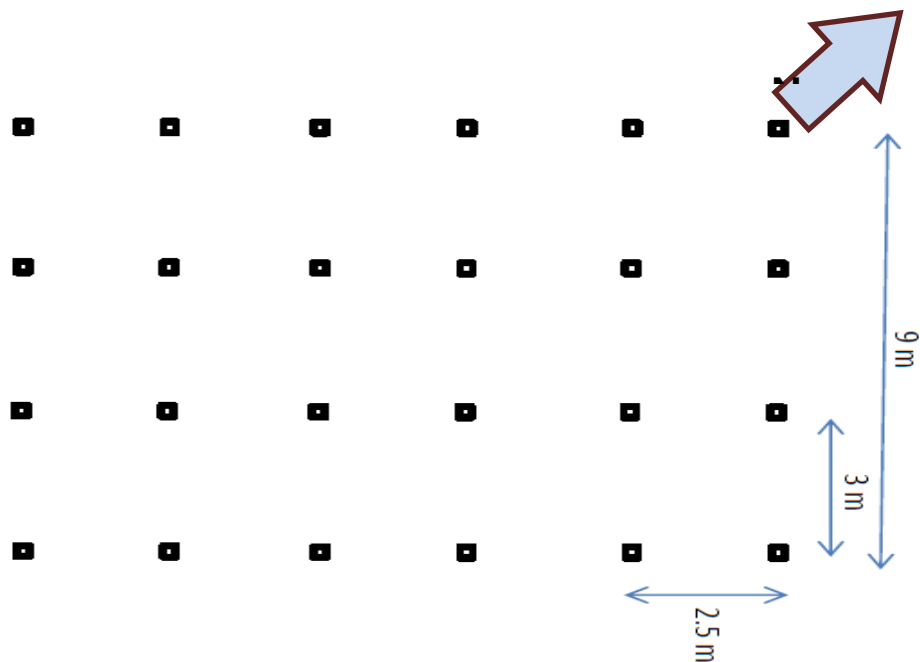


Figura 20.- Ubicación de las zapatas.

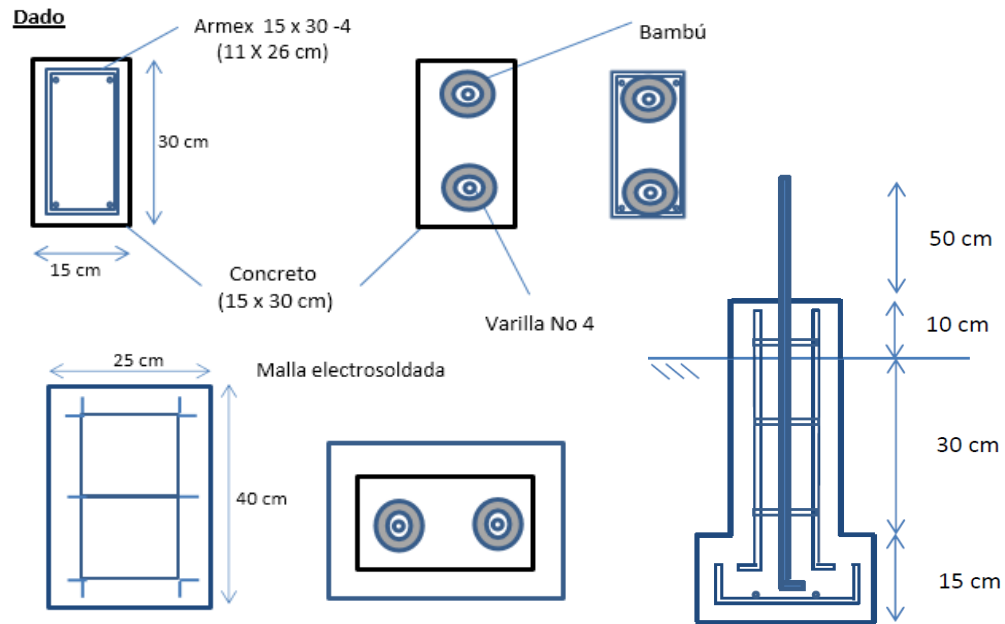


Figura 21. Detalle del diseño de las zapatas.

Tercera Etapa

Beneficio ambiental del uso de bambú

El cuadro 6 muestra el procedimiento empleado para el cálculo del carbono secuestrado en la biomasa de bambú, por medio del cual se determinó una cantidad de 463.8 Kg de CO₂. En el cuadro 7 se estiman en un total de 1147.5 kg las emisiones de CO₂, tomando la recomendación de la Norma Mexicana para el Diseño y Construcción de Invernaderos (NMX-E-255-CNCP, 2008) de cumplir que las estructuras de invernaderos tengan de 5 a 6 kg de acero por m² de invernadero.

Cuadro 6. Memoria de cálculo de CO₂ secuestrado en la biomasa de bambú estructural.

Concepto de cálculo	Resultado	
Promedio de diámetro exterior de los culmos (d)	6.5	cm
Promedio de espesor de la pared (t)	1.3	cm
Longitud total de culmos (L)	520	m
Área de sección transversal de los culmos (A):		
$A = (\pi/4) x [d^2 - (d - 2t)^2]$		
$A = (\pi/4) [(0.065 m)^2 - (0.065 m - 2 X 0.013 m)^2]$	0.002124	m ²
Volumen de bambú (V):	1.10	
$V = L \cdot A = (520 m)(0.0021 m)$		
Densidad media de muestras del tejido de bambú (D)	840	kg·m ⁻³
Biomasa de bambú (B):		
$B = V \cdot D = (1.1 m^3)(840 kg \cdot m^{-3})$	927.6	kg
Contenido de carbono en la biomasa de bambú (% C)	50	%
El carbono secuestrado en la biomasa de bambú:		
$C = (50)(927.64 kg)/100$	463.8	kg

Cuadro 7. Memoria de cálculo de emisiones de CO₂ liberado a la atmósfera durante la producción de acero.

Concepto de cálculo	Resultado	
Cantidad mínima de acero por m ² de invernadero	5	kg·m ⁻²
Dimensiones del invernadero	135	m ²
Cantidad de acero en un invernadero convencional de las mismas dimensiones = (5 kg·m ⁻²)(135 m ²)	675	kg
Emisiones de CO ₂ por cada tonelada de acero producido	1,700	kg CO ₂ / 1000 kg acero
Emisiones de CO ₂ para producir el acero de un invernadero convencional de las mismas dimensiones = (675kg)(1700 kg CO ₂)/1000 kg	1,147.5	kg CO ₂

Sumando la cantidad de CO₂ que se mantendría fijado en la biomasa de bambú estructural más la que se dejaría de arrojar a la atmósfera durante la producción de acero para una estructura equivalente, se puede estimar el beneficio ambiental de utilizar una estructura de bambú en sustitución de una de acero en 1,611.3 kg de CO₂.

Lo anterior, sin considerar otros beneficios ambientales no evaluados en este trabajo, tales como el CO₂ que queda fijado en el terreno en el que crece el bambú, cantidad que, según la FAO (2002), podría ser significativa, considerando que desde el punto de vista del secuestro de carbono, los árboles no solo almacenan carbono en su biomasa foliar, sino que contribuyen a la biomasa existente bajo el suelo por medio de sus sistemas radiculares y el aporte de residuos al suelo (ramas y hojas) y, de esta manera, los suelos se constituyen en el mayor reservorio de carbono del ciclo terrestre de este elemento.

CONCLUSIONES

Se determinaron las principales propiedades mecánicas y físicas de cuatro variedades de bambú: *Bambusa vulgaris* var. *striata*, *Bambusa vulgaris* "verde", *Bambusa oldhamii* y *Gigantochloa verticillata* colectadas en la región Huasteca de San Luis Potosí. Se obtuvo que estadísticamente fueron iguales en cuanto su capacidad de compresión, flexión, tensión, densidad tanto en la dimensión vertical y horizontal. Los valores medios fueron de 827.08, 1,388.36 y 901.22 kg cm⁻² de resistencia a compresión, flexión y tensión respectivamente.

Al encontrar propiedades físicas y mecánicas similares entre las cuatro especies, se opta por seleccionar a la especie *Bambusa oldhamii* como material estructural por la razón principal de su disponibilidad en la zona.

Se propone el diseño agronómico y estructural de un prototipo de invernadero de bambú para la zona Altiplano del estado de San Luis Potosí, el cual tiene las siguientes medidas: 135 m² de superficie, 9 m de ancho por 15 m de fondo, altura cenital de 4.5 m y de 3 metros en los laterales, con ventilación en laterales.

Se estimó la ventaja ambiental del uso del bambú en la construcción de invernaderos a través de la fijación de CO₂ atmosférico en su biomasa en una cantidad de 463.8 kg de CO₂, además de una emisión total de 1147.5 kg de CO₂ que se evitaría al no utilizar acero en la construcción, por lo que se puede estimar el beneficio ambiental de utilizar una estructura de bambú en sustitución de una de acero en 1,611.3 kg de CO₂

LITERATURA CITADA

- Bentley Systems, 2013. STAAD Pro V8i. Disponible en: <http://www.bentley.com/en-US/Products/STAAD.Pro/>. Fecha de consulta: 9 de febrero de 2013.
- Bernat, C. 1987. Invernaderos : construcción, manejo, rentabilidad. Ed. AEDOS. P. 71. España.
- Brown, S. 2002. Measuring, monitoring, and verification of carbon benefits for forest - based projects. Philosophical Transactions. The Royal Society. Lond. A (2002) doi: 10.1098/rsta.2002.1026.
- Casanova, A.; O. Gómez; M. Hernández; M. Chailloux; T. Depeestre; F. R. Pupo; J. C. Hernández; V. Moreno; M. León; A. Igarza; C. Duarte; I. Jiménez; R. Santos; A. Navarro; A. Marrero; H. Cardoza; F. Piñeiro; N. Arozarena y L. Vilarino, 2003, Manual para la producción protegida de hortalizas, Instituto de Investigaciones Hortícolas Liliana Dimitrova (IIHLD), Minag, Cuba.
- Castilla, N. 2007. Invernaderos de Plástico. Tecnología y Manejo. Ed. Mundi Prensa. 2a ed. 462 p. España.
- Castañeda-Mendoza, A. J.; A. Vargas-Hernández; J. Gómez-Guerrero; H. Valdez-Hernández y H. Vaquera-Huerta. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa Oldhamii* Agrociencia 2005, 39 (enero-febrero): Disponible en:<<http://148.215.2.10/articulo.oa?id=30239110>> ISSN 1405-3195. Fecha de consulta: 9 de julio de 2013.
- Castañeda-Mendoza, A.; J. J. Vargas-Hernández y A. Gómez-Guerrero. 2012. Components of net aerial primary production in a *Bambusa oldhamii* plantation. Agrociencia vol.46 no.1 México ene./feb. 2012. Disponible en: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952012000100006&script=sci_arttext. Fecha de consulta: 5-dic-2013.
- Castellanos, J. Z. 2004. Manual de producción hortícola en invernadero. 2da. Edición. Intagri. México.
- Castellanos, J. Z. 2009. Manual de producción de tomate en invernaderos. Ed. Intagri. México.
- Cedeño, A. y J. Irigoyen. 2011. El Bambú en México. Revista usjt. arq.urb . número 6 segundo semestre de 2011. Disponible en: http://www.usjt.br/arq.urb/numero_06/arqurb6_06_ponto_de_vista_03_alberto_cedeno.pdf. Fecha de consulta: 30 jun-2013.

- Cortés, G. R. 2005. Bambúes de México. Plantaciones Comerciales en México. Biobambú Revista Electrónica. Sociedad Mexicana del Bambú. Disponible en: <http://www.bambumex.org/paginas/COMERCIALES.pdf>. Fecha de consulta: 30 jun-2013.
- Cortés, G. R. 2007. Los Bambúes Nativos de México. Instituto Tecnológico de Chetumal, México, Disponible en: <http://www.bambumex.org/paginas/Los%20BambuesNativosbueno.pdf>. Fecha de consulta: 30 jun-2013"
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación), 2002. Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informes sobre recursos mundiales de suelos No 96. Roma, Italia.
- FAO (Organización de las Naciones Unidad para la Agricultura y la Alimentación), 2007. Secuestro de carbono en tierras áridas. Informes sobre recursos mundiales de suelos no 102. Roma, Italia.
- G.D.F. (Gobierno del Distrito Federal), 2004. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Disponible en: http://www.poi.ipn.mx/Documents/Normateca/reglamento/REGLAMENTO_DE_CONSTRUCCIONES_DISTRITO_FEDERAL.pdf. Fecha de consulta: 3-marzo-2013.
- Gib, C. 2005. El bambú: su importancia en la ecología y la conservación de las especies nativas. Primer congreso mexicano del bambú 8, 9 y 10 de diciembre del 2005 Xalapa de Enríquez, Veracruz de Ignacio de la Llave México. 112 p.
- Hidalgo, O. 1976. Manual de Construcción con Bambú Guadua. Universidad Nacional de Colombia. Colombia.
- INBAR (Red Internacional de Bambú y Ratán. Oficina Regional para América Latina y el Caribe). 2008. Invernadero de Bambú para Cultivo de Hortalizas, Boletín Informativo No 7.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2013. Encuesta Nacional de Ocupación y Empleo (ENOE). Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/tabuladosbasicos/tabtema.aspx?s=est&c=28822>. Fecha de consulta: 3-marzo-2013.
- Jiménez, O. 1999. Invernaderos (Diseño, establecimiento y manejo) Antología. Subsecretaría de Educación e Investigación Tecnológicas. SEP. México
- Jiménez, J. L. 2011. Producción de Hortalizas en Ambientes Protegidos. 2ª Edición. Imprenta Comercial-El Debate. México.
- Lárraga-Sánchez, N; N. Gutiérrez-Rangel, H. López-Sánchez, M. E. Pedraza-Santos, G. Santos-Pérez, U. I. Santos-Pérez y J. Vargas-Hernández. 2011. Propagación

- vegetativa de tres especies de Bambú Ra Ximhai, vol. 7, núm. 2, mayo-agosto, 2011, pp. 205-218, Universidad Autónoma Indígena de México México
- Matallana A. y J.I. Montero. 1995 Invernaderos: Diseño, construcción y ambientación. 2da Edición. Mundi-Prensa. España
- Moreno R., A.; J. Aguilar, G. Luévano. 2011. Características de la agricultura protegida y su entorno en México. Revista Mexicana de Agronegocios, vol. XV, núm. 29, julio-diciembre, 2011, pp. 763-774, Sociedad Mexicana de Administración Agropecuaria A.C. México. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=14119052014>
- NMGA (National Greenhouse Manufacturers association). 1996. National Greenhouse Manufacturers Association standards for design loads in greenhouse structures. National Greenhouse Manufacturers Association. Copyright 1985. 9 pp.
- Norma Mexicana NMX-E-255-CNCP-2008. Invernaderos de cubiertas plásticas. Diseño y construcción – especificaciones. Diario Oficial de la Federación. México
- NTC 5525 a 2007 "Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth.", del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación
- Olivares, E. 1994. Paquete de Diseños Experimentales FAUANL. Versión 2.5. Facultad de Agronomía UANL. Marín, N.L.
- Ordóñez-Candelaria, V. R. 1999. Perspectivas del Bambú para la Construcción en México. Madera y Bosques, año/vol. 5, número 001. Instituto de Ecología A.C. Xalapa, México.
- Pineda-Martínez, L. F. 2005. Descripción del clima y modelación numérica de fenómenos meteorológicos en San Luis Potosí, México. Tesis de Posgrado en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica. San Luis Potosí, S.L.P. septiembre de 2005. Disponible en: <http://www.ipicyt.edu.mx/storage-sipicyt/materialbiblioteca/030050PinedaMartinez.pdf>
- Rodríguez, L. y S. Galicia. 2005. Determinación de la distribución potencial de las especies nativas e introducidas de bambú en México. 1er Congreso Mexicano del Bambú. Diciembre del 2005. Xalapa, Veracruz, México.
- Rodríguez R. J. C. 2006 El bambú como material de construcción Conciencia Tecnológica, núm. 31, enero-junio, pp. 67-69, Instituto Tecnológico de Aguascalientes, México

- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación de México). 2010. Rangos de precios sugeridos para 5 tipos de invernaderos en México. Disponible en: http://www.firco.gob.mx/proyectos/proap/documents/presentacion_rangos_precios_proap_2010.pdf. Fecha de consulta 30-jun-2013.
- Sánchez del Castillo, F. 2007. V Simposio Internacional de Producción de Cultivos en Invernaderos. San Nicolás de las Garzas, Nuevo León, México. Septiembre 2007.
- Ubolsook P. y S. Thepa. 2011. Structural Analysis of Bamboo Trusses Structure in Greenhouse. 2011 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE vol.6 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore.
- Villa-Issa, M.R. 2011. ¿Qué hacemos con el campo mexicano? 2a ed. Editor. Colegio de Postgraduados. xxviii, 434 p.
- Villegas, M. 2003. Guadua Arquitectura y diseño. Ed. Villegas. Bogotá, Colombia.
- Xiaobo Li, 2004. Physical, chemical, and mechanical properties of bamboo and its utilization potential for fiberboard manufacturing. Thesis Submitted to the Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agriculture and Mechanical College The School of Renewable Natural Resources
- World Steel Association. 2008. Informe de sustentabilidad de la Industria Siderúrgica Mundial 2008. Disponible en http://www.worldsteel.org/dms/internetDocumentList/bookshop/pubs-in-other-languages/SR_2008_Spanish_web/document/Sustainability%20Report%202008%20-%20Spanish.pdf