

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA

Estudios con Reconocimiento de Validez Oficial por Decreto Presidencial
del 3 de abril de 1981



*“DESARROLLO DE UN SISTEMA INTEGRAL DE TRATAMIENTO DE AGUA
RESIDUALES DOMÉSTICAS CON CONTROL DE MICROCLIMA Y CAPTURA DE
CARBONO BASADO EN EL MODELO DE HUMEDAL
DENOMINADO SISTEMA DE HUMEDAL BIOCLIMATIZADOR (SHBC)”*

TESIS

Que para obtener el grado de

DOCTORA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

Presenta

PERLA RODRÍGUEZ SALINAS

Director: Dra. Mariana Ruiz

Lector: Dr. Víctor Ávila Akerberg

Lectora: Dra. Jimena De Gortari Ludlow

Lectora: Dra. Odette Lobatto Calleros

Lector: Dr. Alejandro Ordaz Flores

Ciudad de México

2018

ÍNDICE	PÁGINA
RESUMEN	9
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
1.1 Planteamiento del problema	10
1.2 Descripción de la propuesta	12
1.3 Objetivos	12
1.4 Hipótesis	13
1.5 Alcance	13
2 CAPÍTULO II: IMPACTO AMBIENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS EDIFICIOS	15
2.1 Generación de agua residual doméstica	15
2.1.1 Situación en México	15
2.1.2 Marco legal aplicable en materia de agua residual doméstica	19
2.2 Consumo energético y generación de gases de efecto invernadero (GEI) por climatización	21
2.2.1 Situación actual de los gases de efecto invernadero en México	21
2.2.2 Marco legal en materia de disminución de gases de efecto invernadero y captura de carbono	23
3 CAPÍTULO III: HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL.	29
3.1 Definición de humedales artificiales de flujo subsuperficial	29
3.2 Eficiencia de los humedales artificiales	29
3.3 Especies utilizadas en humedales artificiales	31
4 CAPÍTULO IV: USO DE SISTEMAS DE VEGETACIÓN PARA BIOCLIMATIZACIÓN	32
4.1 Conceptos básicos sobre bioclimatización	32
4.2 Aplicación de la Bioclimatización	34
4.3 Aplicación de los sistemas de vegetación en bioclimatización	34
5 CAPÍTULO V: CAPTURA DE CARBONO	38
5.1 Ciclo del carbono	39
5.2 Mecanismos de captura de carbono: C3, C4, CCAM	39
6 CAPÍTULO VI: USO DE SISTEMAS DE VEGETACIÓN PARA AMORTIGUAMIENTO ACÚSTICO	40
6.1 Marco legal aplicable en materia de ruido	40
6.2 Marco conceptual sobre amortiguamiento acústico	42
6.3 Antecedentes de aplicación de sistemas de vegetación para amortiguamiento acústico	43
7 CAPÍTULO VII: EXPERIMENTACIÓN	44
7.1 Selección de la especie	44
7.1.1 Descripción de la especie	44
7.1.2 Antecedentes del <i>Arundo donax</i> : uso en humedales y captura de CO ₂	47
7.2 Determinación del amortiguamiento térmico de la barrera verde de <i>Arundo donax</i>	50
7.2.1 Diseño y construcción de prototipo de medición	50
7.2.2 Resultados de la medición de temperatura	52
7.2.3 Discusión de resultados	55
7.3 Medición de transpiración	56
7.3.1 Potencial de transpiración	56
7.3.2 Determinación de transpiración	57
7.3.3 Discusión de resultados	58
7.4 Medición de ahorro energético	59
7.5 Determinación de la reducción de ruido por la barrera verde de <i>Arundo donax</i>	61
7.5.1 Resultados de la determinación de la reducción de ruido	63
7.5.2 Discusión de resultados	64
7.6 Determinación del potencial de captura de CO ₂ por la barrera verde de <i>Arundo donax</i>	66
7.6.1 Resultados de la determinación del potencial de captura de CO ₂	66

7.6.2	<i>Discusión de resultados</i>	68
7.7	<i>Método de propagación del Arundo donax</i>	69
7.7.1	<i>Antecedentes</i>	69
7.7.2	<i>Técnicas de propagación vegetativa</i>	69
8	CAPÍTULO VIII: PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE HUMEDAL - BARRERA VERDE (SHBV)	75
8.1	<i>Materiales</i>	75
8.1.1	<i>Sustrato</i>	75
8.1.2	<i>Impermeabilizante</i>	78
8.1.3	<i>Tubería de conexión</i>	84
8.1.4	<i>Contenedores para agua residual y agua tratada</i>	85
8.2	<i>Diseño sostenible</i>	86
8.3	<i>Variables de diseño</i>	88
8.3.1	<i>Volumen de agua residual</i>	88
8.3.2	<i>Porosidad del sustrato</i>	91
8.3.3	<i>Tiempo de residencia</i>	93
8.4	<i>Ubicación</i>	94
8.5	<i>Dimensionamiento</i>	104
8.6	<i>Infraestructura previa</i>	105
8.7	<i>Tipos de SHBV</i>	106
8.7.1	<i>Sistema de humedal – barrera verde nivel I: SHBV – I</i>	107
8.7.2	<i>Sistema de humedal – barrera verde nivel II: SHBV – II</i>	109
8.7.3	<i>Sistema de humedal – barrera verde nivel III: SHBV – III</i>	111
8.8	<i>Mantenimiento</i>	113
8.9	<i>Modelo de escalamiento de costo</i>	115
9	CAPÍTULO IX: CONCLUSIONES	118
9.1	<i>Amortiguamiento térmico</i>	118
9.2	<i>Amortiguamiento acústico</i>	118
9.3	<i>Reducción del volumen de Agua residual descargado</i>	118
9.4	<i>Captura de CO₂</i>	119
9.5	<i>Beneficios y limitaciones del SHBV</i>	119
9.6	<i>Obligaciones legales en materia de generación de GEI</i>	120
9.7	<i>Investigaciones futuras</i>	120
10	ANEXOS	122
	<i>ANEXO 1: MEDICIONES DE TEMPERATURA</i>	122
	<i>ANEXO 2: MEDICIONES DE RUIDO</i>	129
	<i>ANEXO 3: REDUCCIÓN DE VOLUMEN DE AGUA RESIDUAL DESCARGADO</i>	130
	<i>ANEXO 4: MANUAL DEL SHBV</i>	133
11.	REFERENCIAS	158

ÍNDICE DE TABLAS

Número	Nombre	Página
2.1	<i>Obligaciones en materia de descarga de aguas residuales</i>	20
2.2	<i>Consumo energético, gasto y generación de CO₂ en un equipo de refrigeración promedio</i>	23
2.3	<i>Legislación aplicable en materia de emisiones de gases de efecto invernadero</i>	24
2.4	<i>Sector industrial</i>	25
2.5	<i>Sector agropecuario</i>	25
2.6	<i>Sector residuos</i>	26
2.7	<i>Sector comercio y servicios</i>	26
2.8	<i>Requisitos para el registro de proyectos y actividades de mitigación de reducción y absorción de emisiones</i>	27
2.9	<i>Normatividad en materia de eficiencia energética en edificios y aparatos de climatización</i>	28
3.1	<i>Ejemplos de eficiencia de remoción de los principales contaminantes presentes agua residual domestica de los humedales de flujo subsuperficial</i>	30
3.2	<i>Evaluación cualitativa de características del sistema de humedal de flujo subsuperficial</i>	30
4.1	<i>Condiciones ambientales de confort</i>	32
4.2	<i>Tipo de vegetación usada en cada tipo de sistema de vegetación. Aplicación de los sistemas de vegetación en diversos tipos de infraestructura.</i>	36
6.1	<i>Normas técnicas en materia de ruido</i>	42
7.1	<i>Datos generales de la clasificación de la Especie <i>Arundo donax</i></i>	44
7.2	<i>Origen y distribución de la especie <i>Arundo Donax</i></i>	46
7.3	<i>Parámetros de tolerancia de la especie <i>Arundo donax</i></i>	47
7.4	<i>Componentes del <i>Arundo donax</i></i>	48
7.5	<i>Comparación de temperatura interior y exterior mínima, promedio y máxima</i>	53
7.6	<i>Amortiguamiento térmico (Te-ti), promedio para cada horario medido y promedio general</i>	53
7.7	<i>Comparación de efectos sobre la temperatura de los muros de los sistemas de vegetación vertical con diferentes especies</i>	54
7.8	<i>Comparación de humedad y proporción de tallos y hojas en individuos de <i>Arundo donax</i> sin restricciones de agua y con restricciones de agua</i>	57
7.8b	<i>Volumen transpirado por el SHBV en condiciones de clima cálido seco.</i>	58
7.9	<i>Consumo energético por concepto de incremento de la temperatura para alcanzar la temperatura de confort.</i>	60
7.10	<i>Medición de la reducción sonora aire, sustrato y barrera verde</i>	63
7.11	<i>Comparación de reducción acústica de diversos materiales empleados en la construcción, muro verde y barrera verde de <i>Arundo donax</i>.</i>	64
7.12	<i>Captura de CO₂ de una barrera verde tipo</i>	66
7.13	<i>Promedios de generación de CO₂ por persona al año en México, países industrializados y a nivel mundial</i>	67
7.13b	<i>Captura de CO₂ por metro lineal de barrera verde variando la altura, el ancho y la densidad de la misma</i>	68
7.14	<i>Tipos de esquejes</i>	70
8.1	<i>Materiales comúnmente usados como sustrato de humedales construidos</i>	75
8.2	<i>Tamaños disponibles de piedra de río</i>	76
8.3	<i>Comparación de tamaño de partícula y superficie de contacto de los sustratos recomendados para el SHBV.</i>	77
8.4	<i>Metodologías para el diseño sostenible</i>	86
8.5	<i>Modelos de arquitectura bioclimática</i>	87
8.6	<i>Planeación de muestreo compuesto</i>	88

<i>Número</i>	<i>Nombre</i>	<i>Página</i>
8.7	<i>Ejemplo de programación de muestra de agua residual</i>	89
8.8	<i>Inventario de actividades generadoras de agua residual</i>	90
8.9	<i>Cálculo de la superficie de contacto en función del tamaño de partícula del sustrato</i>	92
8.10	<i>Dimensiones de un sistema de humedal tipo</i>	104
8.11	<i>Longitud de la BV para diferentes valores de volumen de agua residual y ancho de la BV</i>	104
8.12	<i>Longitud del sistema de SHBV para diferentes valores de ancho y No. de habitantes</i>	105
8.13	<i>Tipos de Sistemas de humedal – barrera verde</i>	106
8.14	<i>Descripción del SHBV – I</i>	107
8.15	<i>Componentes del SHBV – II</i>	109
8.16	<i>Componentes del SHBV – III</i>	111
8.17	<i>Componentes de acuerdo al tipo de SHBV</i>	115
8.18	<i>Ejemplo de cálculo del costo del SHBV-I</i>	116
8.19	<i>Ejemplo de costo del SHBV-III</i>	117
9.1	<i>Beneficios y limitaciones del SHBV</i>	119
A1.1	<i>Mediciones de temperatura en el horario de las 8:30 a.m.</i>	122
A1.2	<i>Mediciones de temperatura en el horario de las 13:30 a.m</i>	124
A1.3	<i>Mediciones de temperatura en el horario de las 17:00 a.m.</i>	126
A2.1	<i>Resultados de las mediciones de ruido realizadas en los tres escenarios planteados</i>	129
A3.1	<i>Volumen transpirado por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 30 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.</i>	130
A3.2	<i>Volumen por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 60 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.</i>	131
A3.3	<i>Volumen transpirado por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 90 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.</i>	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Número	Nombre	Página
1.1	Esquema de la problemática ambiental generada por la operación de edificios habitacionales y de servicios	10
1.2	Esquema de problemática ambiental y soluciones “ex situ” a gran escala	11
2.1	Evolución de la cobertura de servicio de alcantarillado en México.	16
2.2	Habitantes sin servicio de alcantarillado por estado de la república.	16
2.3	Generación de agua residual en México, clasificada en agua residual colectada y tratada, agua residual colectada y no tratada y agua residual no colectada.	17
2.4	Inversión en materia de alcantarillado y saneamiento, evolución histórica.	18
2.5	Reuso de agua residual tratada, histórico.	19
2.6	Emisiones de CO ₂ per cápita	21
2.7	A) Frecuencia de días con temperatura máxima diaria mayor o igual a 40° en los meses de abril a junio. B) Frecuencia de días con temperatura máxima diaria mayor o igual a 40° en los meses de julio a septiembre.	22
2.8	Estimados de usos finales de electricidad por zonas climáticas	22
3.1	Esquema de un humedal de flujo subsuperficial	29
5.1	Ciclo biogeoquímico del carbono	39
7.1	Distribución de <i>Arundo donax</i> en México	47
7.2	Calorímetro testigo (sin barrera verde)	51
7.3	Calorímetro de prueba (con barrera verde)	51
7.4	Calorímetros “T” al interior del invernadero orientados hacia el este	52
7.5	Promedio de las diferencias de temperatura exterior e interior para cada horario de medición de temperatura. Comparación del dispositivo con barrera verde (Te-ti(cbv)) y el dispositivo sin barrera verde (Te-ti(sbv)). Las mediciones de temperatura se realizaron en el periodo del 27 de julio al 30 de septiembre del 2015.	53
7.6	Termografía de la pared con y sin barrera verde de <i>Arundo donax</i>	54
7.7	Población de <i>Arundo donax</i> establecida en un humedal doméstico alimentado con agua residual gris	56
7.8	Esquema del muestreo de tallos y hojas para determinación de humedad	56
7.9	Calorímetro de prueba para determinar ahorro energético	59
7.10	Consumo energético por amortiguamiento térmico, comparación entre calorímetro con y sin barrera verde. Se refiere al consumo energético acumulado. cbv con barrera verde, sbv sin barrera verde	60
7.11	Prototipo para medición de amortiguamiento de ruido por la barrera verde	61
7.12	Prototipo para medición de amortiguamiento de ruido sin la barrera verde.	62
7.13	Reducción de sonido comparación entre la barrera verde, el sustrato de tezontle y el aire.	63
7.14	Reducción de ruido en función de la masa de la barrera verde. La masa de la barrera verde incluye la biomasa de las plantas y el aire atrapado entre las mismas.	64
7.15	Sitio 1 de recolección de material biológico, Vía Corta a Morelia, Lomas de Guadalupe, Ciudad Nicolás Romero, MEX Coordinadas 19.632345, -99.299262.	71
7.16	Barrera verde con tres meses de haber sido plantada en recipientes de polietileno	71
7.17	Sitio 2 de recolección de material biológico ubicado en Av. Patos No. 2, col Loma del Río, Nicolás Romero. Coordinadas 19.63863, - 99.346097.	72
7.18	Retoños <i>Arundo donax</i> . a) unidos al tallo principal, b) desprendidos desde la base, c) Con raíces de 15 días	73
7.19	Sitio 3 de recolección de material biológico. calle 1ª de Mayo, col. Dr. Ignacio Capetillo, Nicolás Romero, Edo. de México. Coordinadas 19.619360, - 99.320348.	73
7.20	Rizomas de <i>Arundo donax</i>	74
7.21	Población de <i>Arundo donax</i> obtenida mediante la técnica de propagación por rizomas, regada con agua residual gris y empleando tezontle como sustrato.	74

<i>Número</i>	<i>Nombre</i>	<i>Página</i>
8.1	<i>Clasificación del grado de redondez y esfericidad</i>	78
8.2	<i>Geomembrana plástica empleada para impermeabilizar un estanque de almacenamiento de agua.</i>	79
8.3	<i>a) ejemplo de contenedores de polietileno de alta densidad de 80, 110, 140 160, 210, 310, 380 650 y 700 litros de capacidad. b) Ejemplo de contenedores de plástico para una barrera verde cola de caballo</i>	80
8.4	<i>a) canal construido con placas de hormigón armado, b) canal construido con block</i>	81
8.5	<i>a) Ejemplo de contenedores de concreto susceptibles de ser usados en el SHBV. b) Ejemplo de jardineras de concreto con una barrera verde de bambú</i>	82
8.6	<i>Maceta de plástico soplado de 75 litros</i>	83
8.7	<i>Esquema del uso de contenedores plásticos con recubrimiento de cobre en el canal del humedal.</i>	83
8.8	<i>Tubería y accesorios de PVC</i>	84
8.9	<i>Ejemplo de contenedor de almacenamiento</i>	85
8.10	<i>Procedimiento de determinación del factor de porosidad</i>	91
8.11	<i>Matriz de zonas climáticas</i>	94
8.12	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO SECO</i>	96
8.13	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO</i>	97
8.14	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO HÚMEDO</i>	98
8.15	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPALDO SECO</i>	99
8.16	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPLADO HÚMDEO</i>	100
8.17	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPLADO</i>	101
8.18	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA SEMIFRÍO SECO</i>	102
8.19	<i>Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA SEMIFRÍO Y SEMIFRÍO HÚMEDO</i>	103
8.20	<i>Esquema del SHBV – I</i>	108
8.21	<i>Esquema de la prueba de infiltración</i>	108
8.22	<i>Esquema del SHBV – II</i>	110
8.23	<i>Esquema del SHBV – III</i>	112
8.24	<i>Esquema de los resultados obtenidos con los dos tipos de poda recomendados</i>	113
A1.1	<i>Pruebas de Anderson- Darling para evaluar si los datos de las 830 a.m. tienen una distribución normal. a) con barrera verde y b) sin barrera verde</i>	123
A1.2	<i>Pruebas de Anderson- Darling para evaluar si los datos del horario de las 1330 horas tienen una distribución normal. a) con barrera verde y b) sin barrera verde</i>	125
A1.3	<i>Pruebas de Anderson- Darling para evaluar si los datos del horario de las 1730 horas tienen una distribución normal. a) con barrera verde y b) sin barrera verde</i>	127
A1.4	<i>Diagrama de caja del horario 830 a.m.</i>	128

Abreviaturas

<i>CONABIO</i>	<i>Comisión nacional de la biodiversidad</i>
<i>CONAGUA</i>	<i>Comisión nacional del agua</i>
<i>GEI</i>	<i>Gases de efecto invernadero</i>
<i>LAN</i>	<i>Ley de Aguas Nacionales</i>
<i>LTE</i>	<i>Ley de Transición Energética</i>
<i>LGCC</i>	<i>Ley General de Cambio Climático</i>
<i>LGEEPA</i>	<i>Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente</i>
<i>RLAN</i>	<i>Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales</i>
<i>RLTE</i>	<i>Reglamento de la Transición Energética</i>
<i>RLGCCmrne</i>	<i>Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en Materia de Registro Nacional de Emisiones</i>
<i>RLSCBEM</i>	<i>Reglamento del Libro Segundo del Código de la Biodiversidad del Estado de México</i>
<i>RPACCOER</i>	<i>Reglamento para la Protección al Ambiente contra la Contaminación Originada por la Emisión de Ruido</i>
<i>SHBV</i>	<i>Sistema de humedal – barrera verde</i>

RESUMEN

La construcción y operación de los edificios residenciales y de servicios contribuyen de forma importante al deterioro ambiental. La operación, por ser la etapa más larga en el ciclo de vida de los edificios aporta los impactos ambientales de mayor magnitud, los cuales al ser multiplicados por el creciente número de edificios existentes en los centros de población se convierten en uno de los principales problemas a resolver en cuestiones de medio ambiente.

*Entre los principales impactos ambientales derivados de la operación de edificios habitacionales está la generación de gases de efecto invernadero resultante del consumo eléctrico de sistemas de climatización. El uso de sistemas de vegetación representa una alternativa para disminuir dicho consumo energético. Las barreras verdes son sistemas de vegetación empleados como protección contra el viento, aunque recientemente se ha explorado su uso como sistemas de amortiguación acústica. En este trabajo se analiza su posible aplicación como sistemas de aislamiento térmico para edificios. En específico, se reporta el comportamiento de una barrera verde de *Arundo donax* como elemento de bioclimatización. Los resultados se analizan a partir de las temperaturas medidas en el interior y exterior de edificios prototipo, en función de la presencia de una barrera verde.*

*Por otra parte, es bien conocido que la gran cantidad de actividades aglutinadas en las ciudades modernas conlleva la generación de ruido como una forma de contaminación cada vez más importante. Al igual que en la mayoría de los países, en México existen ordenamientos legales encargados de regular las emisiones de ruido de fuentes fijas. Para contrarrestar este tipo de contaminación se ha utilizado la vegetación para aislar acústicamente las zonas urbanas. Recientemente se han probado diversos sistemas de vegetación en edificios, incluyendo barreras vegetales, techos verdes, fachadas verdes y jardines como amortiguadores acústicos. El presente trabajo plantea la posibilidad de reducir las emisiones de ruido en fuentes fijas mediante el establecimiento de una barrera verde de *Arundo donax* en el perímetro de los predios donde se realizan actividades que se caracterizan por generar altos niveles de contaminación acústica. Se presentan y analizan los resultados de medir la reducción de ruido por transmisión directa de una fuente puntual mediante un prototipo de barrera verde de *Arundo donax*.*

*Adicionalmente la generación de agua residual gris es un impacto ambiental que se ve incrementado por la poca o nula existencia de infraestructura sanitaria. El Sistema de Humedal - Barrera Verde SHBV plantea la posibilidad de aprovechar el agua residual gris para el riego de la barrera verde de tal manera que lejos de requerir suministro de agua, se ofrezca una solución al problema de la descarga de agua residual. Derivado de lo anterior, se determinó la transpiración del *Arundo Donax* en condiciones ambientales extremas con la finalidad de determinar la reducción del volumen de agua residual descargada, ya que esta reducción depende de la transpiración, la cual a su vez está íntimamente relacionada con las condiciones climáticas del sitio donde sea instalado.*

El SHBV representa una alternativa para disminuir el impacto ambiental derivado de la operación de edificios habitacionales, cuya principal contribución radica en tres características: a) contribuye a la "responsabilidad individual", es decir que cada persona, familia, organización se responsabilice por los contaminantes que genera, b) una solución "in situ" ya que se instala en el sitio donde se generan los contaminantes, c) sistema integral que contribuye en la disminución del impacto ambiental de los edificios habitacionales en 3 rubros (agua residual, generación y captura de CO₂ y ruido).

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Planteamiento del problema

La construcción y operación de los edificios residenciales y de servicios contribuyen de forma importante al deterioro ambiental. La operación, por ser la etapa más larga en el ciclo de vida de los edificios aporta los impactos ambientales de mayor magnitud, los cuales al ser multiplicados por el creciente número de edificios existentes en los centros de población se convierten en uno de los principales problemas a resolver en cuestiones de medio ambiente.

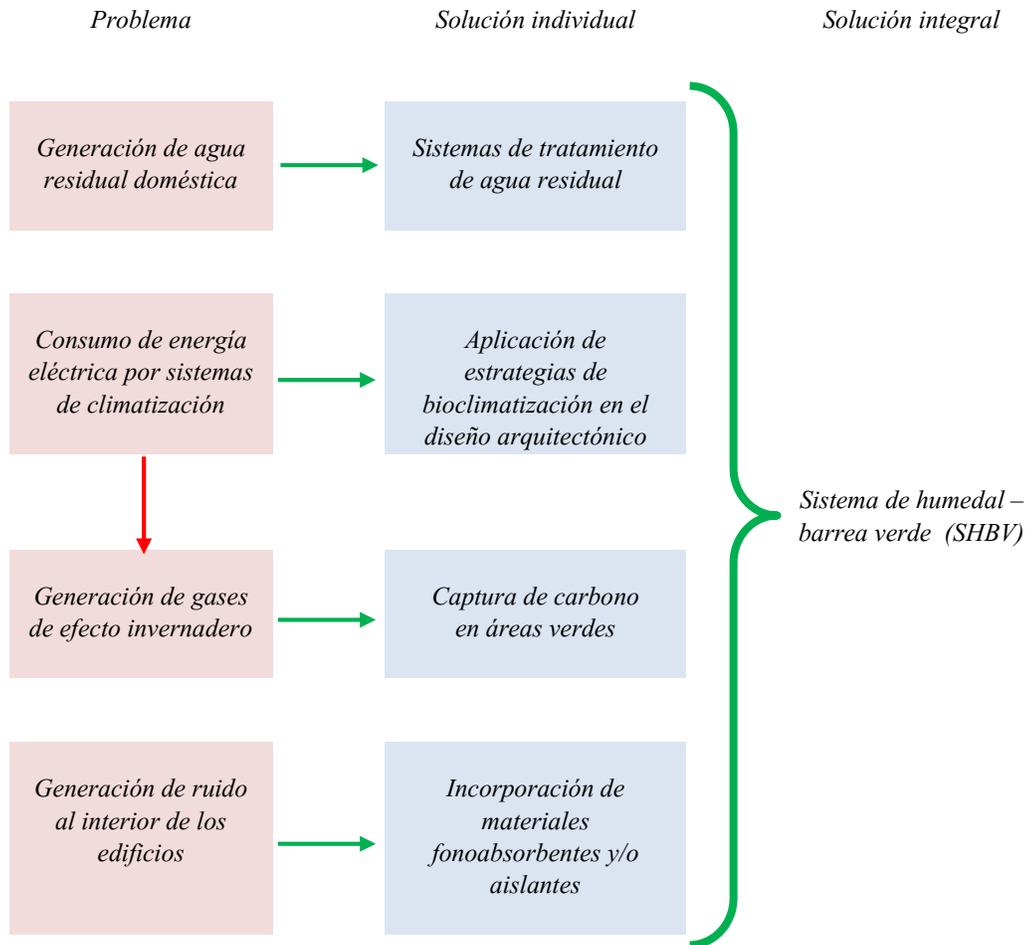


Figura 1.1: Esquema de la problemática ambiental generada por la operación de edificios habitacionales y de servicios.

Algunos de los principales impactos derivados de la operación de los edificios residenciales y de servicios se muestran en la figura 1.1. La generación de agua residual gris, es decir la que proviene de las actividades de limpieza del edificio, cocina, ducha y lavado de ropa, es un impacto ambiental que se ve incrementado por la poca o nula existencia de infraestructura sanitaria (como se describe en el apartado 2.1). La implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales es una solución pensada para ser aplicada en conjunto, es decir para comunidades o incluso ciudades completas. Este es solo un ejemplo del tipo de soluciones que por años han sido utilizadas.

La mayoría de las veces se piensa en “grandes soluciones” y casi mágicas, sin embargo, estas “grandes soluciones” requieren “grandes inversiones”, “grandes espacios”, “grandes costos de operación”. Lo

anterior se debe a que como se describió en el párrafo anterior, el problema a resolver es de gran magnitud.

Sin embargo, si se enfoca desde un punto de vista diferente, verlo de manera individual, cada persona, cada vivienda, es fácil darse cuenta que el problema es pequeño, y es responsabilidad de cada individuo, cada familia o cada organización resolverlo. La solución será igualmente pequeña, barata, fácil, no se necesitarán tecnologías complicadas que a su vez requieran una gran cantidad de recursos de todos tipos (económicos, materiales, humanos).

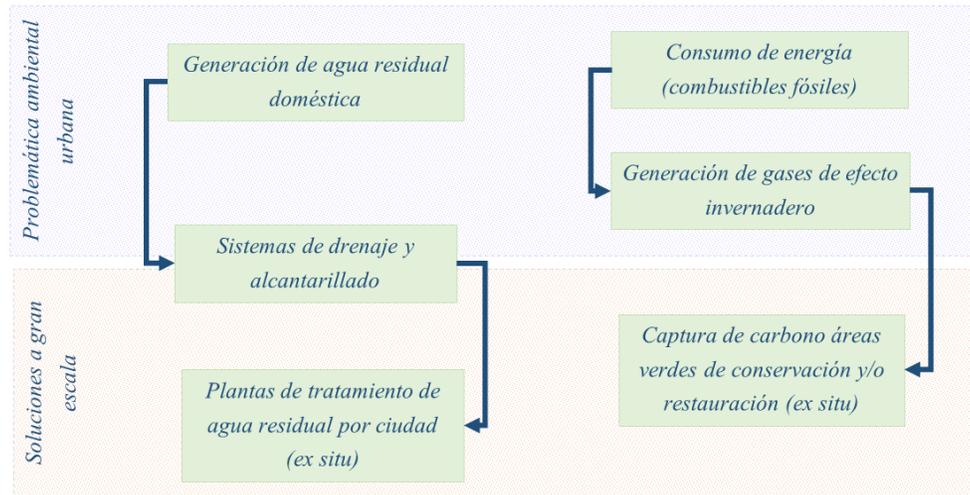


Figura 1.2: Esquema de problemática ambiental y soluciones “ex situ” a gran escala.

Este enfoque se encuentra presente en algunas de las llamadas ecotecnologías o ecotecnias, muchas de ellas desarrolladas en épocas antiguas. Recientemente han sido reivindicadas y se aplican aunque todavía no masivamente.

Por otra parte, como se muestra en la figura 1.1, diferentes impactos ambientales se resuelven aplicando diferentes soluciones. En la mayoría de las ocasiones no existe la capacidad de tener una visión integral y sistémica que permita aprovechar los beneficios que existen en los sistemas naturales donde la especialización de los componentes da como resultado un sistema multitarea.

En el proceso de diseño en ingeniería existe una estrategia denominada “problem solving”, la cual consiste en que un problema general puede identificarse por completo y se puede dividir en subproblemas que se pueden resolver por separado. Del mismo modo estos subproblemas se pueden dividir de forma sucesiva hasta llegar a problemas sencillos y de fácil resolución. Al final se pueden unir las diferentes soluciones y como resultado se obtiene una solución al problema general (de Garrido, 2014).

El desarrollo del SHBV pretende aplicar la estrategia de solución de problemas ambientales para alcanzar la sustentabilidad denominada “Pensar global, actuar local”.

De tal forma que se puede resumir que la principal aportación del presente trabajo de investigación radica en que el SHBV, se desprende de la unión de estas tres ideas:

- Se trata de una alternativa individual, porque está pensada para que cada edificio tenga su propio SHBV que dé solución a la problemática ambiental ocasionada por dicho edificio, lo cual además contribuye de manera importante a la concientización acerca de la importancia de que cada individuo u organización debe asumir la responsabilidad de aplicar medidas de mitigación por el impacto ambiental que genere con sus actividades cotidianas, en vez de

esperar que “alguien” más haga “algo”. El enfoque hacia sistemas individuales contruidos para cada casa o edificio, puede reducir el área necesaria y el costo de construcción. Además, se debe tener en cuenta que el control de un sistema pequeño siempre es más fácil que el control de uno grande.

- Es un sistema integral, ya que ofrece soluciones a cuatro de los principales impactos ambientales derivados de la operación de los edificios: generación de agua residual gris, consumo de energía eléctrica por climatización, generación de gases de efecto invernadero (GEI) y generación de ruido.
- Ofrece una solución “in situ” (figura 1.2). La solución tradicional para el tratamiento de aguas residuales de casas habitación consistía en reunir toda el agua residual de una ciudad, transportarla mediante costosas instalaciones, para después darle tratamiento en un lugar lejano a donde se generó. Hablando de captura de CO₂, la mayor parte de las veces se piensa en reforestar grandes áreas verdes en zonas declaradas para conservación, que rara vez se encuentran ubicadas en las ciudades, siendo en estas donde se genera la mayor parte de esta contaminación y donde se requiere un volumen mayor de vegetación. Estas soluciones “ex situ” contribuyen de manera importante a la desvinculación de los ciudadanos de los problemas ambientales ya que se vuelven “invisibles”. Aunque la aplicación de estrategias de bioclimatización representa una solución “in situ”, se realiza en el momento del diseño arquitectónico, por lo que está limitada solo a edificios por construir, dejando fuera a todos los edificios contruidos. El SHBV al tratarse de una solución “in situ”, además de que reduce considerablemente la necesidad de costosas instalaciones de gran tamaño, al estar presente en el lugar donde se origina la contaminación, la hace evidente y contribuye a la concientización acerca de la responsabilidad de los generadores para la minimización de la misma.

1.2 Descripción de la propuesta

La geometría de los sistemas de humedales artificiales es un aspecto determinante en el buen funcionamiento de los mismos, debido a las implicaciones que pudiera tener en parámetros como la superficie de contacto, el tiempo de residencia, y con la disponibilidad de terreno. Los sistemas de humedales artificiales, se construyen en la mayoría de los casos usando una geometría rectangular, al respecto Lara (1999) recomienda relaciones largo: ancho ideales de 1:1, aunque pueden funcionar bien hasta 4:1. Sin embargo, también existen experiencias empleando humedales con geometría de canal, tal es el caso de los sistemas que se encuentran en Holanda, y que han sido utilizados por más de 30 años, dichos sistemas están formados por zanjas de 3 m de ancho y 100 m de largo (Otálora, 2011). Debido a la baja disponibilidad de terreno en áreas urbanas y suburbanas, para el SHBV se propone un humedal con geometría de canal donde el ancho puede variar de 0.3 a 0.6 m y el largo está en función del volumen de agua residual generada. Estas dimensiones permiten aprovechar espacios paralelos a los muros, dando la oportunidad de emplear la vegetación del humedal para el sombreado de dichos muros. Lo anterior es posible debido al tipo de vegetación, ya que la especie seleccionada, *Arundo donax* (pasto gigante perene), al tratarse de una gramínea, se trata de una especie perteneciente al estrato herbáceo, sin embargo sus dimensiones son suficientes para ofrecer sombreado a edificios habitacionales de hasta 3 pisos, sus características morfológicas que le permiten formar masas compactas, que contribuyen al amortiguamiento térmico – acústico, en un espacio relativamente pequeño en comparación con una barrera verde de especies arbóreas o arbustivas.

1.3 Objetivos

Objetivo general:

Contribuir a la mitigación del impacto ambiental originado de la operación de los edificios habitacionales y de servicios, mediante el desarrollo de un SHBV empleando la especie *Arundo donax*, cuya función sea el aprovechamiento de agua residual gris, el amortiguamiento térmico – acústico y la captura de CO₂.

Objetivos específicos

- Contribuir al amortiguamiento térmico en el interior de edificios habitacionales y de servicios mediante el sombreado y la transpiración ofrecida por la barrera verde de *Arundo donax*.
- Contribuir al amortiguamiento acústico de los edificios habitacionales y de servicios, empleando la barrera verde de *Arundo donax* como material fonoaislante.
- Contribuir a la captura de CO₂ “in situ” de los edificios habitacionales y de servicios, mediante el desarrollo del SHBV.
- Contribuir a la disminución del volumen de agua residual gris descargado a los sistemas de drenaje y alcantarillado por los edificios habitacionales y de servicios por medio de su aprovechamiento para la alimentación del SHBV y la transpiración de la barrera verde de *Arundo donax*.

1.4 Hipótesis

Hipótesis 1: Existe una diferencia significativa en la temperatura al interior de un edificio cuando se emplea una barrera verde de Arundo donax como sombreado y cuando no se emplea dicha barrera verde.

Hipótesis 2: El uso de una barrera verde de Arundo Donax como fonoabsorbente reduce la transmisión directa del sonido en comparación con la ausencia de dicha barrera verde.

Hipótesis 3: El aprovechamiento del agua residual gris generada por edificios habitacionales y de servicios para la alimentación del SHBV – barrera verde puede reducir el volumen de la descarga mediante la transpiración de las plantas de Arundo donax.

Hipótesis 4: La instalación de una barrera verde Arundo donax captura CO₂ en espacios pequeños.

1.5 Alcance

Aprovechamiento de agua residual:

El SHBV está pensado para el aprovechamiento del agua residual gris generada en edificios habitacionales y de servicios. El agua residual gris se refiere a la proveniente de duchas, lavamanos, limpieza del inmueble, lavado de ropa y cocina, quedando excluida de esta clasificación el agua residual proveniente del escusado. El porcentaje de volumen aprovechado dependerá de las condiciones climáticas del sitio donde sea instalado, ya que está relacionado con la transpiración de las plantas de Arundo donax.

Amortiguamiento térmico:

El amortiguamiento térmico, se refiere a la diferencia de temperaturas entre el interior y exterior del edificio. En el presente trabajo se investigó la magnitud de dicha diferencia, cuando se instala una barrera verde Arundo donax contigua y paralela a un muro de un edificio. Lo anterior, sin hacer la distinción entre amortiguamiento térmico debido al sombreado, y el atribuible a la transpiración.

Amortiguamiento acústico:

La reducción de la transmisión directa del ruido significa la parte de ruido que no atraviesa de forma perpendicular algún material fonoabsorbente. En esta investigación se determinó la acción de la barrera verde de Arundo donax como material fonabsorbente mediante la medición de la reducción de la transmisión directa del ruido.

Otras actividades económicas:

Aunque el SHBV en principio fue pensado para su aplicación en el sector de edificios habitacionales y de servicios, es importante mencionar que su aplicación puede ser ampliada a todos aquellos edificios y/o actividades económicas en las cuales exista: generación de agua residual gris, generación de ruido y generación de CO₂, este último ya sea de manera directa mediante la quema de combustibles o indirecta por el consumo de energía eléctrica; ya que la principal motivación que existe actualmente para la implementación de medidas de mitigación del impacto ambiental es el cumplimiento de la normatividad en la materia y el SHBV representa una alternativa que permita alcanzar dicho cumplimiento.

2. CAPITULO II: IMPACTO AMBIENTAL DE LA OPERACIÓN DE LOS EDIFICIOS

El impacto del ambiente construido sobre los ecosistemas es probablemente el más significativo entre todos los emprendimientos de la sociedad, lo que se acentúa progresivamente debido a las crecientes tasas de urbanización. Asimismo, de todas las fases del ciclo de vida de un edificio, claramente la fase del uso u operación, tiene la mayor importancia, dada la gran duración de su vida útil y la magnitud de los consumos y emisiones que se producen durante ella (Arena, 2005). Los principales impactos ambientales identificados durante esta fase se relacionan con el consumo energético, el consumo de agua potable y la consecuente generación de agua residual. A continuación realiza una revisión de la situación ambiental en México respecto a estos dos aspectos del deterioro ambiental.

2.1 Generación de agua residual doméstica

El SHBV pretende disminuir el impacto ambiental de edificios residenciales atribuido a la descarga de aguas residuales grises, mediante el aprovechamiento de las mismas, ya que en México esta problemática, está muy lejos de ser resuelta, como se describe a continuación.

2.1.1 Situación en México

En México en el tema del agua residual, se identifica una de las problemáticas más importantes dentro de los aspectos ambientales. Tradicionalmente, las zonas rurales presentan mayores rezagos en este tema al igual que la mayoría de servicios públicos y ambientales.

De manera oficial el tema del agua se aborda dentro de los servicios de abastecimiento de agua potable y saneamiento. El ciclo integral de dichos servicios comprende el abastecimiento de agua potable, así como el saneamiento y depuración de las aguas residuales: el ciclo se inicia con la captación y potabilización del agua; posteriormente es distribuida para su consumo y, finalmente, las aguas residuales son recogidas y depuradas para que puedan ser devueltas al río sin perjudicar al medio ambiente (CONAGUA, 2014).

Para determinar la importancia de la implementación del SHBV en localidades desprovistas de sistemas de drenaje y alcantarillado, así como el correspondiente tratamiento del agua residual doméstica a continuación se muestran una serie de gráficas con datos estadísticos oficiales en este rubro.

Con respecto a la cobertura del servicio de alcantarillado, ha presentado incrementos sustantivos en los últimos años alcanzando una cobertura de 91.0 % a nivel nacional, 96.3 en zonas urbanas y 72.8 en zonas rurales.

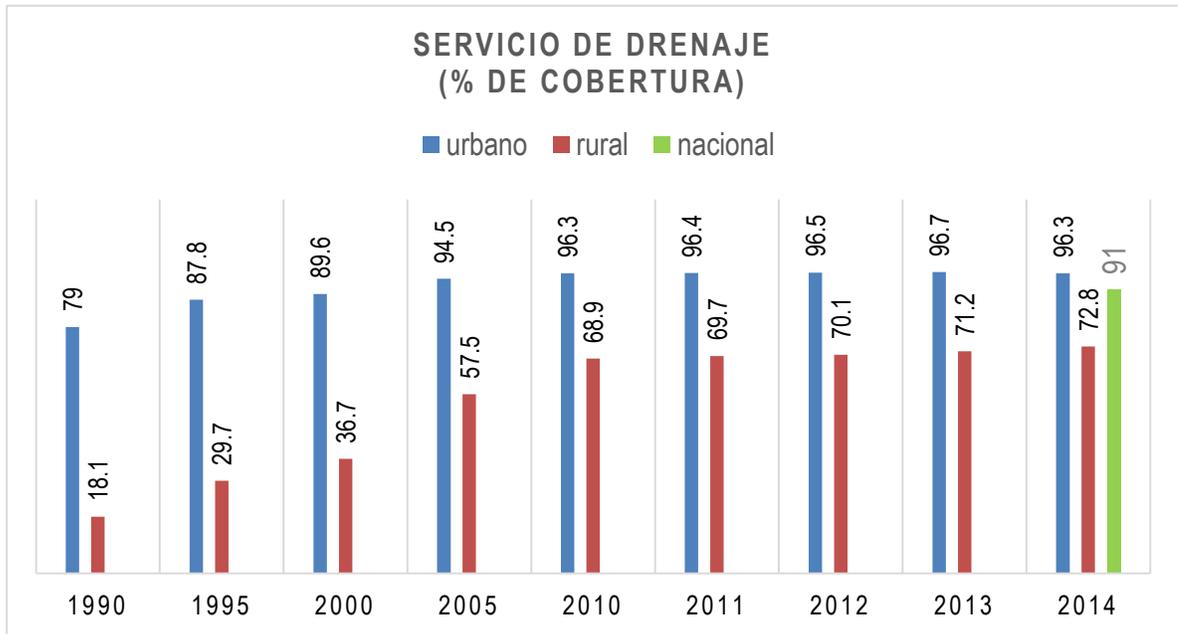


Figura 2.1: Evolución de la cobertura de servicio de alcantarillado en México.
Elaborada con información de CONAGUA (2014)

Del mismo modo que existen diferencias importantes entre las zonas urbanas y las zonas rurales respecto a la cobertura del servicio de alcantarillado, a lo largo del territorio mexicano existen grandes diferencias entre los estados de la república. En la figura 2.2 se muestra el número de habitantes sin servicio de alcantarillado por estado y el porcentaje de la población al que corresponden.

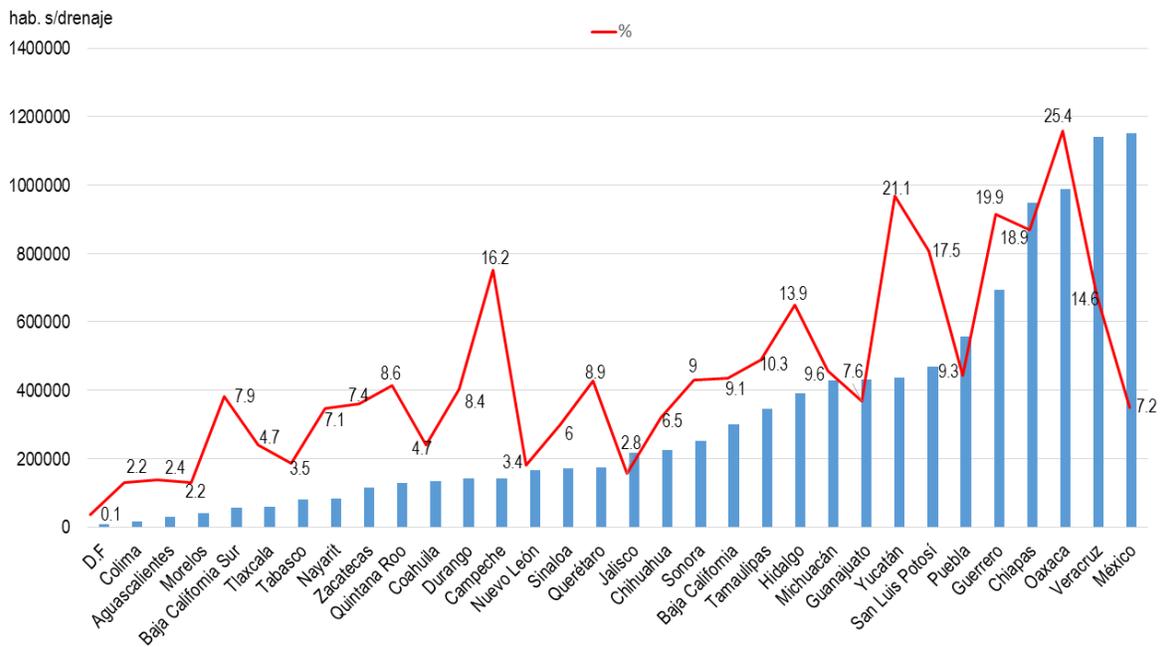


Figura 2.2: Habitantes sin servicio de alcantarillado por estado de la república. Elaborada con datos de CONAGUA (2014)

En la figura 2.2, se puede observar que el mayor número de habitantes sin el servicio de alcantarillado se encuentran en el Estado de México, Veracruz, Oaxaca Chiapas y Guerrero. Sin embargo los estados con el mayor porcentaje de habitantes sin servicio de drenaje son Campeche, San Luis Potosí, Chiapas, Guerrero, Yucatán y Oaxaca. A nivel nacional existen 10.5 millones de habitantes sin el servicio.

Al traducir estos habitantes sin servicio de alcantarillado en metros cúbicos de agua residual no colectada, se tiene un flujo volumétrico de 17.7 m³/s (ver figura 2.3).

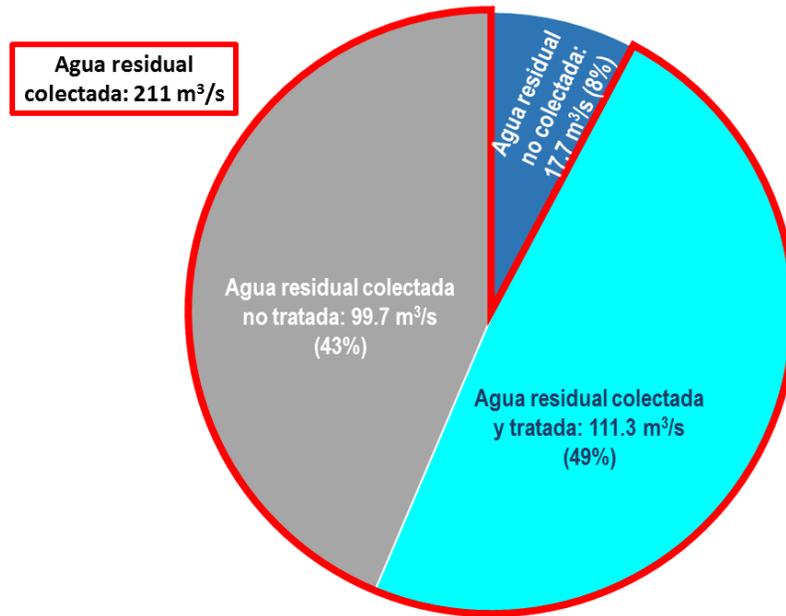


Figura 2.3: Generación de agua residual en México, clasificada en agua residual colectada y tratada, agua residual colectada y no tratada y agua residual no colectada. Elaborada con información de CONAGUA (2014)

Por otra parte, también es importante mencionar que no toda el agua residual colectada cuenta con un tratamiento antes de ser depositada en los cuerpos de agua y de este modo evitar la contaminación y el impacto a los ecosistemas circundantes. En la figura 2.3 se muestra que solo 49% del agua residual generada en México es colectada y tratada, quedando un déficit de tratamiento de más del 50% correspondiente a 117.4 m³/s.

El tratamiento de las aguas residuales en el país se enfrenta a dos aspectos importantes: la dispersión y la concentración de la población. En primer término podemos decir que de acuerdo con el XIII Censo General de Población y Vivienda 2010 del INEGI, cerca de 200 mil localidades tienen menos de 2 500 habitantes, por lo que se requieren inversiones cuantiosas para la construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones de tratamiento (CONAGUA 2014).

En la figura 2.4 se muestra la evolución de la inversión en materia de alcantarillado y saneamiento.

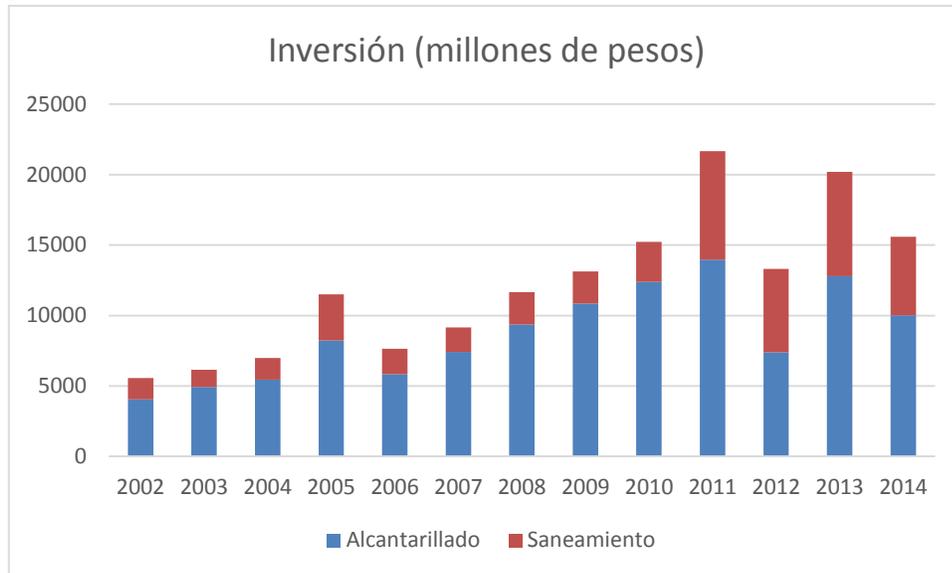


Figura 2.4: Inversión en materia de alcantarillado y saneamiento, evolución histórica. Elaborada con información de CONAGUA (2014)

La concentración de la población en grandes zonas metropolitanas, como la del Valle de México, Guadalajara y Monterrey, requiere grandes inversiones y generar acuerdos entre municipios, incluso, entre diferentes estados para lograr una solución sostenible y económicamente factible (CONAGUA, 2014). Prueba de ello es el cálculo realizado con los valores correspondientes al año 2014, que arrojó como resultado una inversión per cápita de \$8348.7 por concepto exclusivo de servicio de alcantarillado.

El desarrollo del SHBV se pretende ofrecer una alternativa viable, sostenible tanto desde el punto de vista ambiental como económico. Ya que, en principio, la infraestructura construida para la conducción del agua residual, sirve además para dar tratamiento a la misma generando una reducción importante en la inversión requerida.

Otro aspecto importante respecto al agua residual es el reuso. Al igual que ocurre con el tratamiento de agua residual, el reuso del agua residual tratada se ha incrementado en los años recientes. En la figura 2.5 se muestra el desarrollo del reuso, también se observa que existe un 20% de agua residual tratada que hasta el momento no es aprovechado.

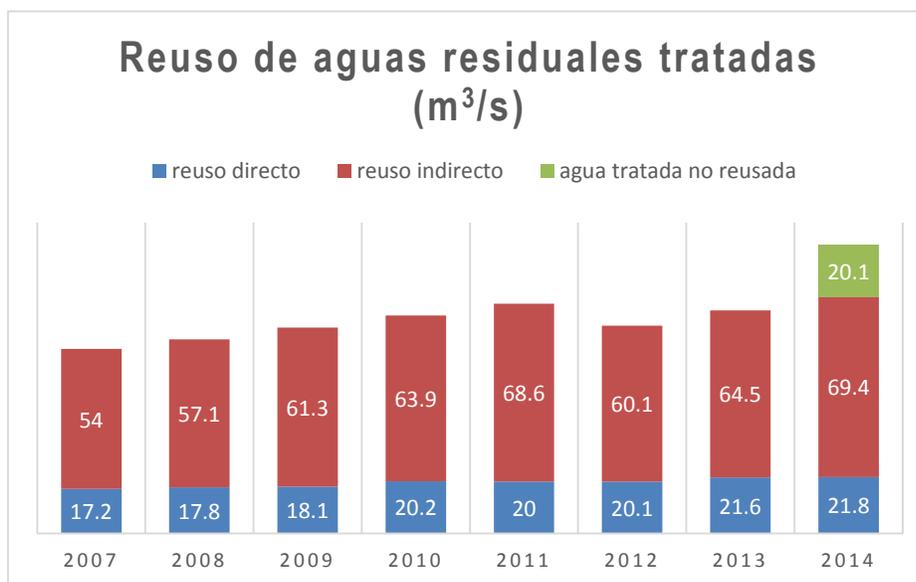


Figura 2.5: Reuso de agua residual tratada, histórico. Elaborada con información de CONAGUA (2014)

El SHBV, constituye un sistema integral por su multifuncionalidad. En él puede llevarse a cabo la recolección y conducción del agua residual, el tratamiento y aprovechamiento de la misma.

2.1.2 Marco legal aplicable en materia de agua residual doméstica

*Una de las aplicaciones directas del SHBV es el aprovechamiento del **agua residual doméstica** proveniente de los edificios, aspecto sobre el cual desde hace tiempo existe legislación y normatividad en México, por lo que se hace necesario realizar un recorrido por los ordenamientos legales aplicables en la materia. Dada la importancia que han cobrado recientemente estos aspectos en la normatividad nacional, a continuación se mencionan los puntos relevantes de la legislación relacionados de alguna manera con el SHBV en materia de aguas residuales.*

*Es importante definir desde el punto de vista legal las **Aguas residuales** como aquellas de composición variada provenientes de las descargas de uso público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (art. 3, fracción VI. LAN) y diferenciarlas de las **Aguas residuales domésticas**, que son las que se generan con motivo de la satisfacción de las necesidades de los residentes de casa habitación (**Artículo 2. Fracción IX. RLSCBEM**). Asimismo, se debe de entender por **Humedales**, las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres, que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de la mareas, como pantanos, Ciénegas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos originadas por la descarga natural de acuíferos (**Artículo 2. Fracción XII. RLAN**).*

*Debido a que se pretende usar el agua residual doméstica para la alimentación del SHBV es importante puntualizar lo que significa el uso y aprovechamiento de los efluentes desde el punto de vista legal. En la LAN (Art. 3 Fracción LII) se define el **uso** como la aplicación del agua en una actividad que implique el consumo parcial o total de ese recurso; se le llama el **Uso doméstico** a la aplicación del agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego de sus jardines y árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos, que no constituya*

una actividad lucrativa en términos del artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Art. 3 Fracción LVI. LAN); ambos son diferentes del **Aprovechamiento**, el cual se refiere a la aplicación del agua en actividades que no impliquen el consumo de la misma (Art. 3 Fracción VII. LAN).

En el SHBV se realizará el **uso doméstico del agua residual doméstica**, lo anterior con la finalidad de facilitar la instalación de dicho sistema en cuanto a trámites legales se refiere, en la tabla 1.1 se muestran los ordenamientos legales que establecen diversos derechos y obligaciones para quienes generen, descarguen, usen y aprovechen las aguas residuales.

Tabla 2.1: Obligaciones en materia de descarga de aguas residuales

<i>Fundamento legal</i>	<i>Establece</i>	<i>Responsable o quién le aplica</i>
LGEEPA, Titulo cuarto, Capítulo III, Artículo 117	El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir contaminación conlleva la responsabilidad del tratamiento Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga La participación y corresponsabilidad de la sociedad es condición indispensable para evitar la contaminación del agua.	Autoridades y sociedad
LGEEPA, Titulo cuarto, Capítulo III, Artículo 123	Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, cuencas vasos, aguas marinas, y demás depósitos y corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaria o las autoridades locales.	Corresponderá a quién genere dichas descargas realizar el tratamiento previo requerido.
LAN artículo 88 BIS-1	Las descargas de aguas residuales de uso doméstico que no formen parte de un sistema municipal de alcantarillado se podrán llevar a cabo con sujeción a las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan y mediante un aviso por escrito a la autoridad del agua. En localidades que carezcan de sistemas de alcantarillado y saneamiento, las personas físicas o morales que en su proceso no utilicen como materia prima sustancias que generen en sus descargas de aguas residuales metales pesados cianuros o tóxicos y su volumen de descarga no exceda 300 metros cúbicos mensuales y sean abastecidas de agua potable por sistemas municipales, estatales podrán llevar a cabo sus descargas de aguas residuales con sujeción a las normas oficiales mexicanas que al efecto se expidan y mediante un aviso por escrito a la autoridad del agua	Personas físicas o morales
NOM-002-SEMARNAT-1996	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Esta norma no se aplica a la descarga de aguas residuales domésticas, pluviales, ni a las generadas por la industria, que sean distintas a las aguas residuales de proceso y conducidas por drenaje separado.	Todos aquellos que descarguen aguas residuales a los sistemas de alcantarillado
NOM-001-SEMARNAT-1996	Límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.	Todos aquellos que descarguen aguas residuales en aguas y bienes nacionales

Elaborada con información de LGEEPA, LAN, NOM-001-semarnat-1996 y NOM-002-semarnat-1996

2.2 Consumo energético y generación de gases de efecto invernadero (GEI) por climatización

Entre los principales impactos ambientales derivados de la operación de edificios habitacionales está la generación de gases de efecto invernadero resultante del consumo eléctrico de sistemas de climatización, por tal motivo a continuación se hace una revisión de las cifras oficiales respecto al consumo energético asociado a este rubro y su contribución en las emisiones de GEI.

2.2.1 Situación actual de los gases de efecto invernadero en México

La excesiva dependencia de los combustibles fósiles como energéticos es actualmente desde el punto de vista de protección ambiental, uno de los aspectos más importantes por resolver. El excesivo consumo energético dedicado a controlar el confort ambiental en espacios cerrados a través de sistemas de aire acondicionado, constituye una fuerte preocupación ambiental, debido principalmente a los efectos dañinos que pueden ocasionar los gases de efecto invernadero generados durante su operación.

En 2010, las emisiones de CO₂ per cápita para México fueron de 7.1 tCO₂ eq., considerando el total de emisiones nacionales de GEI, el CO₂ es el principal GEI emitido por México. En 2009 las emisiones de CO₂ per cápita—considerando únicamente las emisiones por consumo de combustibles fósiles—fueron de 3.75 toneladas por habitante (Figura 2.6), mientras que el promedio mundial fue de 4.1 toneladas de CO₂ per cápita (AIE, 2011) (SEMARNAT 2013).

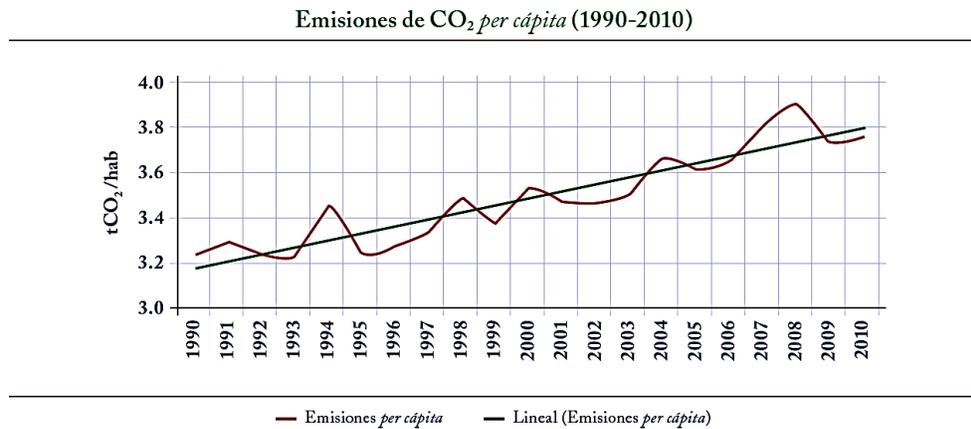


Figura 2.6: Emisiones de CO₂ per cápita;
Fuente: SEMARNAT 2013

Siendo un país con una variedad climática muy contrastante, con ecosistemas que abarcan desde el bosque y selva tropical hasta el desierto, México enfrenta retos importantes en materia de racionalización del consumo energético destinado a la climatización artificial. De hecho, durante primavera y verano, en el noreste, noroeste, sur y sureste de México, son frecuentes los días con temperaturas máximas iguales o superiores a 40 °C (fig. 2.7) (CONAGUA 2014).

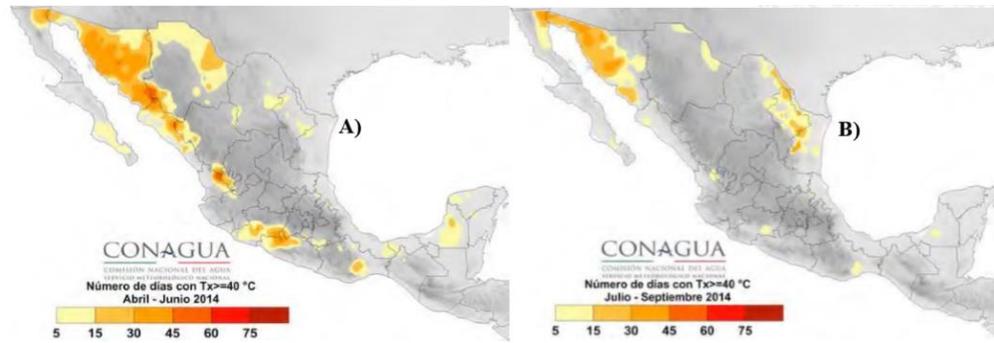


Figura 2.7: A) Frecuencia de días con temperatura máxima diaria mayor o igual a 40° en los meses de abril a junio. B) Frecuencia de días con temperatura máxima diaria mayor o igual a 40° en los meses de julio a septiembre. Fuente: CONAGUA (2014)

Es de resaltar que la cantidad de energía utilizada en un hogar ubicado en una región con clima extremo es prácticamente dos veces la consumida en clima templado o cálido (figura 2.8). Este gasto representa no solo una importante erogación para las familias sino un fuerte impacto ambiental.

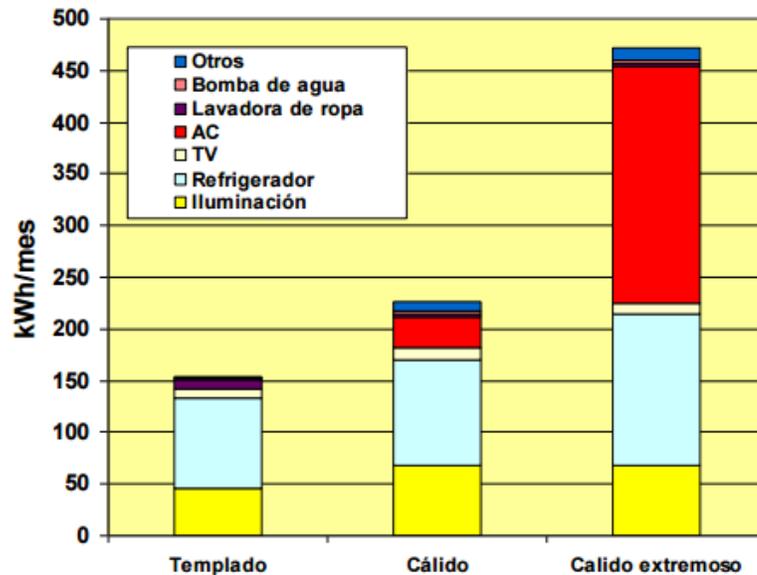


Figura 2.8: Estimados de usos finales de electricidad por zonas climáticas. Fuente: Odón de Buen (2011).

La potencia eléctrica de los equipos de aire acondicionado nuevos es de, aproximadamente, 1.2 kW por cada Tonelada de Refrigeración o 12,000 BTU por hora. Un equipo de 1 Tonelada de Refrigeración consume 1.2 kWh por cada hora que funciona, si trabaja diez horas diarias, consume 12 kWh por día, 360 kWh por mes, 2,160 kWh en un semestre, y 4,320 kWh a lo largo de todo el año. Los costos de operación de un equipo de aire acondicionado dependen de su capacidad, de las horas de uso y de las tarifas vigentes. Considerando un precio promedio de \$1.00 por kWh, un equipo de 1 Tonelada de Refrigeración operando 10 horas por día implica una facturación de 12 pesos diarios, \$360.00 por mes; \$2,160.00 por seis meses y \$4,320.00 por año. El funcionamiento de un equipo de acondicionamiento de aire por 10 horas diarias representa la emisión de 192.5 kg de CO₂ mensual en las plantas eléctricas que generan la electricidad (ver tabla 2.2) (INECC, 2009).

Tabla 2.2: Consumo energético, gasto y generación de CO₂ en un equipo de refrigeración promedio

Capacidad del equipo: 1 ton de refrigeración	Tiempo de operación (hr)	Consumo energético (KWh)	Gasto (\$)	Kg de CO ₂
Día	10	12	12	6.41
Mes	300	360	360	192.5
Año	3650	4320	4320	2309.9

Fuente: (INECC, 2009)

2.2.2 Marco legal en materia de disminución de gases de efecto invernadero y captura de carbono

El SHBV, tiene como uno de sus objetivos centrales la disminución del impacto ambiental derivado de la **emisión indirecta** de gases de efecto invernadero por el consumo de energía en equipos de climatización en edificios. Lo anterior se pretende llevar a cabo mediante la disminución de dicho consumo energético (aplicando los preceptos de la **eficiencia energética**) por medio del amortiguamiento térmico de la barrera verde y la captura de carbono de la misma. Dada la importancia que han cobrado recientemente estos aspectos en la normatividad nacional, a continuación se mencionan los puntos relevantes de la legislación relacionados de alguna manera con el SHBV en materia de emisiones de GEI, cambio climático y eficiencia energética.

Es importante mencionar que las **emisiones indirectas** se refieren a todos los Gases o Compuestos de Efecto Invernadero que se generan fuera del Establecimiento como consecuencia de su consumo de energía eléctrica y térmica (RLGCCMrne art. 2 fracción IV.), mientras que las **emisiones directas** son los Gases o Compuestos de Efecto Invernadero que se generan en los procesos y actividades del Establecimiento y que emiten las Fuentes Fijas de dicho Establecimiento o las Móviles que sean de su propiedad o arrendadas y que utilice en el desarrollo de sus actividades (RLGCCMrne art. 2 fracción IV.).

Dado la importancia del tema, en México actualmente existen diversos ordenamientos legales que regulan todo lo relacionado, tal es el caso de la **Ley General de Cambio climático**, publicada en el Diario Oficial de la Federación 6 de junio de 2012 y reformada el 3-05-2015 donde se establecen disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático y que tiene por objeto garantizar el derecho a un medio ambiente sano y establecer la concurrencia de facultades de la federación, las entidades federativas y los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero; regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero para lograr la estabilización de sus concentraciones en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático considerando en su caso, lo previsto por el artículo 2o de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y demás disposiciones derivadas de la misma; regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático; reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático, así como crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno; fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación al cambio climático.

También existe la **LEY DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA** publicada en el Diario Oficial de la Federación el 24 de diciembre de 2015 y por objeto regular el aprovechamiento sustentable de la energía así como las obligaciones en materia de Energías Limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la Industria Eléctrica, manteniendo la competitividad de los sectores productivos.

Resulta evidente el hecho de que prácticamente todas las actividades humanas (empezando por la respiración) generan gases de efecto invernadero, sin embargo existen algunas que, dado sus características y debido principalmente a sus necesidades de consumo energético, son particularmente contaminantes en este aspecto y por tal motivo requieren ser vigiladas por la autoridad más de cerca con la finalidad de fomentar la reducción o mitigación de las emisiones generadas. Uno de los aspectos más importantes incluidos en la legislación se refiere a la medición y entrega a las autoridades de informes de generación de emisiones. En el **RLGCCmrne** en el artículo 4 se establecen los listados de actividades que se considerarán como Establecimientos **Sujetos a Reporte** agrupadas dentro de los sectores y subsectores. Cabe aclarar que la entrega del reporte representa una obligación legal para dichas empresas.

En la tabla 2.3 se muestra un resumen de la legislación aplicable en materia de emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla 2.3: legislación aplicable en materia de emisiones de gases de efecto invernadero

<i>Fundamento legal</i>	<i>Establece</i>
Ley General de Cambio climático	Establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático mediante la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero; regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero; Regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático; reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático, así como crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno; fomentar la educación, investigación, desarrollo y transferencia de tecnología e innovación y difusión en materia de adaptación y mitigación al cambio climático.
RLGCCmrne	Se establecen los listados de actividades que se considerarán como Establecimientos Sujetos a Reporte agrupadas dentro de los sectores y subsectores.
LTE Capítulo III Artículo 55	El Financiamiento para el Aprovechamiento sustentable de la energía tiene por objeto: I. Contribuir a la sustitución de equipos y aparatos energéticamente ineficientes; II. La realización de mejoras a edificaciones en las que se realice el consumo energético para su acondicionamiento con el fin de que este sea más eficiente...
LTE Artículo 59.	... La CONUEE determinará, en el caso de los usuarios domésticos, aquellas tecnologías económicamente viables y energéticamente eficientes susceptibles de financiamiento.
LTE TÍTULO IX Capítulo I Artículo 107 Artículo 108 Artículo 109 Artículo 110	La Excelencia en Eficiencia Energética es un proceso voluntario de certificación y reconocimiento para identificar y promover productos, equipos y edificaciones diseñadas y acondicionadas para hacer un uso sustentable y eficiente de la energía. La Excelencia en Eficiencia Energética consiste en el etiquetado voluntario de los productos y edificaciones que cumplan con los más altos estándares de eficiencia energética. La certificación y reconocimiento de Excelencia en Eficiencia Energética estará a cargo de la Secretaría, con el apoyo técnico de la CONUEE. Los interesados en recibir el reconocimiento de Excelencia en Eficiencia Energética deberán cumplir los requisitos que, para tal efecto, se establezcan en las disposiciones reglamentarias aplicables; los cuales incluirán, entre otros, la precalificación que deberá realizar un profesional independiente. La Secretaría integrará, administrará y actualizará el catálogo de productos y edificaciones que reciban el reconocimiento de Excelencia en Eficiencia Energética, con base en la información proporcionada por la CONUEE.

En las tablas 2.3 –2.7 se muestran algunas de estas actividades, se eligieron aquellas en las cuales la implementación del SHBV puede ser factible. Lo anterior debido a que, como se mencionó en el alcance, aunque el desarrollo del SHBV en principio está pensado para ser utilizado en edificios habitacionales, también se puede implementar como medida de mitigación del impacto ambiental de todos aquellos edificios que generen agua residual proveniente de servicios (duchas, lavamanos, comedor) y que generen CO₂, ya sea mediante consumo de energía eléctrica o directamente con la quema de combustibles fósiles. En todas estas actividades económicas existen obligaciones en lo que se refiere a la mitigación del impacto derivado de la generación de CO₂. En este caso la implementación del SHBV puede estar dirigido solo al aprovechamiento del agua residual y la captura de carbono. En el capítulo 8 en el apartado de ubicación del SHBV se detalla una opción en la cual el sistema puede ser instalado como barda perimetral.

Tabla 2.4: Sector industrial

Subsector	Actividad
Química	Fabricación de productos químicos básicos; de resinas y hules sintéticos y de fibras químicas; de fertilizantes, pesticidas y otros agroquímicos; de productos farmacéuticos; de pinturas, recubrimientos y adhesivos; de jabones, limpiadores y preparaciones de tocador; de productos de plástico, y de productos de hule.
Siderúrgica	Industria básica del hierro y del acero, y Fabricación de productos de hierro y acero.
Metalúrgica	Básica del aluminio; Industrias de metales no ferrosos, excepto aluminio, y Moldeo por fundición de piezas metálicas.
Metal-mecánica	Fabricación de productos metálicos forjados y troquelados; Fabricación de calderas, tanques y envases metálicos; Fabricación de herrajes y cerraduras; Maquinado de piezas metálicas y fabricación de tornillos; Fabricación de otros productos metálicos, y fabricación de maquinaria y equipo para el comercio y los servicios.
Minera	De minerales metálicos; de minerales no metálicos; de carbón mineral, y servicios relacionados con minería.
Automotriz y transporte	Fabricación de automóviles y camiones; de carrocerías y remolques; de partes para vehículos automotores; de equipo aeroespacial, y de motores de combustión interna, turbinas y transmisiones.
Celulosa y papel	Fabricación de pulpa, papel y cartón, y de productos de cartón y papel.
Artes gráficas	Impresión de revistas, libros, periódicos, panfletos, promocionales, incluyendo la que se realice en talleres independientes que prestan ese servicio; Encuadernación de revistas, libros y toda clase de documentos; Impresión de textiles, y Elaboración de placas, clichés y grabados;
Cementera y calera	Fabricación de cemento y productos de concreto, de cal, yeso y productos de yeso;
Vidrio	Fabricación de productos a base de arcillas y minerales refractarios, y de vidrio y productos de vidrio
Electrónica	Fabricación de equipo de comunicación; de equipo de audio y de video, y de componentes electrónicos;
Eléctrica	Fabricación de accesorios de iluminación, de equipo de aire acondicionado, calefacción, y de refrigeración; industrial y comercial; de aparatos eléctricos de uso doméstico; de equipo de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, y de otros equipos y accesorios eléctricos
Alimentos y bebidas	Elaboración de alimentos para animales; Molienda de granos y de semillas y obtención de aceites y grasas; Elaboración de azúcares, chocolates, dulces y similares; Conservación de frutas, verduras, guisos y otros alimentos preparados; Elaboración de productos lácteos; Matanza, empaqueo y procesamiento de carne de ganado, aves y otros animales comestibles; Preparación y envasado de pescados y mariscos; Elaboración de productos de panadería y tortillas, y bebidas, incluyendo no alcohólicas, de cerveza y bebidas alcohólicas fermentadas y destiladas.
Madera	Fabricación de productos de madera
Textil	Preparación e hilado de fibras textiles, y fabricación de hilos; Fabricación de telas, tejidas y no tejidas; Acabado de productos textiles y fabricación de telas recubiertas; Fabricación de prendas de vestir de tejido de punto, y Confección de prendas de vestir

Fuente: Elaborada con información del RLGCCmrne

En el sector industrial, es posible la implementación del SHBV ya que prácticamente todas las industrias cuentan con edificios o predios alrededor de los cuales, no solo es posible la colocación de barreras verdes, sino que además, debido a la falta de espacio, pudiera ser la única forma de incorporar vegetación capaz de capturar carbono.

Tabla 2.5: Sector agropecuario

Subsector	Actividad
Ganadería	Explotación de bovinos; explotación de porcinos; explotación avícola; explotación de ovinos y caprinos, y producción de aves en incubadora

Fuente: Elaborada con información del RLGCCmrne

Tabla 2.6: Sector residuos

Subsector	Actividad
Aguas Residuales	Tratamiento de aguas residuales;
RSU y RME, disposición final	Actividades de reducción en la fuente de generación del residuo, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, y actividades de remediación de sitios contaminados con residuos.

Fuente: Elaborada con información del RLGCCmrne

En la tabla 2.6 se muestran las actividades del sector comercio y servicios, en donde destacan todas las actividades de construcción, siendo éstas, las que poseen mayor relevancia, dada la posibilidad de incorporar el SHBV en las construcciones nuevas, con la consecuente disminución de sus emisiones de efecto invernadero, desde de su planeación, y antes del inicio de su operación.

Además de obligar a las empresas a entregar información respecto a la generación de gases de efecto invernadero, las autoridades promueven las acciones para reducir dichas emisiones. Uno de los medios más eficaces para disminuir la huella de carbono es implementar acciones para lograr la **eficiencia energética**, la cual se refiere a todas las acciones que conlleven a una reducción económicamente viable de la cantidad de energía necesaria para satisfacer las necesidades energéticas de los servicios y bienes que requiere la sociedad, asegurando un nivel de calidad igual o superior y una disminución de los impactos ambientales negativos derivados de la generación, distribución y consumo de energía. Queda incluida dentro de esta definición, la sustitución de fuentes no renovables de energía por fuentes renovables de energía (LASE art.2 fracción IV). Las autoridades promueven este tipo de acciones mediante procesos de certificación.

Tabla 2.7: Sector comercio y servicios

Subsector	Actividad
Construcción	Edificación residencial; edificación no residencial; construcción de obras para el suministro de agua, petróleo, gas, energía eléctrica y telecomunicaciones; división de terrenos y construcción de obras de urbanización; construcción de vías de comunicación; otras construcciones de ingeniería civil; cimentaciones, montaje de estructuras prefabricadas y trabajos en exteriores; instalaciones y equipamiento en construcciones; trabajos de acabados en edificaciones, y otros trabajos especializados para la construcción;
Comercio	Comercio al por mayor de abarrotes y alimentos; de bebidas, hielo y tabaco; de productos textiles y calzado; de materias primas agropecuarias y forestales; de materias primas para la industria; de maquinaria y equipo agropecuario, forestal y para la pesca; de mobiliario y equipo de cómputo y de oficina, y de otra maquinaria y equipo de uso general; comercio al por menor de abarrotes y alimentos; en tiendas de autoservicio; en tiendas departamentales; de ropa, bisutería y accesorios de vestir, y de partes y refacciones para automóviles, camionetas y camiones.
Servicios educativos	Escuelas de educación superior
Actividades recreativas y entretenimiento	Parques con instalaciones recreativas y casas de juegos electrónicos
Turismo	Hoteles, moteles y similares
Servicios médicos	Hospitales y laboratorios
Gobierno	Instalaciones en las que las dependencias y entidades de la administración pública federal, estatal o municipal realizan sus funciones.
Servicios financieros	Banca múltiple; alquiler sin intermediación de bienes raíces, y inmobiliarias y corredores de bienes raíces.

Fuente: Elaborada con información del RLGCCmrne

En el **REGLAMENTO DE LA LEY DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA (RLTE)** en el Título VII de la participación voluntaria, en los **artículos del 17 al 24** establece los lineamientos y procedimientos para hacerse acreedor del **Reconocimiento de Excelencia en Eficiencia Energética**.

Asimismo, existen mecanismos mediante los cuales se pretende contar con una relación de las medidas de mitigación implementadas por las empresas y particulares, para lo cual en el **Capítulo VI Incorporación de proyectos de Mitigación, reducción o absorción de Emisiones** del RLASE, en el **artículo 26** se establece que las personas físicas o morales que hayan implementado proyectos o actividades que tengan como resultado la mitigación, reducción o absorción de Emisiones de Gases o Compuestos de Efecto Invernadero, si éstos se han realizado en el territorio nacional, podrán solicitar la inscripción de dicha información en el Registro, previo Dictamen de Validación expedido por un Organismo acreditado y aprobado para tal efecto, que certifique el resultado de dichos proyectos, por otra parte, **se considerarán como proyectos o actividades de Mitigación a aquellos que tengan como finalidad la reducción o absorción de Emisiones**; a los relativos al manejo sustentable o conservación de los ecosistemas para el aumento o conservación de los sumideros de carbono provenientes del sector forestal, y a cualquier otra actividad que tenga como finalidad el secuestro de carbono.

Es importante mencionar que en este mismo ordenamiento legal (RLASE, art. 27) se mencionan los requisitos que deben cumplir los interesados en registrar sus proyectos y actividades, lo anterior con la finalidad de evitar una doble contabilidad de los gases de efecto invernadero. En la tabla 2.8 se muestran los requisitos.

Tabla 2.8: requisitos para el registro de proyectos y actividades de mitigación de reducción y absorción de emisiones

I. Datos generales de las partes involucradas en el desarrollo del proyecto:	<p>a. Nombre, denominación o razón social, domicilio, número de teléfono y dirección de correo electrónico, así como la firma del promovente.</p> <p>b. Nombre, denominación o razón social, domicilio, número de teléfono y dirección de correo electrónico, así como las firmas de los asociados participantes.</p> <p>c. Nombre, denominación o razón social, domicilio, número de teléfono y dirección de correo electrónico del Organismo acreditado y que esté aprobado por la Secretaría o por los organismos internacionales de los que los Estados Unidos Mexicanos sea parte.</p>
II. Datos generales del Proyecto:	<p>a. Nombre o denominación</p> <p>b. Objetivo</p> <p>c. Descripción de actividades</p> <p>d. Tipo de proyecto, programa, actividad o conjunto de actividades</p> <p>e. Tecnología implementada, actividad o conjunto de actividades, y</p> <p>f. En proyectos forestales, ubicación geográfica georeferenciada y tipo de vegetación.</p>
III. De la Mitigación o reducción de Emisiones:	<p>a. Acciones de reducción, captura o absorción de Gases de Efecto Invernadero implementadas, Mitigación alcanzada y Mitigación total proyectada expresada en toneladas métricas y en Toneladas de Bióxido de Carbono Equivalente por año y total.</p> <p>b. Metodología detallada para la estimación de las reducciones de Emisiones.</p> <p>c. Plan de monitoreo.</p> <p>d. Transacciones en el comercio de Emisiones, ya sea nacional o internacional de Reducciones Certificadas, expresadas en Toneladas de Bióxido de Carbono Equivalente.</p> <p>e. En su caso, beneficiarios de las reducciones.</p> <p>f. Fecha en que se verificaron y certificaron las reducciones, así como el periodo de acreditación.</p>

Fuente: Elaborada con información del RLASE

De igual manera, existen normas oficiales mexicanas cuyo objeto es la regulación en materia de eficiencia energética de los edificios con la finalidad de minimizar la generación de gases de efecto invernadero por concepto de climatización. Por ejemplo, la **NOM-020-ENER-2011, referente a la eficiencia energética en edificaciones de la envolvente de edificios para uso**

habitacional, limita la ganancia de calor de los edificios para uso habitacional a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento, le aplica a todos los edificios nuevos para uso habitacional y las ampliaciones de los edificios para uso habitacional existentes. Si el uso de un edificio dentro del campo de aplicación de esta Norma Oficial Mexicana, constituye el 90 por ciento o más del área construida, esta Norma Oficial Mexicana aplica a la totalidad del edificio. En la tabla 2.9 se muestran las normas oficiales mexicanas en la materia.

Tabla 2.9: Normatividad en materia de eficiencia energética en edificios y aparatos de climatización

<i>Fundamento legal</i>	<i>Establece</i>	<i>Responsable o quién le aplica</i>
NOM-020-ENER-2011	Referente a la eficiencia energética en edificaciones de la envolvente de edificios para uso habitacional limita la ganancia de calor de los edificios para uso habitacional a través de su envolvente, con objeto de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento	Todos los edificios nuevos para uso habitacional y las ampliaciones de los edificios para uso habitacional existentes
NOM-018-ENER-1997	Aislantes Térmicos para Edificaciones. Características, límites y métodos de prueba.	Laboratorios de prueba
NOM-011-ENER-2006	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo central, paquete o dividido. Límites, métodos de prueba y etiquetado	Acondicionadores de aire tipo central, tipo paquete o tipo dividido, operados con energía eléctrica, en capacidades nominales de enfriamiento de 8 800 W hasta 19 050 W que funcionan por compresión mecánica y que incluyen un serpentín evaporador enfriador de aire, un compresor y un serpentín condensador enfriado por aire o por agua, comercializados en los Estados Unidos Mexicanos
NOM-021-ENER/SCFI-2008	Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado	Acondicionadores de aire tipo cuarto nuevos, con o sin calefacción, con condensador enfriado por aire y con capacidades de enfriamiento hasta de 10 600 watts, nacionales y extranjeros que se comercializan en los Estados Unidos Mexicanos. No aplica para acondicionadores de aire tipo cuarto divididos
NMX-AA-164-SCFI-2013	Edificación sustentable - criterios y requerimientos ambientales mínimos	Especifica los criterios y requerimientos ambientales mínimos de una edificación sustentable para contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguran su viabilidad, habitabilidad e integración al entorno urbano y natural. Es voluntaria para todas las edificaciones dentro del territorio nacional, públicas o privadas, uso mixto, habitacional, comercial, de servicios o industrial. Aplica a las edificaciones y sus obras exteriores. Ya sea individuales o en conjuntos de edificios, nuevas o existentes, sobre uno o varios predios, en arrendamiento o propias. Se aplica a una o varias de sus fases: diseño, construcción, operación, mantenimiento y demolición, incluyen

3. HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL COMO SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Como ya se describió anteriormente, dentro de los impactos ambientales relacionados con la operación de los edificios residenciales, se encuentran los rubros de consumo de agua y generación de agua residual. Una de las tecnologías usadas en la mitigación de dichos impactos son los humedales artificiales para la depuración de agua residual doméstica. En este apartado se describen los humedales artificiales.

3.1 Definición de humedales artificiales de flujo subsuperficial

Delgadillo (2010) dice que son sistemas de fitodepuración de aguas residuales que consisten en el desarrollo de un cultivo de macrofitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrofitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual es depurada progresiva y lentamente. Mientras que para EPA (2000) los humedales artificiales o humedales construidos con flujos subsuperficiales, consisten en un lecho de estructura de piedra estratificada que tiene, en un extremo del lecho de piedra, un instrumento afluente que introduce las aguas residuales en forma distribuida y un instrumento efluente de recolección, en el extremo opuesto del lecho, para recoger y descargar el efluente tratado del lecho, en donde también se puede utilizar vegetación en forma de plantas, las que se colocan estratégicamente en la superficie del lecho de piedra (figura 3.1). Más recientemente se ha introducido el término "Jardín de Aguas Residuales" utilizado para sistemas que utilizan aguas residuales para el cultivo de plantas. Los jardines de aguas residuales normalmente soportan diferentes tipos de árboles y / o arbustos contra la única especie de la siembra en los humedales artificiales. Nair (2008) considera el jardín de aguas residuales como un medio para el tratamiento de aguas residuales y mejorar la vegetación y la biodiversidad de las zonas rurales, que también puede ser implementado en áreas urbanas en asociación con parques y espacios abiertos.

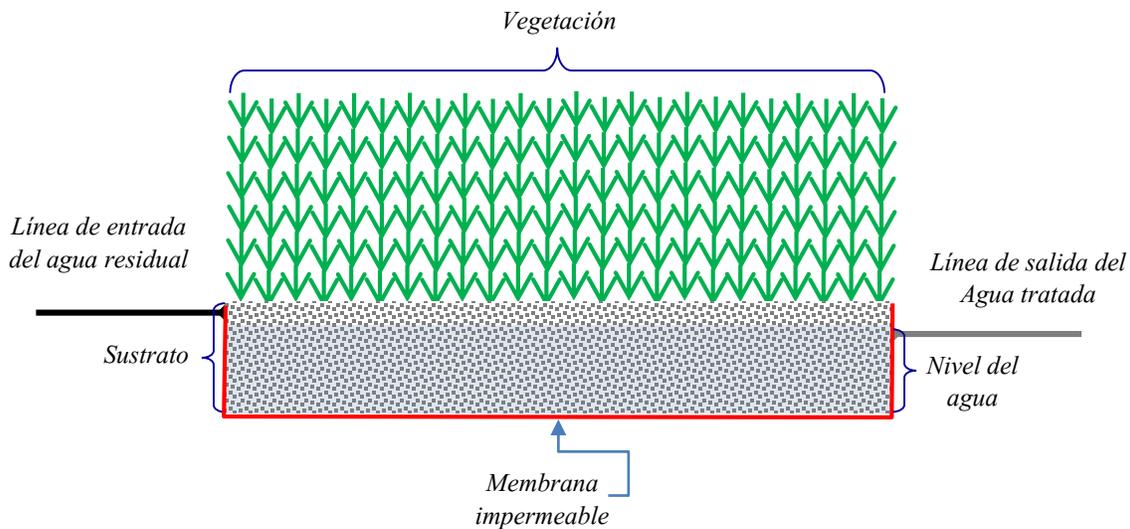


Figura 3.1: Esquema de un humedal de flujo subsuperficial

3.2 Eficiencia de los humedales artificiales

Los humedales naturales representan una forma natural de depuración del agua, donde la carga orgánica de "contaminación" puede ser removida por la acción conjunta de una variedad de especies tanto de microorganismos, especies vegetales y especies animales, mediante procesos como los ciclos biogeoquímicos. En un humedal construido o artificial, solo se intenta reproducir las condiciones

ambientales que permitan el desarrollo e interacción de las diferentes especies participantes para lograr obtener la degradación de la materia orgánica y remoción física de otros contaminantes como los sólidos.

Los humedales artificiales han sido utilizados y estudiados por largo tiempo, por lo que a la fecha se ha demostrado que son eficaces en la eliminación de los principales contaminantes físicos, químicos, y microbiológicos, por ejemplo, en cuanto a *E. coli* la eficiencia de remoción cumple con las directrices de la OMS (Barbagallo et. al. 2014), en el caso de nitrógeno y fósforo también es eficaz, aunque se incrementa el tiempo y espacio requerido (EPA 2000), asimismo se ha demostrado su utilidad en la remoción de metales (Sabeen et. al.2013) con la desventaja de que dichos contaminantes son removidos del agua pero permanecen en el ecosistema (EPA, 2000).

En la tabla 3.1 se mencionan algunos ejemplos de eficiencia de remoción de los principales contaminantes presentes en el agua residual doméstica, ya que este sistema de tratamiento se utiliza en la mayoría de los casos para este tipo de agua residual.

Tabla 3.1: Ejemplos de eficiencia de remoción de los principales contaminantes presentes agua residual doméstica de los humedales de flujo subsuperficial

Parámetro	DBO	SS	DQO	Nitrógeno	Coliformes T	Coliformes F	Fosforo	CT
Eficiencia de remoción (%)	92 [*] 90 ^{*****}	95 [*] 80 ^{*****}	95 ^{**} (estiaje) 90 ^{**} (lluvias)	80 ^{*****} 88 ^{*****}	93.6 % ^{****}	96.1% ^{****} 99.9% ^{*****}	85 ^{*****}	90% [*]

Fuente: ^{*} Otálora (2011), ^{**} Romero et. al. (2009), ^{***} Fernández (2000), ^{****} Rivas et. al. (2000), ^{*****} Pérez et. al. (2014)

Por otra parte, estos sistemas también presentan algunas desventajas. Al respecto Jaramillo-Gallego et. al. (2016) menciona que el uso de los humedales construidos se ha extendido a lo largo del mundo y se argumenta su fácil mantenimiento y operación, sin embargo se debe tener en cuenta su complejidad dado que constituyen un sistema biológico susceptible a variabilidad de las características del afluente y sobrecargas hidráulicas.

Al respecto, Bernal et. al. (2003) elaboró una matriz de análisis comparativo entre varios sistemas de tratamiento natural, tales como las lagunas de estabilización, los humedales de flujo libre y los humedales de flujo subsuperficial, entre otros, dónde evalúa cualitativamente parámetros que permitan decidir cuál sistema resulta más útil en las condiciones ambientales de cada caso. En la tabla 2.2 se muestra la evaluación correspondiente al sistema de humedal de flujo subsuperficial.

Tabla 3.2: Evaluación cualitativa de características del sistema de humedal de flujo subsuperficial

Parámetro	Calificación
Remoción de DBO	Alta
Remoción de sólidos	Alta
Remoción de nitrógeno	Alta
Simplicidad de operación y mantenimiento	Media
Capacitación de personal para operación y mantenimiento	Media
Generación de lodos	Baja
Proliferación de vectores	Baja
Requerimientos de energía y equipos	Baja
Requerimientos de área	Baja
Requerimientos de vegetación tolerante al agua	Alta
Dependencia de características del suelo	Alta

Fuente: elaborada con información de Bernal et. al. (2003)

3.3 Especies utilizadas en humedales artificiales

Las plantas utilizadas en los humedales artificiales diseñados para tratamiento de aguas residuales, deben: (1) ser tolerantes de cargas orgánicas y nutrientes elevados, (2) tener órganos inferiores (raíces y rizomas) bien desarrollados para proporcionar sustrato para bacterias adheridas y oxigenación (limitada) de las zonas adyacentes a las raíces y rizomas y (3) tener gran cantidad de biomasa aérea para el aislamiento de invierno en las regiones frías y templadas y para la eliminación de nutrientes a través de la recolección (Vymazal, 2011).

Las principales especies utilizadas en los humedales artificiales son:

- *Phragmites*
- *Typha*
- *Arundo donax*

De las especies vegetales presentes en los humedales artificiales, el *Arundo donax* es ampliamente utilizada (Tzanakakis et. al. 2007, Barbagallo et. al. 2014, Sabeen et. al. 2013, Idris et. al. 2012, Toscano et. al. 2015, Chang et. al. 2012, Tuttolomondo et. al. 2015), debido a características tales como:

- Raíces bien en forma de rizomas que maximizan la superficie de adherencia de la película de microorganismos encargados de la degradación de los contaminantes orgánicos.
- Resistencia a elevadas concentraciones de contaminantes orgánicos
- Rápido crecimiento
- Alta productividad de biomasa que funciona como amortiguador térmico en invierno para evitar que las bajas temperaturas inhiban la actividad microbiana.

El *Arundo donax* no solo tiene características ideales para su uso en humedales artificiales y jardines de aguas residuales, recientemente ha cobrado importancia como cultivo energético (Mariani, 2010), debido a sus altas tasas de producción de biomasa, la cual se incrementa con el riego con agua residual (Mavrogianopoulos et. al. 2002, Barbagallo et. al. 2014). La producción de biomasa se puede correlacionar directamente con su potencial de fijación de carbono. En cuanto a las opciones de utilización, las plantas poseen un alto valor y / o versatilidad económica, entre las opciones se encuentran artesanías, fertilizantes, alimentos para animales, materiales de construcción, fabricación de papel y productos farmacéuticos (Chiarawatchai et. al. 2008).

4. USO DE SISTEMAS DE VEGETACIÓN PARA BIOCLIMATIZACIÓN

El impacto ambiental derivado de la generación de GEI provenientes del uso excesivo de energía por concepto de climatización de edificios, sobre todo en climas cálidos en nuestro país, requiere la implementación de acciones inmediatas. Más del 50% de la energía producida en el mundo está destinada a la climatización de edificios (Ramírez, 2011).

Con la finalidad de contrarrestar estos impactos negativos, en los últimos años se han desarrollado diversas “estrategias arquitectónicas bioclimáticas”, cuyo objetivo básico es generar ambientes con temperaturas que resulten más agradables, empleando elementos que generen, acumulen y transmitan calor (Garrido, 2014). En los párrafos siguientes se describe la aplicación de la vegetación como estrategia bioclimática.

4.1 Conceptos básicos sobre bioclimatización

Para comprender como los sistemas de vegetación pueden contribuir a la bioclimatización de las edificaciones, es necesario en primer lugar revisar algunos conceptos básicos acerca la bioclimatización.

Confort

Eficiencia, calidad y comportamiento de los elementos que intervienen en una situación de bienestar, salud, comodidad y productividad de los usuarios. Estos elementos están divididos en térmicos, lumínicos, visuales y acústicos (Bernal, 2011).

Tabla 4.1: condiciones ambientales de confort

<i>Parámetro</i>	<i>Valor de confort</i>
<i>Temperatura</i>	<i>20 – 25°C</i>
<i>Humedad</i>	<i>30 – 60 %</i>
<i>Presión del aire</i>	<i>Positiva 5 – 10 %</i>
<i>Ventilación</i>	<i>Renovación constante del aire para su purificación</i>
<i>Iluminación</i>	<i>Depende de la actividad que se realiza en cada espacio</i>
<i>Ruido</i>	<i>45 – 60 dB</i>

Fuente: elaborado con información de Bernal (2011)

El confort térmico es una sensación neutra de la persona respecto a un ambiente térmico determinado. Según la norma ISO 7730, el confort térmico “es una condición mental en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico” (Penichet, 2011).

Bioclimatización

El término bioclimático surge como adjetivo calificativo que trata de agrupar aquella arquitectura que aprovecha todos los factores climáticos y ambientales del sitio con el fin de lograr condiciones de bienestar y comodidad para los usuarios, que hacen un uso eficiente de la energía y los recursos naturales y que impacta lo menos posible al entorno o ecosistema en que se ubica (Fuentes, 2011).

Estrategias arquitectónicas bioclimáticas

De acuerdo con De Garrido (2014) las estrategias arquitectónicas bioclimáticas se refieren a estructuras arquitectónicas parciales que persiguen objetivos básicos para alcanzar el confort al interior del edificio, mediante la autorregulación térmica. Existen 4 tipos:

- a) Estrategias bioclimáticas para generar calor*
- b) Estrategias bioclimáticas para generar fresco*
- c) Estrategias bioclimáticas para acumular fresco o calor*
- d) Estrategias bioclimáticas para transferir fresco o calor*

Refrigeración evaporativa

También conocido por humidificación adiabática. Es un proceso que utiliza el efecto de la evaporación del agua como pozo térmico. El agua, para evaporarse (pasar del estado líquido al vapor), requiere de suministro de calor (calor latente de vaporización). La evaporación del agua provoca un enfriamiento del aire y del agua. Como ejemplo en la naturaleza, los árboles y la vegetación en general son poderosos enfriadores y humidificadores del ambiente. Este proceso tiene un límite teórico: cuando el aire alcanza la saturación, no pudiendo absorber más vapor de agua. El incremento de humedad que experimenta el aire no suele ser crítico para el confort, salvo que haya unos altos niveles de temperatura (Penichet, 2011).

Sistemas pasivos de bioclimatización

Los sistemas pasivos de acondicionamiento bioclimático son aquellos que no hacen uso de fuentes no renovables de energía y por tanto emplean soluciones alternativas para llegar al confort térmico en la vivienda. Los medios que permiten el enfriamiento pasivo son los depósitos energéticos ambientales, los cuales reciben el calor descargado por los sistemas activos y están divididos en tres: la atmósfera, la bóveda celeste y el subsuelo (Haro, 2009).

Los sistemas pasivos se fundamentan en el control de las variables climáticas en el interior de las edificaciones mediante el uso racional de las formas y de los materiales utilizados en arquitectura, incidiendo fundamentalmente en la radiación solar, facilitando o limitando su incidencia y utilizando los aislamientos y la inercia térmica de los materiales como sistemas de control y amortiguamiento térmico. La elección de los vidrios y del material de construcción de los forjados, cerramientos, tabiquería y estructuras se supedita a la obtención de los resultados prefijados (d'Amico, 2014).

Sistemas activos de bioclimatización

Los sistemas activos, por el contrario, aplican directamente las nuevas tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables, como la solar (para producción de agua caliente sanitaria, calefacción o energía fotovoltaica), la energía eólica o la biomasa. En este sentido habría que hacer una primera distinción entre aquellas técnicas probadas y cuantitativamente rentables en todas condiciones, como es la energía solar para ACS (agua caliente sanitaria), o la energía eólica, de aquellas otras cuya aplicación es más discutible en términos de rentabilidad, como la fotovoltaica. También entrarían en este apartado todos aquellos sistemas de ahorro energético de equipos tradicionales, como los que suponen las centrales de cogeneración y todos aquellos otros sistemas de control ambiental que necesitan un gasto inicial de energía para su correcto funcionamiento: sistemas móviles de parasoles, domótica, sistemas variables de iluminación, etc. (d'Amico, 2014).

4.2 Aplicación de la Bioclimatización

Por tal motivo, en los últimos años, la aplicación de estrategias de bioclimatización en arquitectura, poco a poco ha dejado de ser una opción, para ir convirtiéndose en una obligación (Huelsz et. al. 2011). También en el inciso 1.2 se menciona como la normatividad aplicable en la materia cada vez es más estricta al respecto.

Las energías pasivas como el viento, la luz, la sombra en el trópico, la lluvia y la vegetación, son recursos indispensables para insertar el proyecto arquitectónico en el entorno. Es por esto que la arquitectura bioclimática es el camino idóneo (Stagno, 2011).

En la mayoría del país las edificaciones tienen que incorporar tecnologías de acondicionamiento térmico, sin embargo, en gran parte de ese territorio el uso de diseño bioclimático y sistemas pasivos o de bajo consumo de energía para la climatización son suficientes para alcanzar el confort.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta que estas estrategias de bioclimatización deben cumplir con otros requisitos. Uno de los principales radica en la accesibilidad de estos instrumentos para la mayor parte de la población, es decir, la replicabilidad de las soluciones bioclimáticas por su potencial de repetición se convierte entonces en una condición de la arquitectura sostenible (Stagno, 2011).

Es importante mencionar que para maximizar la eficiencia térmica de los elementos de la envolvente y disminuir el uso de sistemas de climatización en edificaciones es necesario complementar los siguientes aspectos: El primero es realizar un diseño congruente con las condiciones bioclimáticas de su localización, realizando una correcta orientación de las fachadas para aprovechar la energía solar, la iluminación y la ventilación natural del medio. El segundo aspecto, es la utilización de materiales constructivos adecuados, la instalación de equipos de iluminación de bajo consumo de energía y la incorporación de azoteas y muros verdes en las edificaciones residenciales y comerciales (Molina)

4.3 Aplicación de los sistemas de vegetación en bioclimatización

Desde siempre, para la humanidad, la vegetación ha sido un elemento importante en la arquitectura, no solo para satisfacer una necesidad de protección o como decoración, sino como elemento esencial para determinar el ambiente físico inmediato, ya sea como vallado, pantalla visual, acústica, contra el viento, la lluvia, el sol.

Los efectos de la vegetación en el consumo energético se puede estudiar desde dos puntos de vista, uno a nivel global, donde se analiza la presencia de la vegetación en una zona determinada, fijándose sobre todo en la distribución y en la proporción de esta con respecto a la construcción y otra más a detalle tomando en cuenta los efectos microclimáticos, por ejemplo en una calle o en una casa aislada (Ochoa 1999)

La vegetación funciona como el aire acondicionado de la naturaleza, para ello utiliza el mecanismo de la refrigeración evaporativa descrita con anterioridad. El agua se evapora desde las hojas. La evaporación desde los vegetales, está relacionada con dos tipos de factores, por un lado los factores ambientales (humedad, temperatura, etc.), y por otro los factores atribuibles a las especies vegetales (volumen de agua disponible en la planta, tamaño, forma y cantidad de hojas, etc).

La forma en que actúa la vegetación en el microclima es absorbiendo un porcentaje importante de la radiación solar sin llegar a calentarse debido a que la energía absorbida se libera por el fenómeno de evapotranspiración. Por otra parte retiene el agua procedente del riego, con lo que se produce una reducción adicional de la temperatura provocada por la evaporación de dicha agua a nivel del suelo (Penichet, 2011).

De esta manera, la existencia de vegetación en un sitio modifica de manera importante el microclima alrededor. Los árboles influyen en el ambiente físico. En los lugares donde el clima es caluroso y soleado ayudan a reducir las temperaturas, ya que producen sombra e interceptan, absorben y reflejan la radiación solar. También funcionan como “aires acondicionados” de la naturaleza por el efecto que causa la evaporación del agua de sus hojas en el proceso de la transpiración. Un árbol adulto de una ciudad puede transpirar 380 l de agua en un día, produciendo un efecto de enfriamiento equivalente a 5 aires acondicionados normales para una habitación, trabajando 20 horas diarias, una hectárea de coníferas de composición media transpira unos 3000 m³ de agua durante el periodo vegetativo. Para evaporar ese volumen de agua se requieren 18 millones de kilocalorías, las que deben ser tomadas del aire, produciendo su enfriamiento (Vicente, 2012).

Hablando de medios urbanos, específicamente en edificios, según lo menciona Sosa y Siem (2004), la vegetación que se coloca en elementos verticales absorbe la radiación solar, aísla térmicamente y sombrea los cerramientos, y al mismo tiempo refresca el aire que circunda, por medio de la transpiración del vapor de agua que realizan las plantas.

La vegetación se distingue de los otros elementos por su aspecto eventualmente estacional (puede perder hojas, tener flores) y por el hecho que su eficacia depende del crecimiento de la planta. También ofrece una protección parcial: filtra la radiación, aunque no la evita. También reducen la radiación nocturna hacia el firmamento, el follaje constituye un “cielo” para el suelo bajo el árbol y su temperatura radiante es superior a la del firmamento. El descenso de la temperatura está por tanto limitada a la noche, pero las diferencias de T en el suelo son poco importantes en las regiones boscosas. (Ugarte).

Sin embargo, el uso de sistemas de vegetación como medio pasivo de bioclimatización, aún no se ha generalizado, como ejemplo, en un estudio realizado en Temixco, los resultados mostraron que el porcentaje de viviendas con uso adecuado de vegetación o árboles es muy bajo (3% o menos), siendo el porcentaje del total de la muestra menor a 0.5%. Estos resultados señalan el potencial que existe para mejorar el confort térmico si se toma en cuenta este aspecto (Huelsz et. al. 2011).

*El **aire acondicionado vegetal** utiliza este potencial de refrigeración proporcionado por las plantas, además de servir como filtro de contaminantes del aire, es decir, dos en uno. En un sistema de aire acondicionado convencional parte de la humedad que contiene el aire se condensa en el aparato, el aire seco que sale de éste **reseca las mucosas y es realmente incómodo e insano**. En el sistema del aire acondicionado vegetal el aire se recircula a través de un jardín vertical lo que provoca en las plantas una gran evapotranspiración, ya que necesitan enfriarse a sí mismas. Así, de manera natural, se refrigera todo el aire necesario para mantener la estancia a una temperatura adecuada y, además, existe un aporte de humedad al aire, por lo que se genera un **ambiente saludable** (Sanz, 2010).*

Otro factor que contribuye a una estabilización de la temperatura interna de las áreas arboladas es la escasa circulación de aire en su interior y el menor recambio por masas exteriores. Este hecho es muy importante, ya que en el invierno la atmósfera interna es más templada que la exterior, sucediendo lo contrario en el verano, acusando el aire interior una temperatura más baja que la externa. Esta función atemperadora de las áreas arboladas es similar a la que ejercen los grandes volúmenes de agua (Vicente 2012).

La vegetación, ofrece una protección contra los vientos fuertes. Barreras vegetales, avenidas de árboles, enredaderas, hiedras aumentan la rugosidad para el desperdicio del aire: la velocidad del viento se reduce y el desperdicio por convección en los edificios disminuye. En los sitios donde la biodiversidad haya sido alterada es recomendable restaurarla. Incorporar especies ajenas a la zona es alterar el ecosistema. Investigar cuáles árboles se dan en la zona y reforestar con ellos es más ecológico que poner cualquier árbol. Hay árboles urbanos porque sus raíces no ocasionan años y otros para fines diversos (Ugarte).

El uso de infraestructura verde es cada vez más común, y aunque no existe consenso sobre una clasificación general para esta, se pueden distinguir cuatro categorías principales: (a) la copa de los árboles; (b) los espacios abiertos verdes; (c) los techos verdes; y (d) los sistemas verticales de vegetación. (Koc et. al. 2016), a su vez, los sistemas verticales de vegetación pueden agruparse en fachadas verdes con plantas trepadoras, o muros verdes con plantas cultivadas sobre estructuras de soporte integradas a las paredes externas del edificio (Cuze 2016). La aplicación de fachadas verdes, es una característica establecida del diseño urbano contemporáneo, y puede ofrecer múltiples beneficios ambientales tanto en edificios nuevos como en edificios existentes, además puede ser un enfoque sostenible en términos de ahorro de energía considerando materiales utilizados, nutrientes, agua necesaria y preservación eficiente de edificios (Perini et. al. 2013).

Las barreras verdes son otro tipo de sistemas de vegetación que pueden ser empleados en bioclimatización. Estos sistemas, también llamados barreras vivas, son arreglos lineales para el establecimiento de especies vegetales destinadas a minimizar la velocidad del viento, conservar la humedad, delimitar terrenos, proporcionar sombra y mejorar el paisaje (Fernández et. al. 2009). En un principio, su función primordial era la protección contra el viento, actualmente también se usan como amortiguadores acústicos. En este trabajo se plantea la posibilidad de aprovechar su capacidad de proporcionar sombra para usarlo como sistemas de amortiguamiento térmico para edificaciones. Las barreras verdes presentan las desventajas de que, al usar especies vegetales arbóreas y arbustivas, requieren suficiente espacio para su instalación y tardan periodos relativamente largos de tiempo para crecer y proporcionar la protección requerida. Sin embargo, si se eligen especies de pastos de rápido crecimiento, como el bambú o el carrizo, es posible reducir el tiempo de cobertura. Además, en tal caso su geometría más o menos regular contribuye a la reducción del espacio requerido para su instalación.

Tabla 4.2: Tipo de vegetación usada en cada tipo de sistema de vegetación. Aplicación de los sistemas de vegetación en diversos tipos de infraestructura.

	Azoteas verdes (Cubiertas vegetales)	Muros verdes (Jardines verticales)	Fachadas verdes	Barreras verdes (barreras rompevientos)	SHBV	Áreas ajardinadas (jardines)
Estrato herbáceo	✓	✓	✓		✓	✓
Estrato arbustivo				✓		✓
Estrato arbóreo				✓		✓
Edificios individuales	✓	✓	✓		✓	✓
Conjuntos urbanos						✓
Zonas agrícolas				✓		
Vías de comunicación				✓		

En la tabla 4.2 se muestra el tipo de vegetación que tradicionalmente se utiliza en los sistemas de vegetación asociados tanto a entornos urbanos como a zonas agrícolas. Se distingue claramente que las barreras verdes, en lo que respecta a entornos construidos, solo se usan en vías de comunicación, y el tipo de vegetación utilizado se centra en los estratos arbustivo y arbóreo. Lo anterior derivado principalmente de la necesidad de cubrir grandes extensiones de terreno, además de requerir alturas considerables.

Una de las principales aportaciones de este trabajo radica precisamente en la combinación de un sistema de vegetación como son las barreras verdes, con un tipo de vegetación herbácea (aunque se trata de pastos gigantes), lo que permite por un lado ampliar su aplicación como amortiguamiento térmico y acústico en un sistema "micro", es decir a nivel de un edificio (o una casa), y no requerir extensiones de terreno demasiado grandes. Por otro lado, preferir las barreras verdes por encima de los muros o azoteas verdes ayuda a disminuir los costos de instalación y operación.

5. *Captura de carbono*

La generación de CO₂ derivado de la operación de los edificios residenciales y de servicios, representa uno de los principales impactos ambientales actuales, que además contribuyen de manera importante a la problemática del cambio climático. Por lo que resulta de vital importancia el desarrollo y aplicación de medidas que permitan detener y revertir esta problemática. De acuerdo con Galeana-Pizaña et. al. (2013), las opciones de mitigación de los GEI pueden ser agrupadas en tres: La primera categoría incluye a las actividades que evitan la liberación del carbono secuestrado, la segunda contiene actividades que capturan CO₂, y la tercera opción encierra actividades que sustituyan el uso de combustibles fósiles.

La segunda opción, referente a la captura de carbono mediante el aprovechamiento del proceso de fotosíntesis es la estrategia que se pretende utilizar en el SHBV. Algunas acciones específicas de esta segunda opción son (IPCC, 2007):

- a) Aplicaciones tempranas de la captura y almacenamiento del CO₂: entendida como la captura de carbono en el mismo sitio donde se está generando, siendo los responsables los mismos generadores.*
- b) Incremento del área forestal local: Refuerza la idea de capturar el carbono lo más cercanamente posible a la fuente de generación.*
- c) Manejo de productos de madera cosechada: utilizar la biomasa generada en la fabricación de artículos con una larga vida útil que permita maximizar el periodo de tiempo que el carbono permanece secuestrado, evitando así que vuelva a su forma de CO₂ y que se almacene en el reservorio de la atmósfera.*

Cabe resaltar que la primera de estas acciones, referida a la captura de CO₂ “in situ”, es precisamente uno de los objetivos que se persigue con el desarrollo del SHBV.

5.1 Ciclo del carbono

El entendimiento del ciclo del carbono resulta indispensable para, en principio detener y posteriormente revertir la acumulación de CO_2 en la atmósfera, la cual como es bien sabido es una de las causas principales del cambio climático que sufre el planeta actualmente.

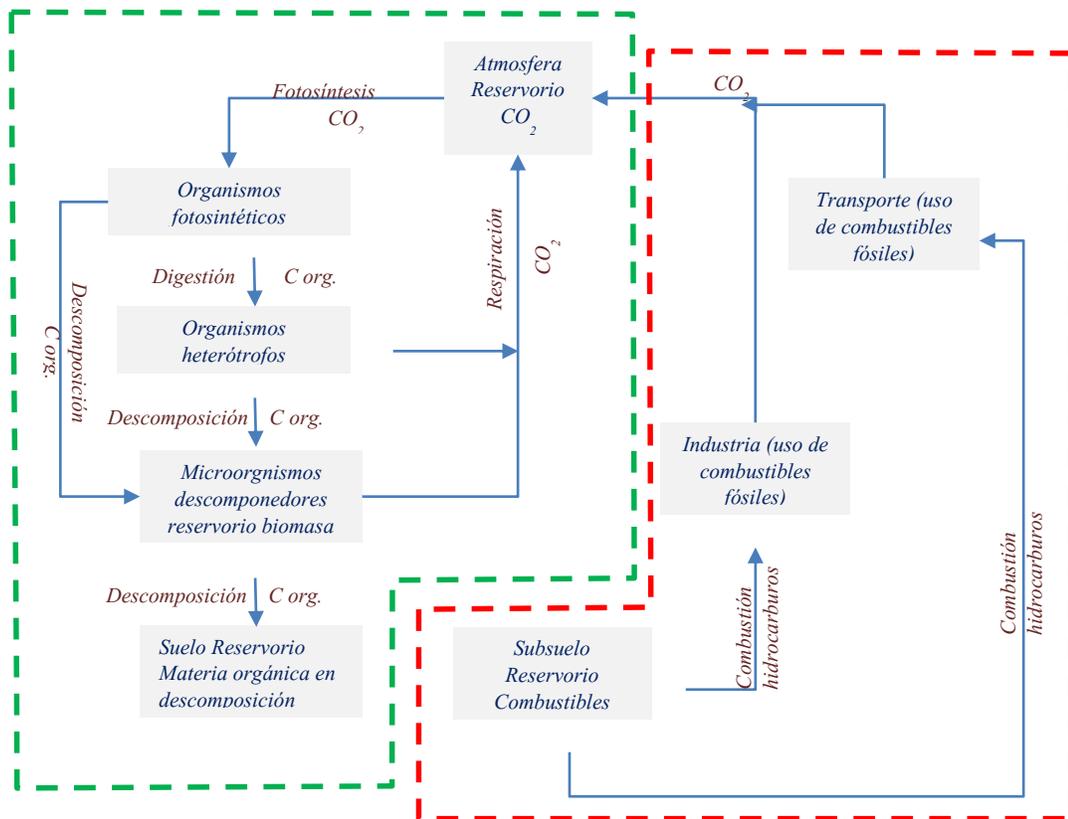


Figura 5.1: Ciclo biogeoquímico del carbono

En la figura 5.1 se muestra un esquema simplificado del ciclo del carbono acotado a ecosistemas terrestres y actividad humana. Dentro de la línea punteada verde se encuentra la actividad “natural” correspondiente a los diferentes tipos de organismos. Con la línea punteada roja se agruparon las principales actividades “humanas” que contribuyen a la generación de CO_2 mediante la combustión de combustibles fósiles. Se hizo esta diferenciación con la finalidad de evidenciar la necesidad de encontrar un equilibrio entre ambos circuitos, ya que hasta ahora, se encuentran desconectados, tal y como se muestra en la figura. Este equilibrio puede alcanzarse incrementando el flujo de CO_2 del reservorio de la atmósfera donde se encuentra actualmente, hacia el reservorio de la biomasa vegetal.

5.2 Mecanismos de captura de carbono: plantas C3, C4 y CAM

Aunque todos los organismos fotosintéticos tienen la capacidad de obtener CO_2 del aire y transformarlo mediante el proceso de fotosíntesis en moléculas de glucosa, que posteriormente son utilizadas en su metabolismo, existen diferentes vías metabólicas para llevar a cabo el secuestro del CO_2 .

La primera de estas vías metabólicas se denomina C3 debido a que la fijación de CO_2 se realiza en mediante el ciclo de Calvin en una molécula de 3 carbonos. Se puede decir que es el mecanismo “normal” ya que la mayoría de los organismos fotosintéticos funcionan de esta manera.

En el denominado C4, la diferencia radica que el CO₂ atmosférico es fijado en una molécula de 4 carbonos, la cual se almacena en una célula del mesófilo para ser liberada posteriormente y entrar en una célula del haz vascular donde ocurre el mismo proceso que en C3.

En el caso del CAM la fijación de CO₂ se realiza de la misma forma que en el C4, la diferencia se encuentra en el momento de realización, ya que en este tipo de plantas, este proceso solo ocurre por la noche. La molécula resultante se almacena en las vacuolas para ser utilizada posteriormente (en el día), en el ciclo de Calvin. Con ese mecanismo, se evita la continua y obligatoria apertura de estomas para la entrada de CO₂, con la finalidad de evitar la salida de agua por transpiración. Este mecanismo es mucho menos frecuente que el C3 y solo se presenta en especies expuestas a condiciones ambientales con restricciones importantes de humedad.

La ruta metabólica C3 se encuentra en los organismos fotosintéticos como las cianobacterias, algas verdes y en la mayoría de las plantas vasculares. Las vías metabólicas C4 y CAM se encuentran solo en plantas vasculares. De las especies estudiadas hasta el momento aproximadamente el 89% son C3, el 10% son CAM y el restante 1% son C4; adicionalmente se conocen unas cuantas especies que son intermedias C3-C4 (Benavides, 2003).

Se piensa que la ruta metabólica C4 es la más eficiente en cuanto a fijación de CO₂. Se encuentran entre ellas las especies cultivadas de mayor productividad agrícola, como el maíz (*Zea mays*), el sorgo (*Sorghum bicolor*) o la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), y algunas de las malas hierbas agresivas, como *Cynodon dactylon*, *Sorghum halepense*, *Cyperus rotundus* y diversas especies de *Amaranthus* (cita). Sin embargo, en diferentes estudios ha sido demostrado que bajo condiciones de enriquecimiento atmosférico con CO₂ o mantenimiento de niveles óptimos de humedad en el suelo las plantas C4 no muestran ventaja significativa sobre las C3 (Black, 1986).

La ruta metabólica presente en el *Arundo donax* corresponde al C3, que además, en el SHBV se encuentra en las condiciones ambientales descritas en el párrafo anterior. Ya que si se instala en zonas urbanas, la atmósfera se encuentra enriquecida con CO₂ proveniente de vehículos automotores e industrias, en cuanto a la humedad, en el SHBV, esta no depende de la precipitación pluvial, tampoco requiere de un suministro de agua extra, debido a que el riego proviene de la generación de agua residual gris, y por lo tanto está garantizado. De esta forma, el crecimiento de la biomasa vegetal y en consecuencia la captura de carbono alcanza niveles dignos de ser tomados en cuenta.

6. USO DE SISTEMAS DE VEGETACIÓN PARA AMORTIGUAMIENTO ACÚSTICO

La contaminación acústica es un fenómeno cada vez más preocupante en las grandes urbes, donde la generación de ruido suele alcanzar niveles que impactan de manera importante al bienestar de la población. Este fenómeno domina el paisaje sonoro de las grandes ciudades, configurando un entorno saturado, no sólo de altos volúmenes, sino de una presencia sonora continua que no da tregua (Domínguez 2014). Una prueba de la percepción de los ciudadanos mexicanos al respecto, es el número de denuncias por ruido realizadas en la Ciudad de México en el 2015, que representa el 25% del total de denuncias recibidas por contaminación en la Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento territorial de la Ciudad de México (PAOT 2016).

Las actividades cotidianas de la sociedad actual dan como resultado la emisión de ruido en niveles que dañan la salud de las personas y ocasionan desequilibrio en el ambiente. Con la finalidad de contrarrestar estas afectaciones se han desarrollado diferentes medidas aplicables en materia de control de la contaminación por ruido. En este apartado se hace en primer lugar, una revisión de los ordenamientos legales existentes en México aplicables en materia de ruido ambiental. En segundo lugar se describe el marco conceptual para la medición de los niveles de ruido, y por último se hace una revisión acerca del uso de sistemas de vegetación como medida de mitigación del ruido ambiental.

6.1 Marco legal aplicable en materia de ruido

Al igual que en la mayoría de los países, en México existen ordenamientos legales encargados de regular las emisiones de ruido de fuentes fijas (Reglamento para la Protección al Ambiente contra la Contaminación Originada por la Emisión de Ruido (RPACCOER) de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente, NOM-081-SEMARNAT, NADF-005-AMBT-2013). En el RPACCOER, reciben especial interés, como fuentes fijas, los establecimientos industriales y comerciales, circos, ferias y otras actividades de ocio, aeródromos, aeropuertos y helipuertos, así como instalaciones ferroviarias. Asimismo, en estos ordenamientos se establece la obligación de los responsables de las fuentes fijas (emisores) de cumplir con los límites máximos permisibles establecidos. Por tal motivo, es fácil identificar la necesidad que existe de aplicación de medidas de control de ruido por parte las fuentes fijas. A continuación se hace una breve revisión del marco normativo en materia de ruido.

LGEEPA, CAPÍTULO VIII, ARTÍCULO 155

Quedan prohibidas las emisiones de ruido... en cuanto rebasen los límites máximos establecidos en las normas oficiales mexicanas que para este efecto expida la Secretaría, considerando los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de contaminantes en el ambiente que determine la Secretaría de Salud. En la construcción de obras o instalaciones que generen ruido así como en la operación o funcionamiento de las existentes deberán llevarse a cabo acciones preventivas y correctivas para evitar los efectos nocivos de tales contaminantes en el equilibrio ecológico y el ambiente.

Reglamento para la protección del ambiente contra la contaminación originada por emisión de ruido

ARTÍCULO 11

El nivel de emisión de ruido máximo permisible en fuentes fijas es de 68 dB (A) de las seis a las veintidós horas, y de 65 dB (A) de las veintidós a las seis horas.

Estos niveles se medirán de forma continua y semicontinua en las colindancias del predio durante un lapso no menor a quince minutos conforme a las normas correspondientes.

ARTÍCULO 15

Los establecimientos industriales, comerciales, de servicio público y en general toda edificación, deberán construirse de tal forma que permitan un aislamiento acústico suficiente para que el ruido

generado en su interior no rebase los niveles permitidos en el art. 11 , al trascender a las construcciones adyacentes, a los predios colindantes o a la vía pública.

NOM-081-SEMARNAT-1994

Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido que genera el funcionamiento de fuentes fijas y el método de medición por el cual se determina su nivel emitido al ambiente. Esta norma es aplicable en la pequeña, mediana y gran industria, comercios establecidos, servicios públicos o privados y actividades en la vía pública.

Tabla 6.1: Normas técnicas en materia de ruido

<i>NMX-AA-40</i>	<i>Clasificación de ruidos</i>
<i>NMX-AA-43</i>	<i>Determinación de nivel sonoro emitido por fuentes fijas</i>
<i>NMX-AA-62</i>	<i>Determinación de nivel de ruido ambiental</i>

6.2 Marco conceptual sobre amortiguamiento acústico

*Con el afán de establecer el marco conceptual del método empleado en la determinación de la reducción de ruido por la barrera verde *Arundo donax*, a continuación se mencionan las definiciones empleadas a lo largo del método. Tanto el método como las definiciones fueron tomados de la NOM-081-SEMARNAT-1994 que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición.*

Definiciones

Fuente emisora de ruido: toda causa capaz de emitir al ambiente ruido contaminante.

Ruido: todo sonido indeseable que moleste o perjudique a las personas.

Dispersión acústica: fenómeno físico consistente en que la intensidad de la energía disminuye a medida que se aleja de la fuente.

Fuente fija: Fuentes artificiales de contaminación ambiental originada por la emisión de ruido que incluye todo tipo de industria, máquinas con motor de combustión, terminales y bases de autobuses y ferrocarriles, aeropuertos, clubes cinegéticos y polígonos de tiro, ferias, tianguis, circos y otras semejantes. La fuente fija se considera como un elemento o un conjunto de elementos capaces de emitir ruido que es emitido hacia el exterior a través de las colindancias del predio por el aire y por el suelo.

*Nivel equivalente: Es el nivel de energía acústica uniforme y constante que contiene la misma energía que el ruido producido en forma fluctuante por una fuente fija durante el período de observación. Su símbolo es *Neq*.*

Nivel 50: Es el límite inferior de todos los niveles sonoros presentes durante un lapso igual al 50% del período de observación. (Percentil 50).

*Reducción acústica: Es el decremento normalizado del nivel sonoro debido a la presencia de un elemento constructivo que impide su libre transmisión, su símbolo es *R*.*

Nivel sonoro de fondo: Es el nivel sonoro que está presente en torno a una fuente fija que pretenda medirse producido por todas las causas excepto la fuente misma.

Nivel sonoro: Es el nivel de presión acústica ponderada por una red normalizada de sonoridad o sea, el nivel de presión acústica ponderado por una curva. Se mide en decibeles (dB).

Medición semicontinua: Es la medición de un ruido fluctuante que se realiza mediante la obtención aleatoria de muestras durante el período de observación.

6.3 Antecedentes sobre aplicación de sistemas de vegetación para amortiguamiento acústico

La vegetación se ha utilizado para aislar acústicamente las zonas urbanas especialmente del ruido del tráfico (Pérez et al. 2016). Los cinturones de árboles o arbustos denominados barreras verdes, son la forma más utilizada de esta vegetación. Recientemente se han probado diversos sistemas de vegetación en edificios, incluyendo barreras vegetales, techos verdes, fachadas verdes y jardines para determinar su eficacia como amortiguadores acústicos. La mayoría de los estudios están dirigidos a determinar la capacidad de las barreras vegetales (árboles y arbustos) para reducir el ruido proveniente del tráfico de vehículos en zonas urbanas (Samara & Tsitoni 2011 Daltrop et al. 2012, Pathak et al. 2008, Posada et al. 2009). En su estudio, Van Renterghem et al. (2012) afirma que la reducción de ruido es uno de los múltiples beneficios de la incorporación de una envolvente verde en los edificios. El tipo de vegetación tiene un papel determinante en la capacidad de aislamiento acústico. De acuerdo con Yang et al. (2012), cada planta tiene su propio espectro de reducción de ruido. La atenuación del ruido mejora al combinar plantas cuya capacidad de reducción de ruido sea complementaria, espectralmente. Por ejemplo, es más eficaz usar arreglos cruzados para reducir el ruido de baja frecuencia. Si bien la longitud, anchura y altura de la vegetación son factores determinantes para la atenuación de ruido, los picos de atenuación están determinados por la especie, y el intervalo de frecuencias sonoras atenuadas depende de la complementariedad de las plantas usadas en los arreglos. Posada et al. (2009) recomienda, para el control de ruido en zonas urbanas, establecer barreras vivas anchas, largas, altas y densas. Por otra parte, la percepción de vegetación también ejerce una influencia considerable sobre la molestia de ruido nominal en una casa. Los parques de humedales y parques del jardín son capaces de reducir la molestia del ruido en un grado mayor que las colinas cubiertas de hierba (Li et al. 2010). Sin embargo, no existen trabajos dirigidos a la medición de la contribución de los sistemas de vegetación en la reducción de ruido originado por fuentes fijas puntuales, tales como establecimientos industriales, comerciales, de entretenimiento, entre otros.

7. EXPERIMENTACIÓN

Como el SHBV pretende ser una alternativa integral para dar solución a diversas problemáticas ambientales derivadas de la operación de los edificios residenciales, la experimentación está dirigida por una parte a la determinación de la posible contribución del sistema en los aspectos de amortiguamiento térmico, amortiguamiento acústico, y disminución del volumen de agua residual por transpiración.

En el caso del amortiguamiento térmico, se construyeron dos prototipos uno testigo y otro de prueba para la medición de temperatura interior y exterior y posterior comparación. En lo correspondiente al amortiguamiento acústico, se construyó una barrera verde de *Arundo donax* y después se aplicó el método establecido en la NOM-081-SEMARNAT para determinar la reducción de ruido debida a un elemento constructivo, ya que en este caso, la barrera verde se consideró el elemento constructivo. Para la determinación de la transpiración se empleó una cámara de condiciones controladas donde se introdujeron ejemplares de *Arundo donax* que fueron expuestos a condiciones extremas de temperatura y humedad, con la finalidad de reproducir las condiciones ambientales presentes en el clima cálido seco que podemos encontrar en la zona norte del país. Lo anterior con la finalidad de obtener datos que permitan estimar el volumen potencial que se puede perder por transpiración en una barrera verde de *Arundo donax*.

Asimismo, realizaron pruebas que permitan el establecimiento del sistema relacionadas con la propagación del material vegetal y la infiltración.

7.1 Selección de la especie

Se eligió la especie *Arundo donax* debido a que de manera natural crece en ecosistemas ligados a cuerpos de agua, motivo por el cual se ha empleado ampliamente en humedales artificiales. Aunado a esto, posee características que la posicionan como una de las especies con mayor producción de biomasa del planeta. En las secciones siguientes se describe la especie y se realiza una revisión acerca de su utilización en humedales artificiales y su potencial para captura de carbono derivado de su alta productividad de biomasa.

7.1.1 Descripción de la especie

La Especie *Arundo donax* es considerada como un pasto gigante por lo que se encuentra clasificada dentro del grupo de las gramíneas. En la tabla 7.1 se encuentra la clasificación completa de la especie.

Tabla 7.1: Datos generales de la clasificación de la Especie *Arundo donax*

<i>Arundo donax</i> L.	
Clase:	Liliopsida Cronq.
Orden:	Cyperales
Familia:	Gramineae
Especie:	<i>Arundo donax</i> L., Sp. Pl.: 81 (1753).
Xenótipo:	metafito epecófito/hemiagriófito.
Tipo biológico:	geófito rizomatoso

Fuente: (Sanz et. Al. 2004).

A continuación se incluye una ficha técnica (Steinmann, 2008) que contiene la descripción de la especie, empezando por la familia y subfamilia a la que pertenece

"FAMILIA GRAMINEAE*, SUBFAMILIA ARUNDINOIDEAE**

Plantas por lo general perennes, cespitosas, rizomatosas o estoloníferas, a veces sufrutescentes, hermafroditas o rara vez dioicas; culmos comúnmente huecos; hojas dísticas, rara vez deciduas, sin pseudopociolos, aurículas y ligulas abaxiales por lo general ausentes, ligulas adaxiales presentes, membranosas o en forma de línea de pelos, vainas foliares abiertas o cerradas; inflorescencias a menudo en forma de panícula, rara vez de racimo o espiga, sin brácteas fuera de las espiguillas; espiguillas unisexuales o bisexuales, con 1 a varios flósculos, por lo general comprimidas lateralmente, glumas 2, más cortas o más largas que las lemas, con una lema estéril a veces presente, desarticulándose arriba de las glumas, lema con (3)5 a 7 nervaduras, con o sin aristas, de ser aristadas con una sola arista o 3 aristas sin unirse a modo de columna en la base, pálea bien desarrollada, subigual a la lema; lodículas presentes, 2, libres o rara vez connadas en la base, carnosas, por lo general glabras, ligera a marcadamente o no vascularizadas; estambres (1)2 o 3; ovario glabro, estilos 2, por lo general libres, estigmas 2; cariopsis rolliza o comprimida, libre de la lema y la pálea, hilo punctiforme a linear, largo o corto, endospermo duro, sin lípidos; embrión por lo general grande (rara vez pequeño) en relación con el tamaño de la cariopsis. Las arundinoideae están ampliamente distribuidas a través del mundo y con-tienen alrededor de 15 géneros y 35 especies. En la zona de estudio se conocen sólo dos géneros y dos especies. En la actualidad se le considera constituida por una sola tribu, arundineae.

- 1 lema sericea; raquilla glabra Arundo*
1 lema glabra; raquilla sericea Phragmites"

"ARUNDO L.

Plantas herbáceas perennes, rizomatosas, formando grandes colonias, hermafroditas; culmos sufrutescentes, erectos o arqueados, largos, rollizos, nudos glabros, entrenudos fistulosos; vainas foliares abiertas, translapadas, glabras o pubescentes, ligulas membranosas, diminutamente ciliadas, láminas lineares a lanceoladas, sin pseudopociolos, glabras o seríceas en la base de la lámina, planas o plegadas, auriculadas o sin aurículas; inflorescencias en forma de panículas grandes, terminales, muy ramificadas y plumosas; espiguillas comprimidas lateralmente, en forma de "V", con 2 a 5 flósculos, bisexuales, desarticulándose arriba de las glumas y en la base del entrenudo de la raquilla debajo de cada flósculo; glumas 2, lanceoladas, membranáceas, más o menos iguales, más o casi tan largas como la espiguilla y las lemas adyacentes, agudas, sin arista, 3-5-nervadas; raquilla glabra, prolongada más allá del último flósculo o terminando en uno; callo pubescente; lema membranácea a hialina, con 3 a 9 nervaduras, ecarinada, vilosa, con o sin aristas terminales, aristas 0 a 3, saliendo del ápice, no geniculadas; pálea más corta que la lema, carinada, 2-nervada, sin arista; lodículas 2; estambres 3; estilos 2, libres, estigmas 2; fruto en forma de cariopsis, libre de lema y pálea, hilo corto, oblongo, embrión grande. Aénero nativo de la región del Mediterráneo y de Asia de las tres especies, una está ampliamente naturalizada en México."

"Arundo donax L., sp. Pl. p. 81. 1753	Nombre común registrado en la zona: carrizo
<p>Planta herbácea perenne o algo sufrutescente, amacollada o formando colonias densas y grandes, rizomatosa, rizomas gruesos y nudosos; culmos de 2 a 6 m de altura, erectos o arqueados, a veces ramificados en la parte distal, gruesos y lignificados, hasta de 3 cm de diámetro; nudos glabros, cubiertos por las vainas, entrenudos cilíndricos, glabros, huecos; hojas principalmente caulinares, dísticas, vainas más largas que los entrenudos y traslapándose fuertemente, glabras, lígula membranácea, de 0.4 a 1.5 mm de largo, ciliada, láminas lineares a angostamente lanceoladas, de 15 a 70(100) cm de largo, de 2 a 6(9) cm de ancho, ambas superficies glabras o ligeramente puberulentas hacia el ápice, estriadas, base más ancha que la vaina, por lo general con aurículas prominentes, éstas a veces ciliadas; inflorescencia en forma de una panícula de 30 a 70(100) cm de largo, terminal, erecta, muy ramificada, ovoide, abierta, espiguillas sobre pedicelos delgados escabriúsculos de 2 a 12 mm de largo, comprimidas lateralmente, en forma de "V", de 11 a 15 mm de largo, por lo general abiertas en el ápice, con 3 a 5 flósculos; glumas lanceoladas, subiguales, de 10 a 13 mm de largo, ápice agudo, glabras por dentro y por fuera, 3 o 5-nervadas, con el dorso aquillado o redondeado, a menudo de color púrpura; raquilla glabra; lema lanceolada, de 8 a 12 mm de largo, ápice con una arista corta saliendo entre dos dientes laterales, sericea por fuera hacia la base, nervaduras 3 a 7, pálea elíptica a oblonga, de 4.5 a 5.5 mm de largo, ápice truncado, nervaduras 2, ciliada; estambres 3, anteras de 1.8 a 2.3 mm de largo; estigmas plumosos, de 1.2 a 1.7 mm de largo; cariopsis no visto".</p>	

Debido a sus características de adaptabilidad, resistencia y reproducción, la especie *Arundo donax* ha sido utilizada ampliamente a través de la historia de la humanidad para construcciones rurales, muebles, cercas, entre otros, y más recientemente como biocombustible. Esto ha contribuido a su distribución de manera intencional, lo cual a su vez ha dado como consecuencia la dispersión de la especie de forma descontrolada hasta llegar a ser a cosmopolita. En la tabla 7.2 se muestra el origen, y la distribución nacional y mundial de la especie.

Tabla 7.2: Origen y distribución de la especie *Arundo Donax*

Origen	Distribución en el mundo	Distribución en México
<p>El área nativa de la caña es objeto de debate ya que su origen biogeográfico y evolutivo ha sido difuminado por su uso ancestral por parte del hombre. Algunos autores sugieren que <i>Arundo donax</i> es nativa de Asia, desde donde se extendió al resto del mundo. A su vez, estos datos indican que su propagación ha sido fundamentalmente vegetativa (Deltoro, 2012).</p>	<p><i>Arundo donax</i> crece en gran parte de las regiones templado-cálidas y tropicales del mundo. Está presente en el sur de Europa, Sudáfrica, norte de África, Australia, Nueva Zelanda, la mayor parte del centro y sur de Asia, Estados Unidos, Antillas, América Central, América del Sur, las islas del Pacífico y Macronesia (Deltoro, 2012).</p>	<p>Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Durango, San Luis Potosí, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Veracruz, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Campeche, Yucatán.</p>

En la figura 7.1 se muestra la distribución de la especie *Arundo donax* en el territorio mexicano de acuerdo con la CONABIO. El número en el círculo corresponde al número de colonias que han sido identificadas en la región.



Figura 7.1: Distribución de *Arundo donax* en México
 Fuente: Conabio <http://bios.conabio.gob.mx/especies/6038564>

Respecto a sus necesidades ambientales, el *Arundo donax* se distingue por gran adaptabilidad a condiciones ambientales adversas. En la tabla 7.3 se muestran las variables ambientales y los intervalos de tolerancia de la especie

Tabla 7.3: parámetros de tolerancia de la especie *Arundo donax*

Parámetro	Intervalo de tolerancia
Temperatura media	9 – 29 °C
pH (suelo)	5.0 – 8.7
Precipitación pluvial	300 – 4000 mm
Salinidad	Alta

Fuente: Elaborada con datos de Conabio <http://bios.conabio.gob.mx/especies/6038564>

7.1.2 Antecedentes del *Arundo donax*: uso en humedales artificiales y producción de biomasa

Esta especie ha sido cultivada con diferentes objetivos, como la formación de barreras, setos o cortavientos vegetales, como material de construcción para la formación de techumbres y empalizadas, como soporte o tutor de otros cultivos y, más recientemente, para el control de la erosión (Sanz et. al. 2004). En cuanto a las opciones de utilización, las plantas poseen un alto valor y / o versatilidad económica, entre las opciones se encuentran artesanías, fertilizantes, alimentos para animales, materiales de construcción, fabricación de papel y productos farmacéuticos (Chiarawatchai et. al. 2008).

Asimismo, ha sido usado en construcciones rurales tradicionales, en sustitución de madera, debido a su baja conductividad térmica, ya que actúa como aislante térmico (Barreca 2012).

El *Arundo donax* es una especie ampliamente utilizada en humedales artificiales, (Tzanakakis et. al. 2007, Sabeen et. al. 2013, Idris et. al. 2012, Chang et. al. 2012). Es tolerante a cargas orgánicas y nutrientes elevados, posee raíces y rizomas bien desarrollados que ofrecen sustrato a las bacterias adheridas y oxigenación a las zonas adyacentes (Vymazal 2011).

El *Arundo donax* no solo tiene características ideales para su uso en humedales artificiales y jardines de aguas residuales, recientemente ha cobrado importancia como cultivo energético (Mariani et. al. 2010), debido a sus altas tasas de producción de biomasa, la cual se incrementa con el riego con agua residual (Mavrogianopoulos et. al. 2002, Barbagallo et. al. 2014). La

producción de biomasa se puede correlacionar directamente con su potencial de fijación de carbono. Esta especie tiene gran potencial de crecimiento y alta productividad de biomasa, lo que lo posiciona como una de las especies con mayor rango de desarrollo y producción primaria en todo el planeta. Se ha registrado que, en condiciones óptimas, el *Arundo donax* crece hasta 5 cm por día (Flores et. al., 2008).

La alta producción de biomasa alcanzada por la caña gigante se debe al continuo crecimiento. El ciclo de crecimiento de *A. donax* sigue las variaciones estacionales globales de la temperatura. En las regiones templadas, el crecimiento del campo comienza a principios de la primavera y alcanza su pico a mediados del verano. La senescencia comienza a finales del verano al otoño de acuerdo con la duración de la estación de crecimiento. La falta de temperaturas invernales de congelación en las regiones cálidas explica el crecimiento potencial durante todo el año de la caña gigante. En regiones templadas, *A. donax* tiene una estación de crecimiento más larga que otras hierbas perennes incluyendo *P. arundinacea* y *M. giganteus* (Nsanganwimana et. al., 2014).

En cuanto a sus características para ser aprovechado como biocombustible y para captura de carbono, en la tabla 7.4 se muestran valores para algunos de los parámetros relacionados con este uso. Su relativamente alto contenido de celulosa y bajo contenido de lignina, favorecen su conversión a etanol, mientras que por sus relativamente bajos contenidos de cenizas y nitrógeno puede ser considerado para combustión directa.

Tabla 7.4: Componentes del *Arundo donax*

Parámetro	Contenido (% de biomasa seca)
Lignina	8.0
Celulosa	38.0
Carbono	43.0
Cenizas	6.1
Nitrógeno	0.71
Producción de etanol	30.0

Fuente: elaborada con información obtenida de Nsanganwimana et. al. (2014).

En diversos estudios se ha cuantificado la producción de biomasa de la especie, por ejemplo, en humedales experimentales de *Arundo donax* regados con agua pluvial industrial produjeron el equivalente a 107 toneladas por hectárea de biomasa aérea (peso seco) al año (suponiendo 250 días de cultivo y cosecha de un solo corte). En consecuencia, el atractivo de utilizar *Arundo donax* en los humedales construidos para la remediación de aguas residuales no es simplemente actuar como otro sustrato alrededor del cual las bacterias y los hongos pueden crecer sino ser una fuente de biomasa que puede ser utilizada directa o indirectamente para la producción de energía (Idris et. al., 2012). Asimismo, *Arundo donax*, produjo altos rendimientos de biomasa (45.2 t / ha) por año en tierras salinas usando aguas residuales salinas de baja calidad, estos rendimientos de biomasa son mayores que cualquier otro cultivo reportado en la literatura para ambientes mediterráneos a subtropicales, por lo que esta especie calificó como un cultivo de crédito de carbono valioso (20.6 toneladas de carbono orgánico por hectárea) (Williams et.al. 2008).

Además, su gran cantidad de biomasa aérea proporciona aislamiento térmico en invierno [9].

Como se puede observar, el *Arundo donax* posee características que facilitan su utilización en el SHBV, a continuación se enlistan aquellas que resultaron claves para la selección de esta especie:

- Resistencia a factores ambientales extremos, tales como alta salinidad, valores altos y bajos de pH, intervalos amplios de humedad (resistencia a sequía y a inundaciones).
- Resistencia a cargas contaminantes altas

- *Rápido desarrollo*
- *Fácil propagación*
- *Gran producción de biomasa*
- *Forman colonias muy densamente pobladas, lo que da como consecuencia grandes masas de vegetación muy compactas. En comparación a las barreras verdes de especies arbóreas y arbustivas, la de *Arundo donax* resulta más compacta y homogénea.*

*Uno de los problemas que puede surgir del uso del *Arundo donax* en el SHBV es que todavía es considerada como una especie invasora por algunos, sobre todo por aquellos dedicados a la conservación. Sin embargo, es difícil dar esa denominación a una especie, cuando los especialistas todavía no se pueden poner de acuerdo en cuál es el origen biogeográfico de la misma, así como tampoco coinciden en la fecha a partir de la cual comenzó su distribución por todo el mundo. Por lo que parece más correcto hablar de una especie cosmopolita, en lugar de una invasora, la cual se ha abierto paso gracias a su gran adaptabilidad, y si ha ganado terreno a otras especies, esto no es atribuible a la acción del hombre, sino a sus características propias. Considero más productivo aprovechar esas características en beneficio del cuidado del medio ambiente, en vez que querer destruirla.*

7.2 Determinación del amortiguamiento térmico

*Para cuantificar el efecto de la barrera verde de *Arundo donax* como elemento bioclimático susceptible de ser incorporado un edificio para proporcionar confort al interior del mismo y de esta manera disminuir el consumo energético atribuible al funcionamiento de dispositivos de climatización y su consecuente contribución a la generación de gases de efecto invernadero, la experimentación se enfocó en la determinación del amortiguamiento térmico, el cual se define como la diferencia entre la temperatura interior y exterior.*

Hasta ahora el conocimiento sobre el efecto de sistemas de vegetación vertical sobre el comportamiento térmico de las fachadas aisladas es limitado (Olivieri et. al. 2014). No se encontró reportada alguna metodología específica para determinar el amortiguamiento térmico por barreras verdes, ya que las identificadas se enfocan en muros vivos, fachadas verdes (Campillo et. al. 2013) y techos verdes (González et. al. 2008). Un enfoque metodológico encontrado en los estudios de fachadas y muros verdes, es la determinación de las temperaturas superficiales de los muros con y sin vegetación (Cuce 2016, Cheng et. al. 2010, Wong et. al. 2010) y realizar una comparación entre ambos (Tudiwer & Korjenic 2017). Otros incluyen adicional a las mediciones de temperaturas, la determinación de la transpiración, tal es el caso de un estudio realizado en tres fachadas de edificios en Berlín, Alemania, en el cual, se determinaron las tasas de transpiración y las temperaturas superficiales de las paredes verdes y desnudas, en períodos calurosos de verano (Hoelscher et. al. 2016).

*En cuanto a las especies estudiadas, destacan las plantas trepadoras *Fuchsia*, *Jasminum* y *Lonicera* (Cameron et. al. 2014), *Parthenocissus tricuspidata*, *Hedera helix* y *Fallopia baldschuanica* (Hoelscher et. al. 2016), *Pueraria lobata* (Koyama et. al. 2014), usadas tradicionalmente en fachadas verdes. No se encontraron datos acerca de *Arundo donax* o especies semejantes.*

Respecto a las características del sitio donde se han realizado los estudios, se identificaron dos tendencias, la primera se refiere a edificios reales con fachadas verdes (Wong et. al. 2010, Haggag et. al. 2014, Yin et. al. 2017), y la segunda es mediante la implementación de cubículos o edificios prototipos en los se instala el sistema de vegetación vertical específicamente para el estudio (Cuce 2016, Olivieri et. al. 2014, Chen et. al. 2013, Coma et. al. 2017, Koyama et. al. 2015).

7.2.1 Diseño y construcción del prototipo de medición del amortiguamiento térmico

Se emplearon 2 calorímetros de 1 m³ construidos con 5 paredes (piso, techo, paredes norte, sur y oeste) de poliestireno expandido (espesor de 0.2 m, y densidad de 16 kg/m³) que impiden la conducción de calor, estas 5 caras se fueron cubiertas con lámina de aluminio (calibre de 1.7x10⁻⁵ m). En la pared orientada hacia el este se utilizó una lámina de papel (calibre de 2.5x10⁻⁴ m y densidad de 626.28 kg/m³) que permite la conducción de calor. Se cubrió el cubo completo con una película de polietileno (calibre de 2.3 x 10⁻⁴ m y d= 141.10 kg/m³) para evitar la entrada y salida de aire (figura 7.2).

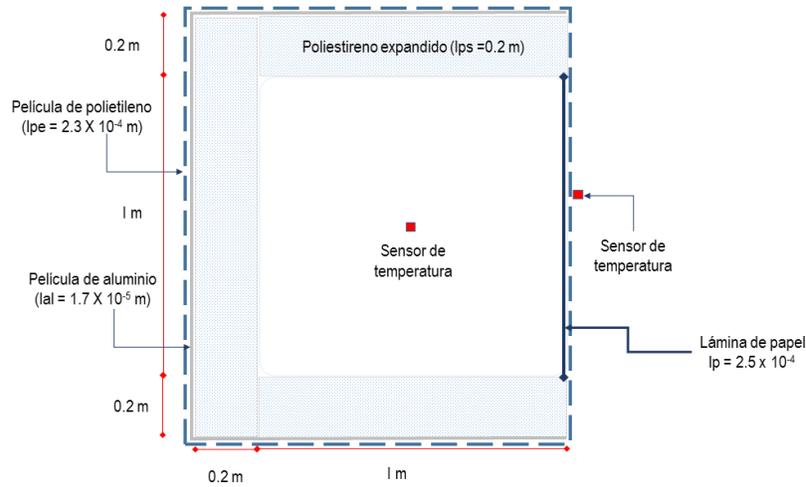


Figura 7.2: Calorímetro testigo (sin barrera verde)

En la pared orientada hacia el este de uno de los calorímetros se colocó una barrera verde de *Arundo donax* de 0.4 m de espesor y una densidad de población promedio de 120 tallos/m². Se construyó la barrera verde empleando tallos de *Arundo donax* obtenidos de un humedal doméstico establecido. Se utilizaron tallos de 1.2 m de largo y se colocaron en un sustrato de Tezontle (fig. 7.3).

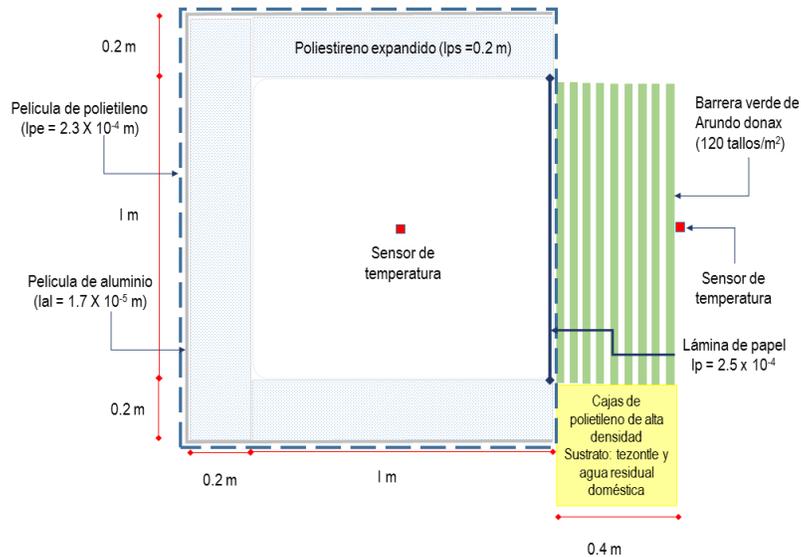


Figura 7.3: Calorímetro de prueba (con barrera verde)

Los calorímetros se colocaron al interior de un invernadero con la finalidad de determinar el comportamiento de la barrera verde en temperaturas propias de climas tropicales, además de proporcionar condiciones controladas de humedad y temperatura, y evitar las interferencias por la lluvia (figura 7.4).



Figura 7.4: Calorímetros "T" al interior del invernadero orientados hacia el este

7.2.2 Resultados de la medición de temperatura

Se midieron las temperaturas, en tres horarios por día, 8:00, 13:00 y 17:00 horas. El experimento se realizó del 27 de julio al 30 de septiembre del 2015. Se midieron las temperaturas al interior (t_i) y al exterior (T_e) de los calorímetros (figura 2 y 3), se utilizó un termómetro RadioShack modelo 6300769 (Indoor/Outdoor Wireless Thermometer), con las especificaciones siguientes: intervalo de temperatura interior 0 a 50°C, intervalo de temperatura exterior -20 a 50°C, intervalo de compensación de temperatura -10°C a 60°C, frecuencia del Sensor RF 433 MHz.

Mediante el software MINITAB-17, se realizó el análisis de los datos de temperatura para cada horario por separado, con la prueba de Anderson – Darling se verificó la normalidad de los datos. Al tratarse de un experimento con dos variables, una continua (temperatura) y otra discreta (presencia o ausencia de barrera verde) se empleó un Análisis de Varianza (ANOVA) de una vía mediante el cual se rechazó la hipótesis nula: "la media de las mediciones de temperatura son iguales", es decir, no hay diferencia entre las mediciones con barrera verde y sin barrera verde; se aceptó la hipótesis alterna: existe por lo menos uno diferente, lo que significa la existencia de una diferencia significativa entre los valores de temperatura con y sin barrera verde.

En la tabla A1.1 (ver anexo 1) se muestran los datos de temperatura correspondientes al horario de las 8:30. Se incluye la temperatura interior y exterior para el dispositivo con barrera verde y para el dispositivo sin barrera verde. Figuras A1.1a y A1.1b se muestran las pruebas de normalidad Anderson-Darling de los datos correspondientes al horario de 8:30 a.m, con barrera verde (cbv) y sin barrera verde (sbv).

En la tabla A1.2 (ver anexo 1) se muestran los datos de temperatura correspondientes al horario de las 13:30 horas. Se incluye la temperatura interior y exterior para el dispositivo con barrera verde y para el dispositivo sin barrera verde. En las figuras A1.2a y A1.2b se muestran las pruebas de normalidad Anderson-Darling de los datos correspondientes al horario de 13:30 a.m, con barrera verde (cbv) y sin barrera verde (sbv).

En la tabla A1.3 (ver anexo 1) se muestran los datos de temperatura correspondientes al horario de las 17:30 horas. Se incluye la temperatura interior y exterior para el dispositivo con barrera verde y para el dispositivo sin barrera verde. En las figuras A1.3a y A1.3b se muestran las pruebas de normalidad Anderson-Darling de los datos correspondientes al horario de 17:30 a.m, con barrera verde (cbv) y sin barrera verde (sbv).

Se realizó el análisis de Varianza para probar las hipótesis por pares de datos, en todos los casos la diferencia estadística de las medias de temperatura es significativa. En el Anexo 1 (ver figuras A1.4a,

A1.4b, A1.4c) se muestran los diagramas de caja correspondientes a la comparación realizada entre el dispositivo con barrera verde y el dispositivo sin barrera verde de cada horario.

Las temperaturas medidas al interior del calorímetro con barrera verde fueron menores que las encontradas en el calorímetro sin barrera verde. En la tabla 7.5 se muestran las temperaturas máximas y mínimas medidas al exterior y al interior de ambos dispositivos.

Tabla 7.5: Comparación de temperatura interior y exterior mínima, promedio y máxima;

Ubicación	$T_{min.}$ (°C)	$T_{prom.}$ (°C)	$T_{max.}$ (°C)	>30°C (%)
Exterior de los dispositivos	12.2	29.4	51.8	51.3
Interior del dispositivo con barrera verde	10.2	21.5	34.9	10.0
Interior del dispositivo sin barrera verde	10.3	24.7	44.1	30.0

El promedio del amortiguamiento térmico ($T_e - t_i$) en el dispositivo con barrera verde fue de 7.5 °C, y en el dispositivo sin barrera verde fue de 5.0 °C. En la tabla 7.6 se muestran los promedios de amortiguamiento térmico para cada horario de mediciones.

Tabla 7.6: Amortiguamiento térmico ($T_e - t_i$), promedio para cada horario medido y promedio general

	$T_e - t_i$ (°C) 8:30 hr	$T_e - t_i$ (°C) 13:30 hr	$T_e - t_i$ (°C) 17:00 hr	$T_e - t_i$ (°C) Promedio
Con barrera verde	6.0	11.4	5.2	7.5
Sin barrera verde	5.6	7.2	2.2	5

Para el dispositivo con barrera verde la diferencia de temperatura es mayor en el horario de las 13:30 horas, lo que indica un mayor amortiguamiento en el horario más caliente. En el horario de las 17:00 la diferencia de temperatura es menor por el calor almacenado durante el día. En el dispositivo sin barrera verde, se observa menor capacidad de amortiguamiento térmico como indican los valores de la diferencia de temperatura, en el horario de las 17:00 la diferencia mínima de temperatura muestra que el calor almacenado durante el día es mayor que en el caso del dispositivo con barrera verde (Figura 7.5).

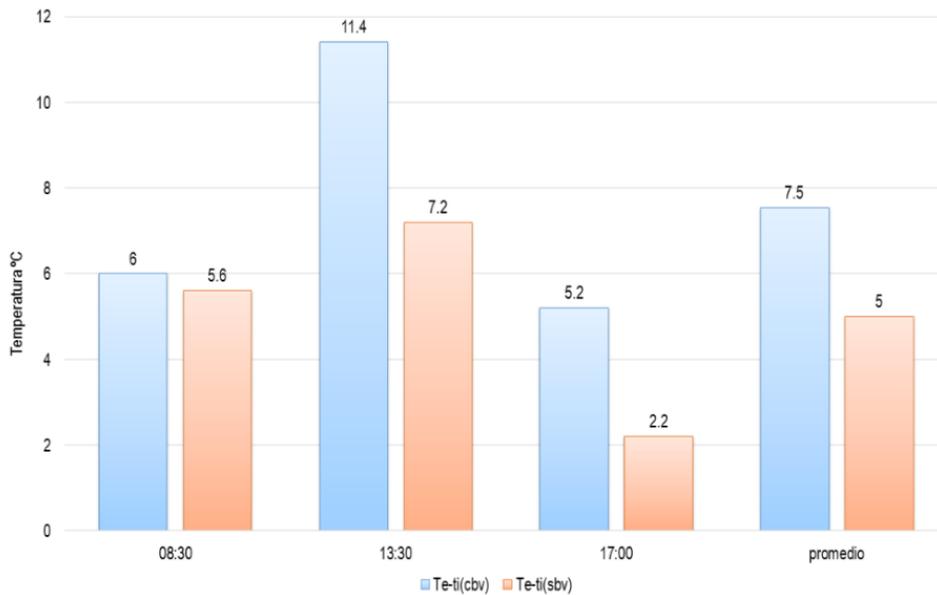
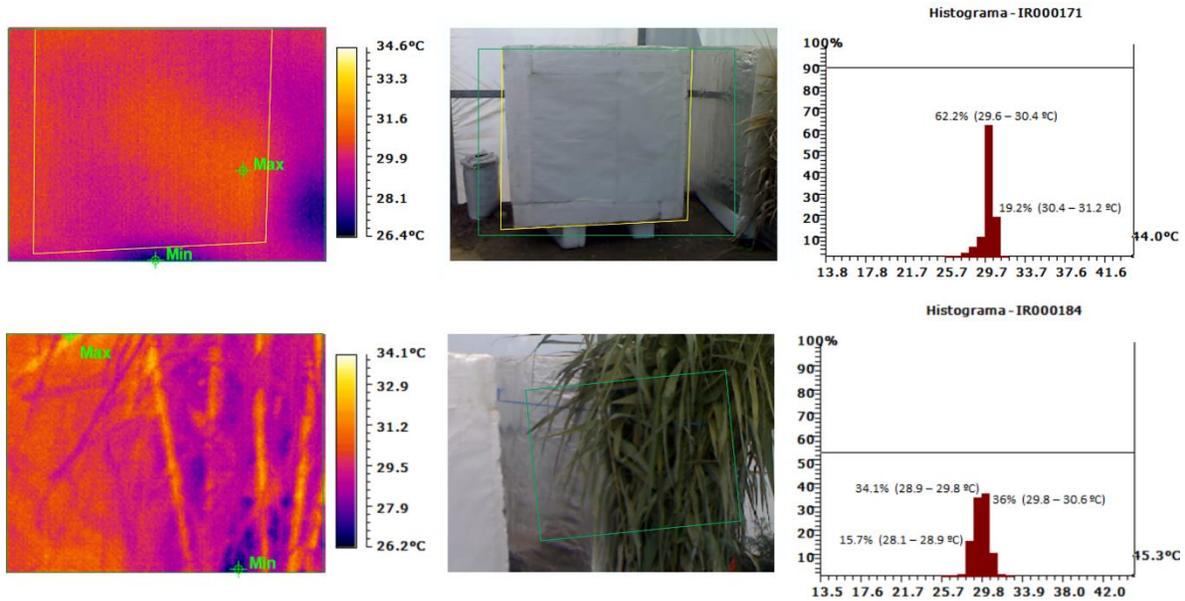


Figura 7.5: Promedio de las diferencias de temperatura exterior e interior para cada horario de medición de temperatura. Comparación del dispositivo con barrera verde ($T_e - t_i(cbv)$) y el dispositivo sin barrera verde ($T_e - t_i(sbv)$). Las mediciones de temperatura se realizaron en el periodo del 27 de julio al 30 de septiembre del 2015.

En la figura 7.6 se muestra la termografía realizada en ambos casos, con y sin barrera verde. Asimismo se observa la gráfica correspondiente a los porcentajes de superficie con diferente temperatura.

Figura 7.6: Termografía de la pared con y sin barrera verde de *Arundo donax*



En la tabla 7.7 se muestra un comparativo entre los resultados de estudios llevados a cabo con diversas especies y los obtenidos con *Arundo Donax* en esta investigación. Cabe señalar que aunque en todos ellos se realizaron mediciones de temperatura con y sin vegetación, el punto exacto de la medición varía.

Tabla 7.7: Comparación de efectos sobre la temperatura de los muros de los sistemas de vegetación vertical con diferentes especies

Sistema de vegetación vertical	Especies	Variable medida y resultados
Fachadas verdes (Hoelscher et. al. 2016)	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> , <i>Hedera hélix</i> , <i>Fallopia baldschuanica</i>	Temperatura superficial exterior: Disminución de 15.5 °C Temperatura superficial interior: Disminución de 1.7 °C
Fachadas verdes (Haggag et. al. 2014)	-----	Temperatura interior: Disminución de 5°C en promedio
Fachadas verdes (Cameron et. al. 2014)	Arbustos de pared y plantas trepadoras: <i>Prunus laurocerasus</i> , <i>Stachys</i> y <i>Hedera</i>	Temperatura del aire adyacente a las paredes en ambientes controlados - Disminución de 6.3 ° C. - Disminución > 7.0 ° C
Fachada verde (Koyama et. al. 2014)	<i>Pueraria lobata</i>	Reducción máxima de temperatura ambiente: 3.44 ° C
Fachada verde (Cuce 2016)	<i>Hedera hélice</i> (10 cm de espesor)	Reducción en la temperatura interna de la pared: 2.5 °C
Muro verde interior (Cañero et. al. 2011)	-----	Reducción media de la temperatura ambiente: 4 ° C, Reducción máxima de la temperatura ambiente: 6 ° C
Muro verde Fachada verde (Cuce 2016)	-----	Reducción de la temperatura interior: 4.0 ° C (Fv) Reducción de la temperatura interior: 3.0 ° C (Mv)
Barreras verdes*	<i>Arundo donax</i>	Diferencia entre la temperatura interior y exterior Con barrera verde: 7.5°C, Sin barrera verde: 5.0°C.

Fuente: *Datos experimentales

7.2.3 Discusión de resultados

La temperatura promedio, en el dispositivo con barrera verde (21.2°C) se encuentra dentro del intervalo considerado de confort, 20-24°C de acuerdo con la localización geográfica y el clima de la zona (Bernal 2011), no así el dispositivo sin barrera verde y el exterior, ambos con valores por encima del confort (tabla 7.8). En el dispositivo con barrera verde la variación de temperatura ($T_{max}-T_{min}$) es menor que en el dispositivo sin barrera verde y en el exterior. En promedio, el amortiguamiento térmico en el dispositivo con barrera verde es mayor que en el dispositivo sin barrera verde. La diferencia mayor en el horario de las 13:30 horas demuestra la capacidad de la barrera verde de modificar el nivel de amortiguamiento de acuerdo con la situación ambiental en la que se encuentre.

En la comparación con los resultados de otros estudios (ver tabla 7.10) se observa que con la barrera verde de *Arundo donax* se obtuvieron valores de disminución de temperatura ligeramente superiores a los encontrados con las especies *Hedera* (7.0 °C) y *Prunus laurocerasus*, la cual, también proporcionó un enfriamiento significativo de la pared en ambientes controlados (6.3 °C) (Cameron et. al. 2014). Es importante resaltar esta última, ya que al tratarse de una especie arbustiva, este sistema de vegetación vertical es el que más se asemeja con el sistema de barrera verde empleado en el presente estudio.

7.3 Medición de transpiración

La transpiración en los vegetales se refiere a la pérdida de agua, principalmente a través de los estomas, (por ellos hay de 80 a 90% transpiración). El grado de intensidad con que se realiza la transpiración depende de la diferencia de la presión de vapor entre las hojas y el aire (microclima) que rodea las plantas. Del agua consumida por las plantas entre el 98 – 99 % se va por transpiración y solo el 1-2% se utiliza en la construcción de los tejidos (Maldonado, 2011).

La evapotranspiración agrupa la pérdida de vapor de agua proveniente de la transpiración de las plantas y la evaporación directa del agua contenida en el suelo o sustrato. De acuerdo con Angeles (2002), la dificultad de evaluarlas separadamente obliga a considerarlas de manera conjunta.

La evapotranspiración resulta de gran importancia para el SHBV, ya que representa el potencial de refrigeración evaporativa del sistema. La evapotranspiración depende del gradiente de presión de vapor, no de la diferencia de la humedad relativa. Si tanto la hoja como el aire están saturados no hay difusión en igualdad de temperatura, pero si la hoja ha sido calentada por el sol más que por el aire, ocurrirá una pérdida de vapor de agua aún en atmósfera saturada debido a la diferencia de presiones de vapor (Maldonado, 2011).

7.3.1 Potencial de transpiración

Con el objetivo de determinar el potencial de transpiración del *Arundo donax*, se tomaron muestras de una población de esta especie establecida en un humedal doméstico alimentado con agua residual gris, con flujo de entrada continuo, es decir sin restricciones de agua (ver imagen 1). También se tomaron muestras de una población silvestre sin riego, es decir sometida a las restricciones de agua propias del clima (ver figura 7.7). Las muestras de ambas poblaciones se tomaron en época de estiaje (febrero – marzo). Se determinó la humedad en hojas y tallos por separado. Adicionalmente se determinó la proporción en masa húmeda de las hojas y los tallos con respecto a la masa total de la planta.



Figura 7.7: Población de *Arundo donax* establecida en un humedal doméstico alimentado con agua residual gris

Muestreo

Se tomaron 3 muestras puntuales del interior del humedal y de la población silvestre. Se cortaron tallos completos al ras del suelo. Para determinar la humedad se cortaron fragmentos de aproximadamente 10 cm ubicados en la parte media del tallo, se cortó una hoja ubicada en la misma posición que el fragmento del tallo (figura 7.8).

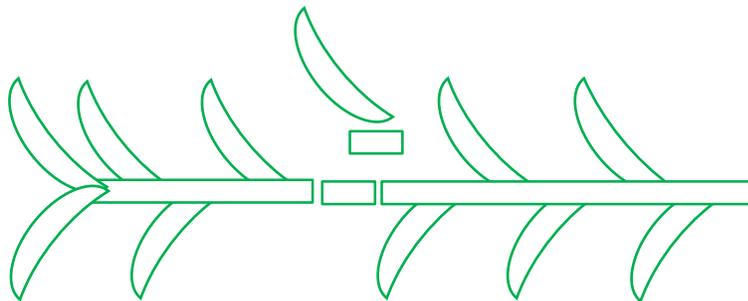


Figura 7.8: esquema del muestreo de tallos y hojas para determinación de humedad

Procedimiento para la determinación de humedad

Para determinar el contenido de humedad se empleó el método establecido en la NMX-F-083-1986 Que se describe a continuación:

- Pesar la muestra húmeda en la balanza analítica
- Introducir la muestra en la estufa de desecación y calentar a 105° C durante 2 horas
- Una vez transcurrido el periodo establecido, dejar enfriar en un desecador
- Pesar la muestra seca en la balanza analítica.
- Calcular el porcentaje de humedad por diferencia de pesos.

La refrigeración por transpiración depende de factores ambientales como humedad de la planta, temperatura ambiente, humedad del ambiente, velocidad del viento y radiación (Ángeles 2002). También intervienen factores inherentes a la planta tales como la fisiología y el área / morfología foliar, los cuales deben ser considerados al seleccionar especies para maximizar el enfriamiento en aplicaciones de muros verdes (Cameron et. al. 2014). La superficie foliar está directamente ligada al suministro de agua, es decir, cuando existen restricciones de riego, el mecanismo de la planta es evitar la transpiración deshaciéndose de las hojas (tabla 7.13). Garantizar el abasto de agua, dará como consecuencia una mayor cantidad de hojas, que en condiciones de temperaturas elevadas y valores de humedad relativa bajos promoverán la transpiración.

En el caso del *Arundo donax* al ser la transpiración determinada en condiciones ambientales extremas se observó un gran potencial para emplear esta especie en sitios con clima cálido seco, donde las necesidades de riego dificultarían el uso de otras especies. La ventaja de esta especie radica en la posibilidad de ser regada con agua residual gris proveniente de descargas domésticas.

Tabla 7.8: Comparación de humedad y proporción de tallos y hojas en individuos de *Arundo donax* sin restricciones de agua y con restricciones de agua

Parte de la planta	Humedal doméstico *		Población silvestre **	
	****Proporción (%)	Humedad (%)	****Proporción (%)	Humedad (%)
Hojas	45.95	64.05	23.28	55.71
Tallo	54.05	53.81	76.72	57.30
Total		58.59		58.63

*Población de *Arundo donax* sin restricciones de agua;

**Población de *Arundo donax* con restricciones de agua;

*** La proporción se determinó a partir de la masa húmeda de tallos, hojas y planta completa

La humedad promedio en individuos de *Arundo donax* de un humedal doméstico expuestos a un flujo continuo de agua residual es de 58.6% (ver tabla 7.8). Para el caso de los individuos de *Arundo donax* de la población silvestre el promedio de humedad fue muy similar (58.6%), sin embargo, la proporción de la masa de las hojas respecto al total de la planta es mucho menor, cuando existe restricción de agua (alrededor de la mitad). Lo anterior se explica fácilmente debido a que la transpiración ocurre casi en su totalidad por los estomas de las hojas, de tal manera que cuando el agua es el recurso limitante, muchas especies vegetales evitan este fenómeno dejando caer las hojas, motivo por el cual, en temporada de estiaje algunas especies vegetales pierden su follaje. Tal es el caso del *Arundo donax*.

7.3.2 Determinación de la Transpiración

Se realizaron pruebas en una cámara de condiciones controladas, donde se introdujeron ejemplares de *Arundo donax* y se sometieron a una temperatura de 45°C y 13% de humedad durante un periodo

de 2 horas. El sustrato de los ejemplares se saturó con humedad para garantizar el abasto de agua hacia la planta, adicionalmente se envolvió el recipiente con dicho sustrato con una película de polietileno para evitar la evaporación desde el sustrato, de tal manera que solo se cuantificara la transpiración de las plantas. Asimismo se determinó la superficie foliar de una población de *Arundo donax* con densidad de población de 120 tallos/m² y alimentada sin restricciones con agua residual gris doméstica. Con la finalidad de contar con un punto de comparación se realizó una prueba de evaporación de agua en iguales condiciones ambientales.

La transpiración promedio del *Arundo Donax* fue de 4.4 l/m³.hr en condiciones ambientales de 45 °C y 13% de humedad relativa. Este valor de transpiración corresponde a un volumen de 1 m³ de barrera verde, con superficie foliar de 28 m², caracterizada para una población de *Arundo donax* de 120 tallos/m² sin restricciones de riego. Es importante mencionar que dichas condiciones ambientales extremas solo se alcanzan durante unas pocas horas al medio día, unos cuantos días al año en la época más calurosa (abril a septiembre) (CONAGUA 2014) en clima cálido seco. En comparación, la evaporación en iguales condiciones ambientales resultó de 1.7 mm/hr.

7.3.3 Discusión de resultados

De acuerdo con Penichet (2011) es posible obtener una potencia de enfriamiento de 0,666 kW si una fuente evapora 1 litro de agua cada hora, por lo tanto una transpiración de 4.4 l/m³.hr equivale a 2.9 kW de potencia de enfriamiento.

Por otra parte, en cuanto al volumen de agua residual descargado, este se reduce debido a la transpiración. En la tabla 7.8b se muestran los valores del volumen de agua residual transpirado en condiciones las climáticas extremas en las cuales se realizó la determinación de transpiración, es decir superando los 40°C por al menos 2 horas al día, en periodos de 30, 60 y 90 días por año, correspondientes al clima cálido seco existente en la zona norte del país. Para el cálculo se utilizó un SHBV con 0.5 m de ancho, 3.3 m de largo y 4.0 m de alto (ver apartado 8.5), dimensiones correspondientes a la generación de agua residual de un individuo con una dotación de 100 lt/hab.día.

Tabla 7.8b: Volumen transpirado por el SHBV en condiciones de clima cálido seco.

No. de días superando 40°C (días/año)	Volumen transpirado por el SHBV (lt/año)	Reducción del volumen de agua residual descargado anualmente (%)
30	1742.4	4.8
60	3484.8	9.5
90	5227.2	14.3

En el ANEXO 3 se muestran los valores del volumen de agua residual transpirado por el SHBV calculados para diferentes valores de ancho, largo y alto del humedal.

Cabe aclarar que los valores de reducción del volumen de agua residual generado anualmente que se muestran en la tabla 7.8, representa solo una parte del total transpirado, ya que corresponden solo a la transpiración en las condiciones climáticas extremas. Es un hecho que la reducción de dicho volumen siempre será mayor, ya que la transpiración ocurre, aunque en niveles más bajos, en otras condiciones ambientales, sin embargo, para conocer los valores exactos es necesario realizar la determinación de transpiración en diferentes condiciones climáticas. Se analizaron las condiciones climáticas extremas presentes en el clima cálido seco debido a que es precisamente en estas donde se presentan valores máximos de transpiración. En los otros tipos de clima, sobre todo en los del tipo húmedo, la transpiración será menor, por lo que el beneficio obtenido del SHBV en materia de reducción del volumen de agua residual descargado también se verá disminuido.

7.4 Estimación de ahorro energético

Se construyeron 2 calorímetros para determinar el consumo energético necesario para mantener la temperatura de confort.

Los calorímetros están constituidos por un recipiente de polietileno de alta densidad de 0.02 m^3 , el cual fue aislado en 5 de sus lados mediante láminas de poliestireno de 0.05 m de espesor. El recipiente fue llenado con agua y al interior se colocó un termostato automático, programado para activarse cuando la temperatura del agua sea menor de 20°C y desactivarse cuando la temperatura del agua sea de 24°C . Este termostato a su vez se conectó a un Wattímetro con la finalidad de medir el tiempo que permanece encendido y conocer el consumo energético necesario para mantener la temperatura de confort en el agua.

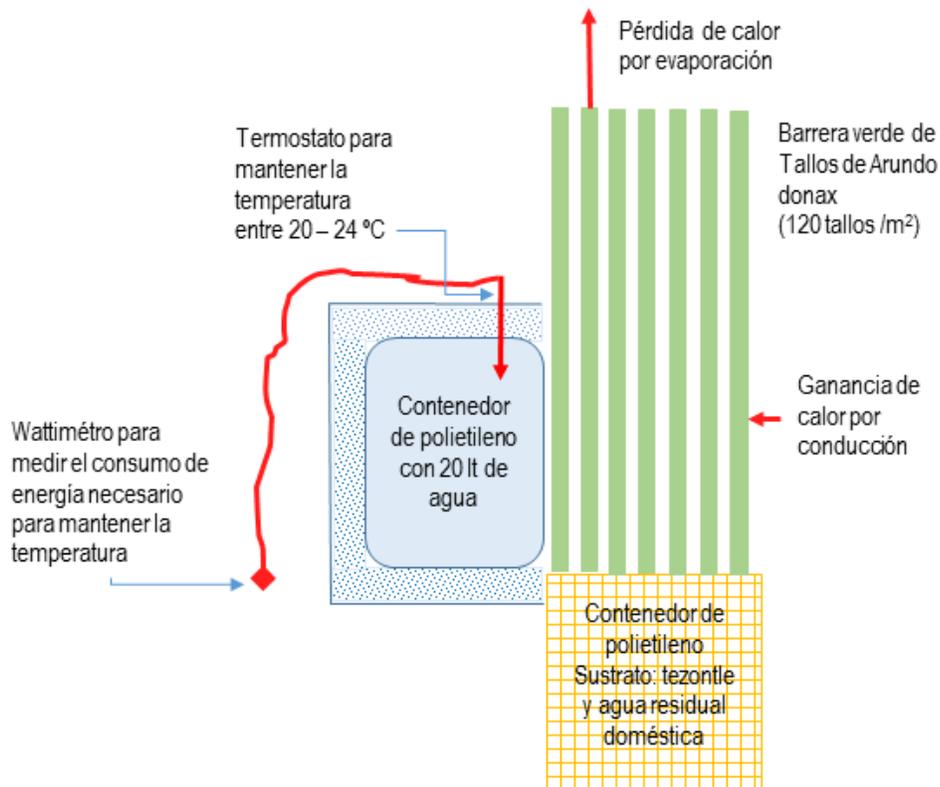


Figura 7.9: Calorímetro de prueba para determinar ahorro energético

Uno de los calorímetros "W" fue provisto de una barrera verde de *Arundo donax* de 0.33 m de espesor (figura 7.9), con la finalidad de determinar la capacidad de amortiguamiento térmico de la misma.

En el calorímetro con barrera verde se observó un consumo energético por concepto de amortiguamiento térmico menor que en el calorímetro sin barrera verde (figura 7.10). En la tabla 7.9 se muestra que el ahorro total asciende al 31% del consumo energético, y que en promedio se obtuvo una disminución del consumo energético del 21%. Este consumo energético se refiere a la energía eléctrica para "incrementar" la temperatura hasta alcanzar la temperatura de confort ($20\text{-}24^\circ\text{C}$), es decir, está relacionado con el "calentamiento" de los ambientes.

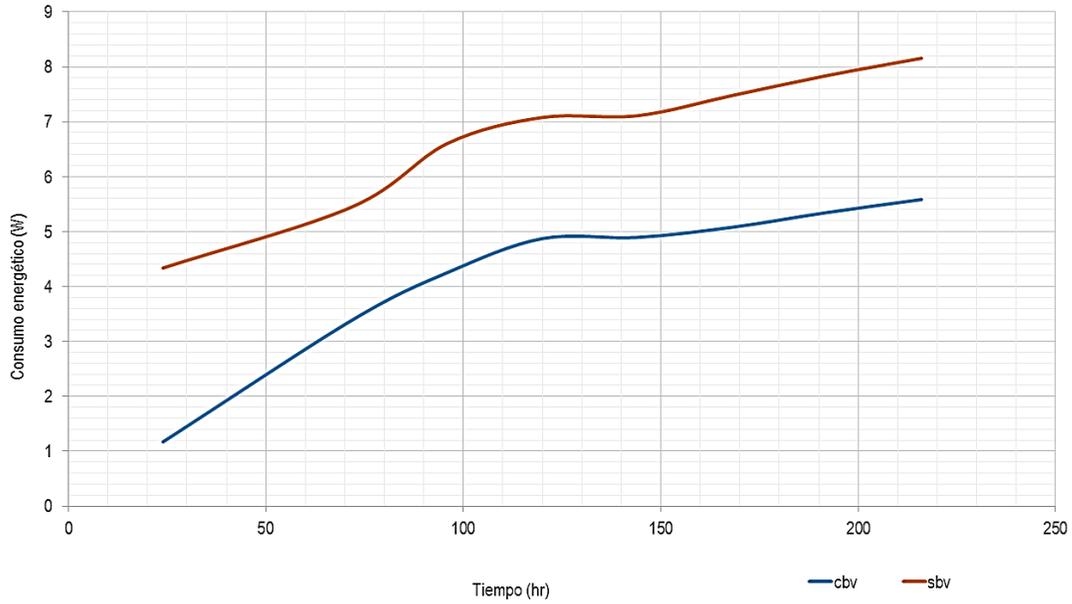


Figura 7.10: Consumo energético por amortiguamiento térmico, comparación entre calorímetro con y sin barrera verde. Se refiere al consumo energético acumulado. cbv: con barrera verde, sbv: sin barrera verde

Tabla 7.9: Consumo energético por concepto de incremento de la temperatura para alcanzar la temperatura de confort.

	Consumo energético acumulado (W)	Consumo energético acumulado (%)	Ahorro energético acumulado (%)	Consumo energético promedio diario (W)	Consumo energético promedio diario (%)	Ahorro energético promedio diario (%)
cbv	5.58	69	31	0.36	79	21
sbv	8.15	100	0	0.45	100	0

7.5 Reducción de ruido por la barrera verde de *Arundo donax*

La metodología utilizada para la determinación de la reducción de ruido está basada en la norma oficial mexicana NOM-081-SEMARNTAT-1994, específicamente el inciso dedicado a la determinación de la reducción acústica por un elemento constructivo en una zona crítica.

Se construyó una barrera verde de *Arundo donax* de 2 m de largo, 0.6 m de ancho, 1.2 m de altura, con una densidad de población de 120 tallos/m², y una densidad de 27.7 kg/m³. Se colocaron bloques de poliestireno de 0.2 m de espesor en los laterales y también en la parte superior, con la finalidad de aislar la barrera verde del medio circundante. Este arreglo se enfoca en la determinación de la reducción de la transmisión directa que permita la caracterización de la barrera verde de *Arundo donax* como material fono absorbente. En la parte media de la barrera verde se colocaron fuentes puntuales de ruido (timbre inalámbrico) (Figura 7.11) en cuatro posiciones diferentes. Se colocó un sonómetro a 0.3 m del inicio de la barrera verde de *Arundo donax*, en una posición donde estuviera cubierto por los bloques de poliestireno, para evitar interferencias por ruido de fondo, proveniente de otras fuentes. El experimento se realizó en un recinto cerrado con ausencia de ruido de fondo.

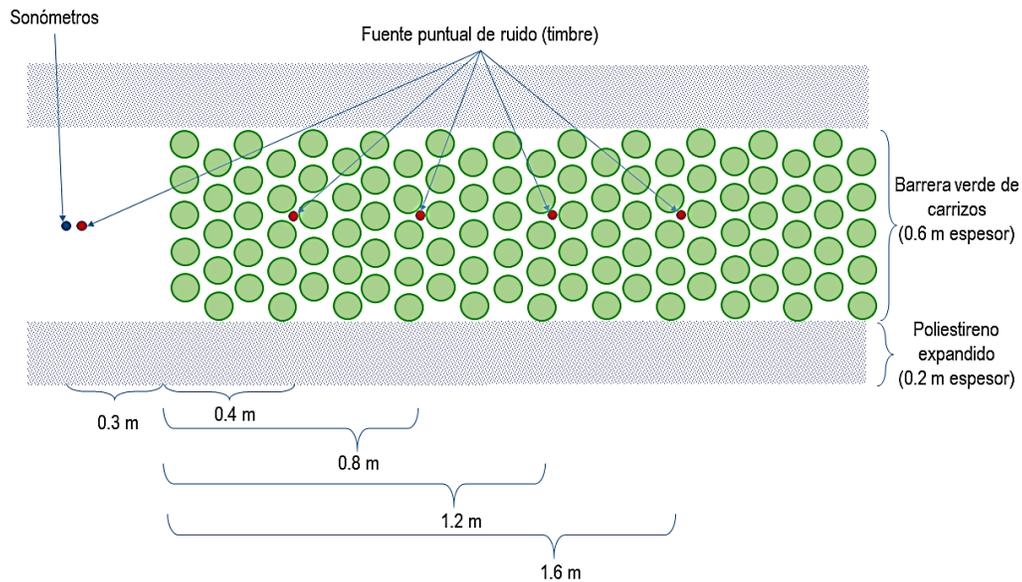


Figura 7.11. Prototipo para medición de amortiguamiento de ruido por la barrera verde

El sonómetro utilizado es modelo AMPROBE SM10 con capacidad de hacer mediciones en las ponderaciones A y C, intervalos de medición en la ponderación A de 30 ~ 130dB y en la Ponderación C de 35 ~ 130dB, intervalo de frecuencia de 31.5Hz ~ 8KHz, medición mínima de 0.1dB en un LCD de 4 dígitos, y ajustes de respuesta lentos (1 s) y rápidos (125 ms) para comprobar niveles de ruido máximo y medio.

A partir del método descrito en la norma oficial mexicana NOM-081-SEMARNTAT-1994 se realizaron las mediciones en 5 posiciones equivalentes a 5 valores de espesor de la barrera verde, que a su vez corresponden a 5 valores de masa de barrera verde. Se eligieron estos espesores debido a su factibilidad de utilización práctica (< 1.5 m de espesor). Se ajustó el sonómetro con el selector de la escala A y con el selector de integración lenta, esto debido a que la red de ponderación A atenúa las frecuencias bajas y las muy altas, dejando casi intactas las frecuencias medias, de tal manera que asigna a cada frecuencia un peso que está relacionado a la sensibilidad del oído humano a esa frecuencia. Aunque el nivel de sonido con ponderación A no puede reemplazar completamente otros procedimientos más precisos, se ha demostrado su utilidad para una gran variedad de ruidos ambientales (Torres & Hernández, 2004). Es usada

principalmente para sonidos de bajo nivel de presión sonora. La escala de ponderación A acerca más los valores medidos físicamente a los estímulos auditivos que estos producen. Los dBA son ampliamente utilizados en estudios de ruido y salud auditiva (Jaramillo, 2007).

El sensor del sonómetro se colocó apuntando hacia la fuente a 0.3 m de la barrera verde y a una altura de 1.2 m. Se realizaron 35 mediciones para cada punto. Con el propósito de realizar una comparación cuantitativa de la reducción debida a la presencia de aire y del sustrato, se realizaron mediciones colocando inicialmente solo los contenedores con sustrato, sin plantas (Figura 7.12).

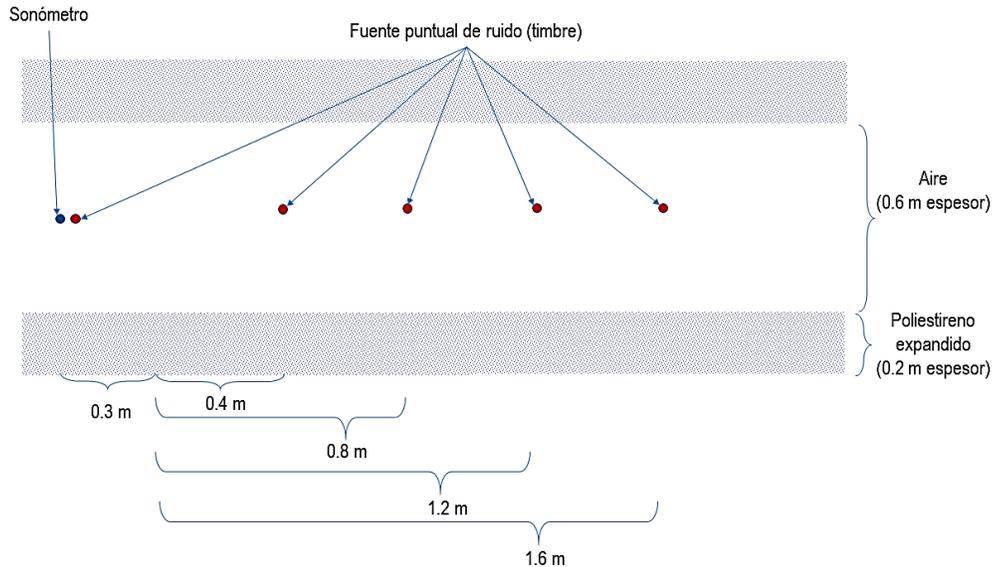


Figura 7.12. Prototipo para medición de amortiguamiento de ruido sin la barrera verde.

Se realizaron mediciones de tipo semicontinuas, lo cual se refiere a la medición de un ruido fluctuante que se realiza mediante la obtención aleatoria de muestras durante el período de observación. Para determinar los niveles de reducción, se emplearon las ecuaciones establecidas en la NOM-081-SEMARNAT-1994 para mediciones semicontinuas que se muestran a continuación:

$$N_{50} = (\sum_i N_i) / n \dots\dots\dots \text{ecuación 7.1}$$

$$\sigma = [(\sum (N_i - N_{50})^2)^{1/2}] / (n - 1) \dots\dots \text{ecuación 7.2}$$

$$N_{10} = N_{50} + 1.2817\sigma \dots\dots\dots \text{ecuación 7.3}$$

$$N_{eq} = 10 * \log (1/m) * \sum 10^{N_i/10} \dots\dots \text{ecuación 7.4}$$

$$R = N_d - N_{eq} + 10 * \log (s/10) \dots\dots \text{ecuación 7.5}$$

N_{50} : Es el límite inferior de todos los niveles sonoros presentes durante un lapso igual al 50% del período de observación (Percentil 50).

N_i : Nivel de observación i

n : Número de observaciones por punto de medición

σ : Desviación estándar

N_{10} : Es el límite inferior de todos los niveles sonoros presentes durante un lapso igual al 10% del período de observación (Percentil 10).

R : Es el decremento normalizado del nivel sonoro debido a la presencia de un elemento constructivo que impide su libre transmisión.

N_d : Nivel medido en el punto cero

S : Área del elemento común

N_{eq} : Nivel equivalente en la zona crítica coincidente

7.5.1 Resultados de la determinación de reducción de ruido

Las mediciones del nivel de ruido en los tres escenarios planteados (con barrera verde, con sustrato, y solo con aire) se muestran en el ANEXO 2. Los valores mostrados corresponden a 5 distancias de la fuente de ruido y los valores de nivel de ruido corresponden a dBA.

Una vez que los niveles sonoros fueron medidos, se calculó el promedio y la reducción correspondiente para cada distancia y masa de barrera verde. En la tabla 7.10 se muestran los resultados obtenidos para 5 valores de espesor correspondientes con 5 valores de masa de barrera verde. La masa se calculó con el valor de la densidad, que incluye la masa de las plantas húmedas, a la que se sumó el peso del aire, ya que en la barrera verde siempre estará presente dicho componente. Cabe aclarar que el espesor de la barrera verde no es igual a la distancia total, ya que también se consideran los 0.3 m de distancia que hay entre el sonómetro y la barrera verde, en concordancia con lo establecido en la NOM-081-SEMARNAT-1994.

Tabla 7.10: Medición de la reducción sonora: aire, sustrato y barrera verde

	Barrera verde	Sustrato	Aire
Espesor (m)	R (dBA)	R(dBA)	R (dBA)
0	0	0	0
0.7	14.2	7.7	7.8
1.1	18.2	9.5	10.5
1.5	21.6	11.4	11.5
1.9	25.3	14.6	13.5

En la figura 7.13 se muestran las curvas de reducción de ruido en función de la distancia, y se compara la reducción obtenida con aire y empleando únicamente los recipientes con sustrato pero sin plantas. Lo anterior con la finalidad de determinar el efecto independiente de las plantas de *Arundo donax*.

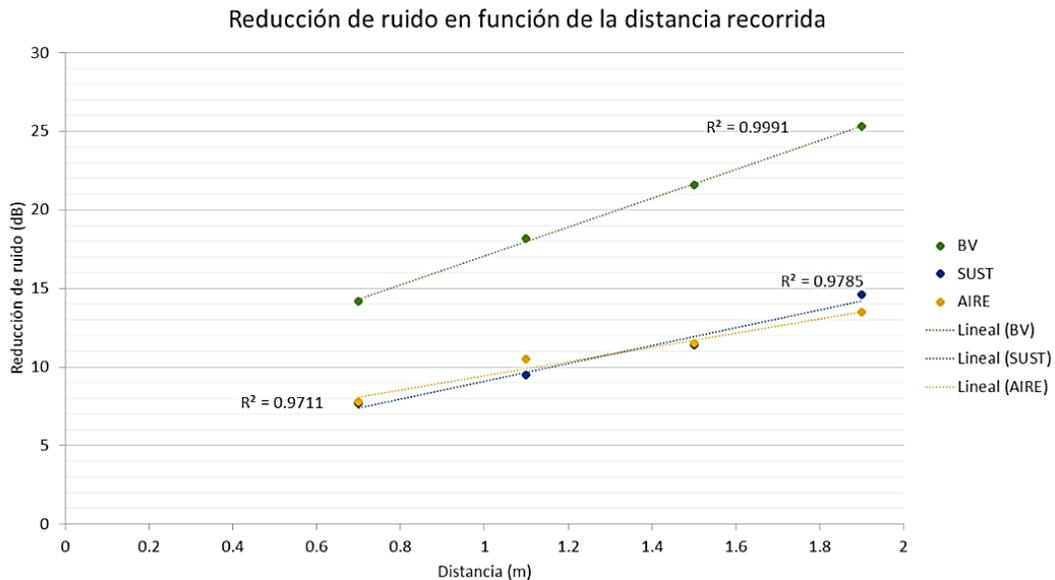


Figura 7.13: reducción de sonido comparación entre la barrera verde, el sustrato de tezontle y el aire.

En la figura 7.14 se muestra la relación existente entre la masa de barrera verde y la reducción de sonido, la que se ajustó a una ecuación lineal para relacionar estas dos variables.

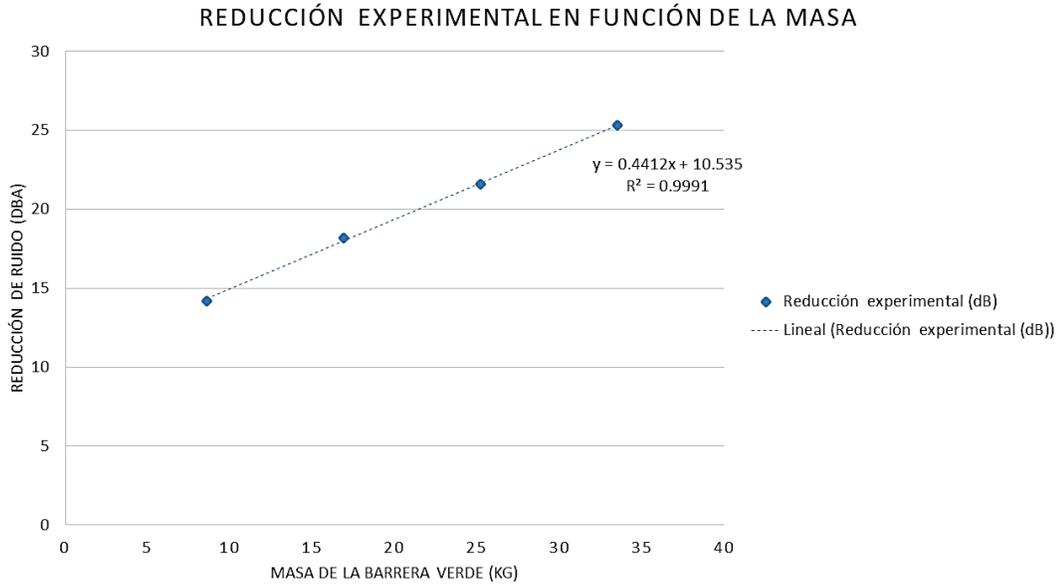


Figura 7.14: Reducción de ruido en función de la masa de la barrera verde. La masa de la barrera verde incluye la biomasa de las plantas y el aire atrapado entre las mismas.

7.5.2 Discusión de resultados

Con la finalidad de realizar una comparación con los materiales empleados comúnmente en la construcción, empleando la ecuación empírica obtenida de la figura 7.14, se calcularon los valores de reducción de ruido en función de la densidad superficial para 6 valores de espesor de la barrera verde de *Arundo donax*. En la tabla 7.11 se muestra una comparación de estos con un muro verde estudiado por Azcorra *et al.* (2015) y dos materiales constructivos tradicionales.

Tabla 7.11: Comparación de reducción acústica de diversos materiales empleados en la construcción, muro verde y barrera verde de *Arundo donax*.

Material	Densidad superficial (kg/m ²)	Espesor (m)	Reducción acústica (Rw)(dB)
Ladrillo sin acabado	200	0.10	44 ^a
Bloque de acabado ligero	280	0.215	51 ^a
Muro verde	57	0.4	18 ^a
Barrera verde de <i>Arundo donax</i>	8.7	0.3	14.4 ^b
	11.6	0.4	15.6 ^b
	14.5	0.5	16.9 ^b
	17.3	0.6	18.1 ^b
	20.2	0.7	19.5 ^b
	23.1	0.8	20.7 ^b

Fuente: ^a Construida con datos obtenidos de Azcorra *et al.* (2015); ^b Datos calculados a partir de la ecuación empírica obtenida resultado de la mediciones realizadas con la metodología establecida en la norma oficial mexicana NOM-081-SEMARNTAT-1994 para determinar la reducción acústica por un elemento constructivo en una zona crítica .

Nota: El índice de reducción acústica ponderada (Rw) se obtiene mediante el procedimiento establecido en la norma UNE-EN ISO 717-1 a partir del índice de reducción de sonido (R). El Rw comunica menos información que la curva (valores R dependiendo de la frecuencia), pero es más fácil de manejar y puede utilizarse para comparar los elementos del edificio (Azcorra *et al.* 2015).

Los principales mecanismos para la reducción de la transmisión del sonido es el uso de materiales fono aislantes y fono absorbentes. Los primeros logran un aumento significativo del aislamiento a través de su masa e independientemente de su conformación. En el segundo caso, pueden distinguirse dos categorías, los materiales fibrosos como lana de vidrio (densidad 40 a 70 kg/m³) y lana de roca (densidad de 80 kg/m³); y materiales de estructura celular abierta, como las espumas de poliuretano (densidad 28 a 35 kg/m³) (Giani 2013).

La barrera verde de *Arundo donax* puede clasificarse en este último grupo, ya que se trata de un material poroso con densidad (27.7 kg/m³), en el cual, la forma, tamaño y distribución de las hojas es equivalente a los acabados de forma piramidal o alveolar de las cuñas anecoicas de las espumas de poliuretano empleadas comúnmente como materiales fono absorbentes. Los materiales fono absorbentes se comportan como una *trampa de sonido*, donde las ondas sonoras quedan momentáneamente confinadas, experimentando numerosas reflexiones antes de retornar al ambiente, en cada reflexión se pierde una fracción de la energía, de manera que la energía final es bastante pequeña (Miyara 2000).

Las diferencias encontradas en la reducción de ruido entre el *Arundo donax* y el muro verde analizado por Azcorra *et al.* (2015) están relacionadas con el sustrato (fibra de coco) y la especie usados en el muro verde. En lo concerniente a la especie, de acuerdo con Ochoa (1999) la capacidad de la absorción acústica de las especies varía con el tamaño de las hojas y la densidad del follaje, por lo que se hace necesario caracterizar la reducción acústica para las diferentes especies empleadas en los sistemas verticales de vegetación. Sin embargo, también se observa que la barrera verde de *Arundo donax* con una densidad superficial sustancialmente menor ($< 1/3$), puede alcanzar una reducción sonora similar al muro verde.

Se determinó una ecuación experimental que permite calcular la reducción de ruido en función de la masa de la barrera verde, la cual a su vez puede ser determinada conociendo la densidad y el espesor de la misma, y aunque dicha ecuación solo es aplicable bajo condiciones de densidad y espesor específicas, puede resultar de gran utilidad, ya que de acuerdo con Arenas (1996), las predicciones de las atenuaciones introducidas por las barreras requerirán de fórmulas para el diseño que sean fáciles de manejar y que permitan hacer cálculos rápidos. Es fácil darse cuenta que la sencillez en el cálculo de dichas medidas de mitigación incrementará el uso de las mismas.

Otra ventaja que autores como Olalla (1994) resaltan de las pantallas antirruido, son la protección física y privacidad que proveen. Adicionalmente, se puede decir que las barreras verdes de *Arundo donax* mejoran el paisaje y tienen el potencial de captura de carbono.

Se puede concluir que la barrera verde de *Arundo donax* es una alternativa para la reducción de ruido que puede implementarse en los establecimientos reconocidos como generadores de ruido en las ciudades a fin de contribuir al cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad aplicable en la materia. Del estudio se observa que, en un espacio relativamente reducido (0.3 a 0.8 m de espesor), es posible obtener una reducción promedio de la transmisión directa de entre 14 – 20 dBA cuando se trata de una fuente puntual de ruido.

7.6 Determinación del potencial de captura de CO₂ de una barrera verde de *Arundo donax*

Para la determinación del potencial de captura de CO₂ de una barrera verde *Arundo donax*, se determinó la densidad de la biomasa húmeda y la humedad, y posteriormente se calculó el contenido de carbono empleando el valor de contenido de carbono (43% de la biomasa seca) reportado por Nsanganwimana et. al. (2014) para esta especie. Mediante la proporción entre el peso de la molécula de CO₂ y el peso del átomo de C que la compone se halla la relación que se utilizará para obtener los kg de CO₂ equivalente a partir de la cantidad de carbono presente en la biomasa (44/12 = 3,67). En la tabla 7.12 se muestran los valores obtenidos para una barrera verde tipo.

Tabla 7.12: captura de CO₂ de una barrera verde tipo

Densidad de población:	120.00 tallos/m ²
Densidad húmeda:	48.40 kg/m ³
Humedad:	0.59
Densidad seca:	20.04 kg/m ³
CC:	0.43
Carbono:	8.62 kg/m ³ bv
CO ₂ :	31.59 kg/m ³ bv

Un sistema forrajero, según la especie y el tipo suelo, bien administrado puede secuestrar hasta de 260 toneladas de carbono por hectárea, mientras que proporciona importantes beneficios para la adaptación al cambio climático (FAO/ LEAD, 2007). Empleando los datos de la tabla y considerando una altura promedio de 4 m. se calculó una captura de CO₂ de 344 ton/ha para el *Arundo donax*.

Empleando la ecuación 7.6 se calculó la cantidad de CO₂ que potencialmente puede capturarse en una barrera verde con contenido de humedad de 59%. Lo anterior debido a que experimentalmente se determinó el contenido de humedad de las plantas cuando no se tienen restricciones de agua, como es el caso del SHBV.

$CC = \rho \times fh \times fc \times V \times fcc \dots$ ecuación 7.6	Humedad de las plantas: 59%; factor de humedad: fh = 0.59 Contenido de carbono: 43 %; factor de carbono: fc = 0.43 Volumen: ancho de la bv x alto de la bv x largo bv: V (m ³) Densidad: densidad de la barrera verde: masa aérea húmeda/volumen: ρ (Kg/m ³) Peso atómico del carbono: 12; peso molecular del CO ₂ : 44; factor de conversión de C a CO ₂ : fcc = 3.7 Captura de CO ₂ : cantidad de CO ₂ capturado en la biomasa de un metro lineal de barrera verde: CO ₂ (Kg/m)
--	--

7.6.1 Resultados de la determinación del potencial de captura de CO₂

En la tabla 7.13 se muestran los valores de captura de CO₂ por metro lineal de barrera verde, para diferentes valores de altura, ancho y densidad. Conociendo dichas variables es posible estimar la captura de carbono mediante la ecuación 3.6, sin embargo, si no se cuenta con los datos exactos, la tabla puede ser de utilidad para obtener un valor aproximado. Se utilizó un factor de humedad del 59%, ya que se considera que el humedal no tiene restricción en el suministro de agua por lo que siempre se encuentra saturado y por lo tanto las plantas también estarán saturadas.

Tabla 7.13: Captura de CO₂ por metro lineal de barrera verde variando la altura, el ancho y la densidad de la misma

Captura de CO ₂ (kg/m lineal de bv)							
Altura	Ancho	Densidad de biomasa húmeda (Kg/m ³)					
(m)	(m)	30	40	50	60	70	100
2	0.3	16.63	22.17	27.72	33.26	38.80	55.44
2	0.4	22.17	29.57	36.96	44.35	51.74	73.91
2	0.5	27.72	36.96	46.20	55.44	64.67	92.39
2	0.6	33.26	44.35	55.44	66.52	77.61	110.87
2	0.7	38.80	51.74	64.67	77.61	90.54	129.35
2	0.8	44.35	59.13	73.91	88.70	103.48	147.83
3	0.3	24.95	33.26	41.58	49.89	58.21	83.15
3	0.4	33.26	44.35	55.44	66.52	77.61	110.87
3	0.5	41.58	55.44	69.29	83.15	97.01	138.59
3	0.6	49.89	66.52	83.15	99.78	116.41	166.31
3	0.7	58.21	77.61	97.01	116.41	135.82	194.02
3	0.8	66.52	88.70	110.87	133.05	155.22	221.74
4	0.3	33.26	44.35	55.44	66.52	77.61	110.87
4	0.4	44.35	59.13	73.91	88.70	103.48	147.83
4	0.5	55.44	73.91	92.39	110.87	129.35	184.79
4	0.6	66.52	88.70	110.87	133.05	155.22	221.74
4	0.7	77.61	103.48	129.35	155.22	181.09	258.70
4	0.8	88.70	118.26	147.83	177.39	206.96	295.66
5	0.3	41.58	55.44	69.29	83.15	97.01	138.59
5	0.4	55.44	73.91	92.39	110.87	129.35	184.79
5	0.5	69.29	92.39	115.49	138.59	161.69	230.98
5	0.6	83.15	110.87	138.59	166.31	194.02	277.18
5	0.7	97.01	129.35	161.69	194.02	226.36	323.37
5	0.8	110.87	147.83	184.79	221.74	258.70	369.57

7.6.2 Discusión de resultados

En el apartado 8.5 de dimensionamiento se establece que un SHBV de 0.5 m de ancho y 3.3 m de largo es capaz de dar servicio a una persona promedio con una dotación de agua potable de 100 lt/hab.día, y tomando como base la altura promedio que alcanzan los individuos de *Arundo donax* de 4 m, se obtiene que el SHBV puede capturar 304.9 kg de CO₂ por ciclo. Un ciclo se refiere al periodo que se deja crecer la biomasa antes de ser podada, este puede ser anual.

Tabla 7.13b: Promedios de generación de CO₂ por persona al año en México, países industrializados y a nivel mundial

	Generación de CO ₂ (ton/hab.año)
Promedio en México	4.24
Promedio de los países industrializados	11
Promedio mundial	4
El objetivo mundial para combatir el cambio climático	2

Fuente: Elaborada con información disponible en <http://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx?lang=es&tab=8>

Si se realiza la comparación con la huella de carbono promedio reportada por la calculadora de carbono (tabla 7.13b), donde se reporta un promedio de 4 ton de CO₂/hab.año para los mexicanos, entonces el SHBV puede contribuir a capturar el 7% del CO₂ generado por un mexicano promedio. Este resultado es muy alentador si se toma en cuenta que el área requerida para la instalación del mismo es tan solo de 1.8 m², y que el agua de riego empleada es agua residual gris.

7.7 Método de propagación del *Arundo donax*

7.7.1 Antecedentes

La importancia de desarrollar una técnica de propagación de la especie *Arundo donax*, radica en el hecho de que al tratarse de una especie que actualmente no tiene importancia comercial en nuestro país, no están disponibles en el mercado. Por tal motivo se requiere la recolección de ejemplares silvestres para posteriormente propagarlos. Sin embargo, el *Arundo donax* solo se reproduce sexualmente por medio de semilla en su área de origen (Sanz-Elorza, 2004). Debido a la falta de semillas, la única forma de reproducción disponible es la propagación vegetativa mediante el uso de diversas partes del cuerpo de la planta. La propagación vegetativa consiste en regenerar una planta completa a partir de una parte de la misma, es decir, a partir de una hoja, un tallo, una raíz. Esto es posible debido a la capacidad de las células meristemáticas vegetales de diferenciarse hacia células con una vocación diferente dependiendo de las condiciones ambientales en las que se encuentren. En el caso del *Arundo Donax*, esta capacidad le ha resultado de vital importancia ya que, en los lugares donde no es autóctona se reproduce únicamente por vía asexual mediante sus robustos rizomas, de manera mucho más rápida y eficaz, que pueden alcanzar considerables distancias desde la planta madre (Sanz et. al., 2004).

De acuerdo con Nsanganwimana et. al. (2014) el método más efectivo para la propagación del *Arundo Donax* es la utilización de rizomas. Se plantan rizomas de 10 a 20 cm de largo máximo, con 2-3 yemas y un peso de 50 g a una profundidad de 15-20 cm y se cubren inmediatamente con tierra (Quinn & Holt 2008, Angelini et al., 2009). El contenido de agua de los rizomas debe ser suficiente para permitir el brote rápido y aumentar la tasa de supervivencia. Si los rizomas suministrados no se plantan directamente, deben conservarse a 4 ° C durante una semana para evitar el secado (Quinn & Holt 2008).

En las regiones templadas, la primavera es el mejor período para la plantación. Para la plantación directa de campo, los rizomas se plantan a principios de la primavera, mientras que las estacas de tallo y las plántulas cultivadas en interiores se siembran a fines de la primavera para evitar el daño tardío por heladas. En las regiones cálidas y tropicales, la plantación es posible a través del año, pero el riego será necesario durante la temporada seca (Nsanganwimana et. al., 2014). En un suelo bien regado, la emergencia de los brotes se produce rápidamente en un período de 7 a 10 días después de la plantación, y se logra una tasa de supervivencia de 100% cuando los rizomas plantados y los fragmentos del tallo tienen brotes sanos bien desarrollados (Lewandowski et al. 2003; Ceotto & Di Candilo 2010).

7.7.2 Técnicas de propagación vegetativa

División

Consiste en separar una planta en varios ejemplares autónomos, técnica que se vale del hábito de muchas plantas de producir una masa de vástagos o yemas muy unidas formando una mata o corona de crecimiento. La mata o corona puede dividirse en secciones, cada una con sus propias raíces (Toogood, 2003)

Esquejes

La multiplicación a partir de esquejes explota la habilidad de algunas plantas en que un fragmento de tejido vegetal (tallo, hoja, raíz o yema) puede convertirse en una planta nueva totalmente desarrollada con sus propias raíces y yemas (Toogood, 2003).

En la tabla 7.20 se muestran los tipos de esquejes que pueden ser utilizados para la propagación vegetativa. La selección del tipo de esquejes dependerá de la especie, ya que es necesario aprovechar las características propias de la misma.

Tabla 7.14: Tipos de esquejes

Tipo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Esquejes tiernos.	Se obtienen de los primeros brotes de primavera.	Poseen el mayor potencial de enraizamiento.	Promedio de supervivencia bajo Susceptibilidad de aplastamiento Susceptibilidad de podredumbre.
Esquejes juveniles.	Tallos jóvenes que empiezan a afirmarse.	No son tan propensos a marchitarse por lo que son de fácil manejo.	
Esquejes semimaduros.	Tallos robustos y yemas desarrolladas.	Es posible obtener esquejes con talón especialmente en plantas perennes de hojas grandes y coníferas.	
Esquejes leñosos.	Se toman de tallos en estado de latencia.	Son robustos y no suelen secarse.	Tardan más en enraizar.
Esquejes de yemas foliares.	Se obtienen de arbustos.	Constituyen una forma económica de utilizar tallos jóvenes.	
Esquejes foliares.	Se refieren a las secciones de tejido o foliar o las hojas completas.		No todas las especies pueden regenerar plantas completas a partir de hojas o partes de estas.
Esquejes de raíz.	Generalmente son raíces gruesas y carnosas capaces de almacenar alimento.		Un número limitado de especies produce vástagos a partir raíces.
Rizomas.	Tallos abultados que crecen horizontalmente por debajo o por encima del suelo.	Pueden multiplicarse si se cortan en secciones de material joven y sano que cuenten al menos con una yema.	

Fuente: Elaborada con información de (Toogood, 2003)

Para realizar la propagación de esta especie se utilizó la técnica de esquejes y probaron tipos diferentes de esquejes, tallos maduros, retoños jóvenes y rizomas. A continuación se describen los sitios de recolección de material biológico y el procedimiento de propagación de cada uno de los tipos de material biológico.

Obtención del material biológico

Los tallos, rizomas y retoños se extrajeron de tres sitios ubicados en el municipio de Nicolás Romero. A continuación se describen cada uno de los sitios:

Sitio 1: Vía Corta a Morelia

Se trata de una población silvestre creciendo a la orilla de lo que antes fue un arroyo y ahora es un colector de drenaje urbano proveniente de la Col. El Globo. La población de *Arundo donax* se encuentra ubicada en la col. Lomas de Guadalupe sobre la Vía Corta a Morelia en el municipio de Nicolás Romero (figura 7.15).

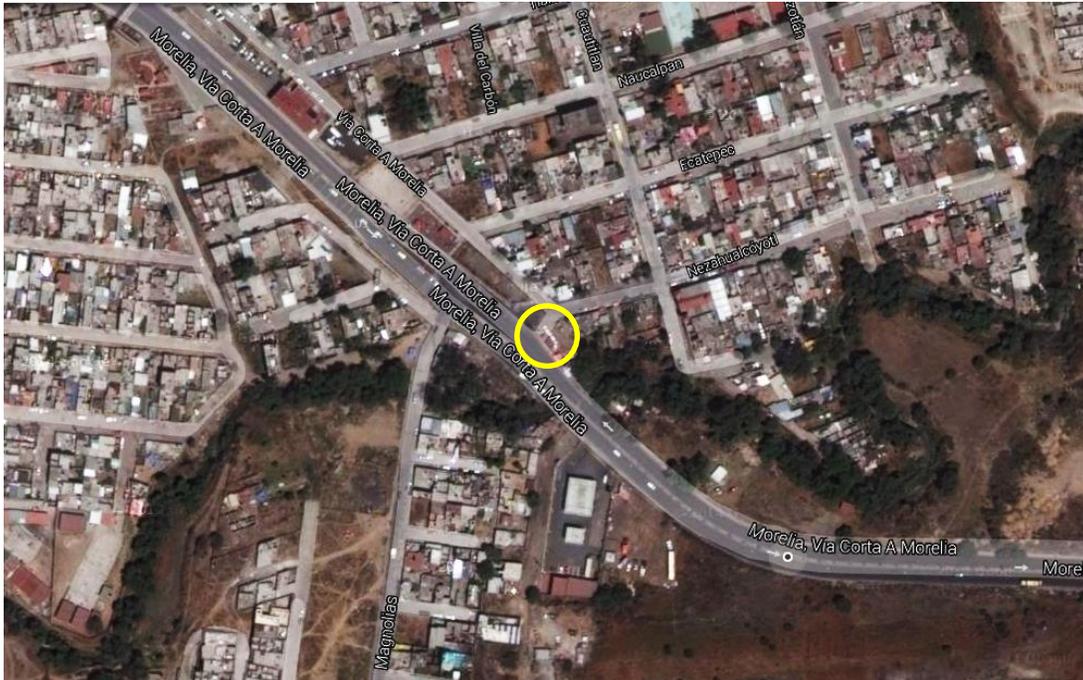


Figura 7.15: Sitio 1 de recolección de material biológico, Via Corta a Morelia, Lomas de Guadalupe, Ciudad Nicolás Romero, MEX Coordenadas 19.632345, -99.299262. Fuente: Google maps

Tallos maduros

El material biológico que se obtuvo de este sitio fueron tallos de 1.5 m y diámetro de 2-3 cm. Estos tallos corresponden a la punta. Se cortaron 90 tallos y se colocaron en recipientes de polietileno empleando tezontle como sustrato y agua residual gris para su riego. El agua se mantuvo en el nivel máximo del recipiente con la finalidad de garantizar su disponibilidad durante todo el tiempo.

Los tallos se secan en un tiempo aproximado de 15 días, sin embargo, empiezan a reverdecer alrededor de 30 días después de que fueron plantados. En la figura 7.16 se muestran tallos a tres meses de haber sido plantados. Estos tallos presentan crecimiento de retoños a lo largo del tallo y en la base. La ventaja de esta técnica es que se puede obtener una cobertura prácticamente inmediata, independientemente de que al inicio las plantas en apariencia no estén vivas.



Figura 7.16: Barrera verde con tres meses de haber sido plantada en recipientes de polietileno

Sitio 2: Loma del Río

Está constituido por un humedal doméstico ubicado en Av. Patos No. 2, col Loma del Río, Nicolás Romero, en el Estado de México (figura 7.17). El humedal es alimentado con efluente doméstico del tipo aguas residuales grises, es decir agua jabonosa proveniente de la ducha, del lavado de ropa, y lavado de trastes.



Figura 7.17: Sitio 2 de recolección de material biológico ubicado en Av. Patos No. 2, col Loma del Río, Nicolás Romero. Coordenadas 19.63863, - 99.346097. Fuente: Google maps

Retoños jóvenes

Los tallos del *Arundo donax* crecen desde el suelo de manera individual sin ramificaciones, solo presentan crecimiento de hojas a cada 10 – 12 cm. Sin embargo cuando el tallo alcanza alrededor de 3 m de altura se observa el crecimiento de pequeños tallos brotando del mismo sitio donde brotan las hojas. A estos tallos se les denomina retoños (figura 7.18a). Estos retoños son capaces de desarrollar raíces y por consiguiente una nueva planta completa. Por tal motivo se utilizaron para la propagación.

Para la propagación se obtuvieron retoños del sitio 2 descrito anteriormente. Los retoños recolectados contaban con una longitud de 10 – 100 cm. Los cuidados que deben tenerse en la obtención del material biológico son:

- Cortar solo retoños maduros: los cuales cuentan con la suficiente firmeza para no doblarse ni fracturarse cuando son desprendidos del tallo principal. La longitud y el diámetro del retoño no son factores que determinen la madurez del mismo.
- Cortar retoños completos (imagen 7.18b): es importante que en el momento de desprender el retoño del tallo principal se realice desde la base, ya que si este tejido permanece unido al tallo, la regeneración de las raíces no sucederá debido a que es precisamente en la base donde se encuentran las células meristemáticas indiferenciadas.
- Evitar el uso de herramientas punzocortantes: cuando los retoños están maduros es posible desprenderlos fácilmente sin ayuda de alguna herramienta, por lo que se recomienda realizar esta actividad solo empelando las manos para asegurarnos que solo se cortarán los retoños que cuenten con las características deseadas.



Figura 7.18: Retoños *Arundo donax*. a) unidos al tallo principal, b) desprendidos desde la base, c) Con raíces de 15 días

Una vez que se cuenta con los retoños, estos deben ser colocados en recipientes plásticos empleando como sustrato arena y agua residual. Es posible utilizar agua potable, sin embargo, el crecimiento es acelerado cuando se utiliza agua residual. Las raíces empiezan a desarrollarse al término de la primera semana, sin embargo, se trata de raíces extremadamente frágiles que se desprenden con el mínimo contacto o movimiento (figura 7.18c). Es la función de la arena, mantener los retoños fijos, sin movimiento hasta que las raíces se encuentren suficientemente fuertes para, en caso de ser necesario, realizar el trasplante, sin embargo, se sugiere colocar los retoños en el recipiente definitivo donde se pretende que crezcan. Los retoños se secan durante este periodo y empiezan a reverdecer a partir de los 30 días de haber sido colocados en la arena. Los retoños no solo regeneran raíces, también se propicia la formación de nuevos tallos como se observa en el círculo amarillo de la figura 7.18c. El crecimiento radicular mostrado en la misma imagen corresponde a un tiempo de 15 días contados a partir de que los retoños fueron colocados en un recipiente con agua. También se colocaron retoños en recipientes con hidrogel, con la finalidad de acelerar el proceso y evitar que se presente pudrición como ocurre en el caso de colocarlos solo en agua.

Sitio 3: Capetillo

Se trata de una población silvestre creciendo a la orilla de un drenaje urbano en un predio particular ubicado en la calle 1ª de Mayo, col. Dr. Ignacio Capetillo, Nicolás Romero, Edo. de México (figura 7.19). Antiguamente se trataba de un cauce natural de agua que posteriormente fue utilizado para descarga de aguas residuales de la mancha urbana. Actualmente dicho cauce ha sido entubado en su mayoría y solo quedan pequeñas áreas al aire libre.



Figura 7.19: Sitio 3 de recolección de material biológico. calle 1ª de Mayo, col. Dr. Ignacio Capetillo, Nicolás Romero, Edo. de México. Coordenadas 19.619360, - 99.320348. Fuente: Google maps

Rizomas

Debido a que de manera natural es el medio que utiliza la especie para reproducirse, se utilizaron rizomas extraídos del sitio 3, los cuales se colocaron en recipientes plásticos usando tezontle como sustrato y regados con agua residual doméstica. Sin embargo, esta técnica presenta algunas desventajas:

- *Tiempo de cobertura: debido a que cuando se plantan los rizomas, no cuentan con follaje, e necesario esperar el desarrollo del mismo, el cual depende de las condiciones ambientales.*
- *Mano de obra para la obtención de los rizomas: Las plantas de *Arundo donax* crecen en poblaciones muy densas (300 tallos/m²), que aunado a la fortaleza de sus rizomas, ocasionan que el trabajo de extracción de los mismos requiera de fuerza considerable, sobre todo al compararlo con el trabajo requerido para la obtención de tallos y retoños.*



Figura 7.20: rizomas de *Arundo donax*

En condiciones ambientales ideales (suficiente humedad y luz solar) empiezan a brotar los tallos de *Arundo donax* alrededor de 15 días después de haber plantado los rizomas. Si se plantan directamente en el suelo regado con agua residual el desarrollo es más rápido que si se plantan en recipientes. El tiempo de cobertura hasta los 2.5 m de altura correspondientes a un muro de un edificio de 1 piso puede



extenderse hasta los seis meses. En la figura 7.21 se muestran plantas de *Arundo donax* obtenidas mediante la propagación por rizomas, con altura promedio de 2 m y densidad de población de 200 tallos/m². El tiempo de cobertura fue de 6 meses aproximadamente. En un periodo de 1 año se obtuvieron tallos con altura promedio de 4.5 m, que posteriormente fueron cortados.

Figura 7.21: Población de *Arundo donax* obtenida mediante la técnica de propagación por rizomas, regada con agua residual gris y empleando tezontle como sustrato

8. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL SHBV

8.1 Materiales

El primer punto a revisar dentro del procedimiento de construcción del SHBV son los materiales que se requieren. El SHBV se compone básicamente por el sustrato y el material vegetal, sin embargo, es necesario la incorporación de materiales de conducción y almacenamiento del agua, con la finalidad del aprovechamiento de la misma. A lo largo de este inciso se describen cada uno de dichos componentes.

8.1.1 Sustrato

Por sustrato nos referimos al material que actuará como sostén para las raíces de las plantas de *Arundo donax*. Burés (1997) señala que sustrato es cualquier medio que se utilice para el cultivo de plantas en contenedores, donde se entiende por contenedor cualquier recipiente que tenga altura limitada. Por su parte Abad et. al. (2004) señala que sustrato es todo material sólido distinto del suelo in situ, natural, de síntesis o residual, mineral u orgánico, que, colocado en un contenedor, en forma pura o en mezcla, permite el anclaje del sistema radicular, desempeñando, por tanto, un papel de soporte para la planta y que éste puede intervenir o no en la nutrición vegetal.

En general, podemos resumir que un sustrato para el cultivo de plantas es todo material que puede proporcionar anclaje, oxígeno y agua suficiente para el óptimo desarrollo de las mismas, o en su caso nutrimentos, requerimientos que pueden cubrirse con un solo material o en combinación con otros, los cuales deberán ser colocados en un contenedor (Cruz-Crespo et. al., 2013).

La selección del medio filtrante en los humedales artificiales está basada en los costos del material, los objetivos del tratamiento y en su diseño específico. Tradicionalmente se ha utilizado el triturado, la roca muerta o el canto rodado de río (Reed et al., 1995).

Las características del sustrato que se requieren son:

- *Inerte*: los nutrientes para las plantas se obtendrán de la carga contaminante del agua residual.
- *Tamaño de partícula*: 0.5 – 5 cm con la finalidad de optimizar la superficie de contacto disponible para el desarrollo de la película de microorganismos encargados de la depuración del agua residual. Adicionalmente, este tamaño de partícula permite el adecuado desarrollo de las raíces.
- *Porosidad, rugosidad*: estas características no son indispensables pero sí deseable, ya que permitirán el incremento del área de contacto.
- *Disponibilidad*: el mejor material de sustrato siempre será el que se encuentre disponible en el lugar donde se instalará el SHBV, lo que además garantizará su bajo costo. De nada sirve un material con las mejores características si para obtenerlo se requiere la inversión de gran cantidad de recursos. Resulta de suma importancia no perder de vista que el objetivo primordial de la instalación del SHBV es contribuir a la sustentabilidad del edificio residencial.

De acuerdo con Rodríguez (2003) los medios más comúnmente utilizados como sustratos en sistemas de humedales artificiales son los que aparecen en la tabla 8.1:

Tabla 8.1: Materiales comúnmente usados como sustrato de humedales construidos

Tipo de material	Diámetro de partícula (mm)
Arena gruesa	2
Arena gravosa	8
Grava fina	16
Grava media	32
Roca gruesa	128

Fuente: elaborada con información de Rodríguez (2003)

Los tipos de sustrato recomendados para el SHBV son:

i. *Arena*

Se le llama arena al material mineral cuyo tamaño de grano es menor de 4.7 mm. La arena se encuentra subdividida en, arena fina con un tamaño de grano que va de 0.074 a 0.42 mm, arena mediana cuando se tienen granos de 0.42 a 2.0 mm y arena gruesa si sus granos miden desde 2.0 hasta 4.7 mm de acuerdo con Ruiz & González (1999).

La arena consiste en agregados extraídos de sitios naturales como ríos, lagos, depósitos volcánicos o artificiales que han sido triturados. Se origina de la descomposición química y mecánica de la roca bajo la abrasión y meteorización. Cuando las partículas acaban de formarse son angulosas, pero sus bordes son redondeados a través del tiempo por la acción del agua y del viento. Se encuentra constituida normalmente de cuarzo (sílice) con una pequeña proporción de mica, feldespato, magnetita y otros minerales.

La arena cuenta con las siguientes propiedades significativas: a) absorción: 28.11%, b) peso específico seco: 1.66 ton/m³ y, c) peso específico saturado: 2.12 ton/m³. Por tanto, la arena no es ligera, y su absorción de agua es moderada (Tena et. al. 2017).

ii. *Grava*

La clase conocida como grava agrupa a los materiales minerales cuyos límites de tamaño de grano se encuentran entre 4.7 y 75 mm. Esta clase, a su vez se subdivide en grava fina, con tamaño de grano de 4.7 – 20 mm y grava gruesa con tamaño de grano de 20 – 75 mm (Ruiz & Gozález1999). Para los fines de la construcción del SHBV se utilizará gravafina.

iii. *Tezontle*

Es un material rojizo, de origen volcánico, es ligero y con una apariencia esponjosa. En nuestro país se utiliza con gran éxito. La capacidad de retención de agua es de 49%.

Se ubica en laderas de cerros, volcanes y depresiones. Sus propiedades significativas: a) absorción: 20.46%, b) peso específico seco: 1.56 ton/m³ y, c) peso específico saturado: 1.87 ton/m³. El tezontle es un material ligero y con un índice de absorción de agua razonable (Tena et. al. 2017). El tamaño de partícula recomendado debe encontrarse entre 5 y 20 mm.

iv. *Piedra de río*

Es origen natural pulida por el paso constante del agua a través del tiempo, dejando una superficie lisa y redondeada

Se utiliza en la decoración de jardines cascadas y fuentes, jardinerías, necerías, arriates de jardín, cocheras, banauetas o muros. Así como para delimitar caminos o crear superficies planas.

Por sus características en los jardines ayuda en el control de hierbas, mantiene la humedad promedio del suelo, evita la erosión y la formación del lodo.

Es posible encontrarlas en diversos tamaños de partícula, en la tabla siguiente se muestra un ejemplo de clasificación de acuerdo al tamaño y su presentación comercial.

Tabla 8.2: Tamaños disponibles de piedra de río

Piedra bola de río #1
Piedra bola de río #2.5
Piedra bola de río #3
Piedra bola de río #4
Piedra bola de río #5
Piedra bola de río toronja y más
Piedra bola de río gigante

v. *Tepojal (piedra pómez)*

La piedra pómez es una piedra volcánica formada por piroclásticos porosos, que se constituyen de vidrio en forma de espuma y que se forman durante un enfriamiento muy rápido de un magma ascendiente de alta viscosidad. Estos son muy características de las vulcanitas claras y ácidas. El término "piedra pómez" incluye todas las rocas piroclásticas porosas. Su origen es volcánico el cual le dio ciertas características como, una multitud de poros y células cerradas que dan por resultado una porosidad con una solidez de grano al mismo tiempo. La porosidad permite absorber y retener el agua, además de hacerla ligera y otorgarle condiciones particulares, especialmente para el filtrado de productos de elaboración industrial. La piedra pómez es tan suave que puede ser tallada, torneada y grabada con gran facilidad. Su color blanco le da una gran vistosidad, siendo también útil para la decoración. Debido a su ligereza puede flotar sobre las aguas a causa del aire contenido en sus cavidades. Aparte de eso la piedra pómez es resistente al frío, al fuego y a la intemperie y libre de sales solubles en agua. Las partículas de esta roca volcánica, poseen variadas formas predominando las alargadas y las angulosas. Sus poros cerrados le confieren una baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es muy ligero, aunque es de dureza media, debido a su alta friabilidad el poder abrasivo es muy bajo, produciendo un efecto muy suave sobre la superficie trabajada. Composición Química contiene compuesto de trióxido de sílice y trióxido de aluminio, entre otros componentes: 71% de SiO₂, 12,8% de Al₂O₃, 1,75% de Fe₂O₃, 1,36% de CaO, 3,23% de Na₂O, 3,83% de K₂O, 3,88% de H₂O (Cundy et. al. 2005).

El tepojal es una arena arcillosa que se encuentra en abundancia dentro de nuestro país. Sus propiedades: a) módulo de finura: 4.16, b) absorción: 54.25%, c) peso específico seco: 1.04 ton/m³ y, g) peso específico saturado: 1.60 ton/m³, por lo que se considera al tepojal como un material muy ligero y con altos índices de absorción de agua (Tena et. al. 2017).

vi. *Otros*

Se pueden utilizar partículas de material plástico tales como las tapa roscas de los envases (polietileno de alta densidad), siempre y cuando se aseguren de que dichos materiales se encuentran libres de sustancias peligrosas. Resulta indispensable evitar utilizar tapa roscas de envases de aceites lubricantes, anticongelantes, destapacaños, solventes, etc. Al momento de utilizar materiales plásticos es importante tomar en cuenta la densidad del mismo, ya que es necesario que el sustrato no flote.

En la tabla 8.3 se muestra la variación de la superficie de contacto en función del tamaño de partícula. Se observa que a menor tamaño de partícula, se incrementa la superficie de contacto, excepto en el caso de las tapa roscas. Lo anterior ofrece una ventaja para este último sustrato, sin embargo es necesario tomar en cuenta otras características, tales como la disponibilidad del material y la densidad del mismo.

Tabla 8.3 Comparación de tamaño de partícula y superficie de contacto de los sustratos recomendados para el SHBV.

<i>Material</i>	<i>Tamaño de partícula (cm)</i>	<i>Densidad (kg/m³)</i>	<i>Superficie de contacto / volumen de sustrato (m²/m³)</i>
<i>Arena</i>	<i>< 0.5</i>		<i>628.3</i>
<i>Grava</i>	<i>0.5 – 3.0</i>		<i>101.6</i>
<i>Tezontle</i>	<i>< 2.0</i>		<i>157.1</i>
<i>Piedra de río</i>	<i>3.0 -5.0</i>		<i>62.8</i>
<i>Taparoscas (PEAD)</i>	<i>2.5 – 3.0</i>		<i>359.2</i>

Para el cálculo de la superficie de contacto se tomó en cuenta material con alta esfericidad y alto grado de redondez (figura 8.1) de acuerdo con la clasificación Swanson (1981). En lo referente a la

esfericidad, la arena, la grava y las taparoscas, cumplen con un parámetro alto, sin embargo el caso del tezontle y las piedras de río, se encuentran un poco alejadas del ideal. Hablando de la redondez, el único sustrato que tiene un alto grado en este rubro son las piedras de río, sin embargo, un alto grado de redondez resulta contraproducente para los propósitos del SHBV, ya que entre mayor sea la redondez, menor será la superficie de contacto.



Figura 8.1: Clasificación del grado de redondez y esfericidad (Swanson, 1981)

8.1.2 Impermeabilizante

El impermeabilizante es un medio que impide la infiltración del agua hacia el suelo. En el caso del SHBV, además puede tener la función de limitar el desarrollo de las raíces, con la finalidad de evitar un crecimiento descontrolado que pueda ocasionar la invasión de espacios externos al humedal. Al respecto, recientemente se han desarrollado tecnologías usadas en el ramo de la reproducción de plantas que permiten un óptimo desarrollo de la planta mediante la limitación del crecimiento de la raíz utilizando recubrimiento de sales de cobre. En este apartado se describen los diferentes medios existentes en el mercado para la impermeabilización del canal del humedal. Se incluyen contenedores con recubrimiento de cobre.

i. Geomembrana HDPE (High Density Polyethylene)

Una geomembrana es una lámina fabricada con resinas de Polietileno de alta densidad (HDPE) de muy alta calidad, lo que les permite tener una alta resistencia química, excelentes propiedades mecánicas y alta durabilidad.

Las geomembranas de Polietileno y geomembranas de PVC están específicamente diseñadas para condiciones expuestas. No contienen aditivos o rellenos que puedan evaporarse y causar deterioro a medida que pasa el tiempo. Son resistentes a una amplia gama de productos químicos, incluyendo ácidos, sales, alcoholes, aceites e hidrocarburos, pudiendo estos actuar concentrados y/o diluidos a diferentes temperaturas.

Las geomembranas son utilizadas para la impermeabilización del suelo con el fin de contener líquidos o sólidos, de forma que no se filtren al subsuelo.

La instalación de la geomembrana debe ser realizada por técnicos especialistas, la unión de las geomembranas se realiza por termofusión, para lo cual hay máquinas especiales para la soldadura de la geomembrana en obra.



Figura 8.2: Geomembrana plástica empleada para impermeabilizar un estanque de almacenamiento de agua.

Fuente: <https://www.mgeosinteticos.com.mx/productos/geomembrana/>

Gracias a estas propiedades el uso de las geomembranas es muy amplio y algunas de sus aplicaciones son:

- **Uso agrícola:** Se utiliza en la construcción de tanques u ollas de captación de agua pluvial.
- **Uso en minería:** La geomembrana se utiliza como revestimiento del suelo en pilas de lixiviación y en canales.
- **Ingeniería civil:** Impermeabilización de losas, sellado de túneles.

<https://www.mgeosinteticos.com.mx/productos/geomembrana/>

ii. *Contenedores plásticos*

Actualmente existen en el mercado contenedores de plástico de casi cualquier dimensión y resistencia que se busque. Muchos de estos contenedores están diseñados para su uso específico como almacenamiento de agua y cultivo de plantas en la intemperie. En el caso del SHBV, las especificaciones necesarias son:

Material : Polietileno de alta densidad

Ancho : 0.3 – 0.6 m

Profundidad: 0.6 m

Largo : Variable, pueden unirse varios

Resistencia de carga: Depende del sustrato usado, si se emplea arena (el más pesado), deberá tener una resistencia similar al peso específico saturado de 2.1 ton/m³

Resistencia a los rayos UV: En caso de que se excave el canal y se coloque el contenedor dentro de dicho canal, no se requerirá de resistencia a los rayos UV, sin embargo, si se deja a la intemperie, se recomienda usar un material tratado con protección UV, ya que de lo contrario, la durabilidad del contenedor será menor

*En la figura 8.3 se pueden observar ejemplos de contenedores plásticos de gran capacidad, con características de resistencia a la intemperie. También se muestra una aplicación de este tipo de contenedores para la implementación de barreras verdes, (figura 8.3b), en este caso empleando la especie *Equisetum sp* (cola de caballo).*



Figura 8.3: a) ejemplo de contenedores de polietileno de alta densidad de 80, 110, 140 160 , 210, 310, 380 650 y 700 litros de capacidad. b) Ejemplo de contenedores de plástico para una barrera verde cola de caballo

*Fuente: <http://www.plasticostreserres.com.mx/uso-rudo.html>
<http://www.fiberland.com.mx/images/macetas-de-fibra-de-vidrio-jardineras-rectas-5.jpg>*

iii. *Canales construidos*

Los canales del SHBV pueden ser construidos empleando materiales como blocks (figura 8.4a) o placas de hormigón (figura 8.4b) Este material tiene las siguientes ventajas:

- *Gran durabilidad*
- *Se puede construir a la medida que se requiera*
- *Se puede conectar fácilmente al sistema de drenaje y alcantarillado si es necesario.*
- *Es ideal si se quiere instalar el SHBV como barda perimetral.*

Aunque pareciera la mejor opción para el sistema, tiene la desventaja del costo relativamente elevado de los materiales y de la mano de obra.



*Figura 8.4: a) canal construido con placas de hormigón armado, b) canal construido con block. Fuente a): <https://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=65256>
Fuente b): <http://hondudiario.com/2016/12/12/el-proyecto-de-construccion-de-canales-de-aguas-lluvias-en-sps-en-etapa-final/>*

En el caso del canal de placas de hormigón armado, no se requerirá acabado, sin embargo, en el de block, además será necesario darle un acabado de aplanado fino con cemento para garantizar la impermeabilidad del canal.

iv. *Contenedores de concreto*

Aunque son menos comunes que los de plástico, los contenedores de concreto, también pueden encontrarse en el mercado en diversas formas y tamaños. Estos se usan frecuentemente como jardineras y fuentes, por lo que cumplen con los requisitos

necesarios para el SHBV. Sus principales desventajas son su relativamente elevado precio y su también elevado peso. La principal ventaja es que existen establecimientos que los pueden fabricar en el tamaño específico que se requiera (figura 8.5).



Figura 8.5: a) ejemplo de contenedores de concreto susceptibles de ser usados en el SHBV. Fuente: <https://www.economicos.cl/productos/jardineras-de-cemento-codaACEJEY.html>



Figura 8.5: b) ejemplo de jardineras de concreto con una barrera verde de bambú
Fuente: <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/564x/af/c1/b5/afc1b59735658a1d5c4870fedd8eb6c4.jpg>

v. *Contenedores con recubrimiento de cobre*

Existen contenedores de poliestireno y de polietileno que incluyen una película a base de soluciones de sales de cobre (hidróxido o carbonato de cobre) en las paredes interiores.

Esta película tiene la función de prevenir que la raíz de las plantas se incruste en las paredes de las cavidades y la de favorecer la poda química lateral de las raíces primarias de las plantas (NMX-AA-170-SCFI-2014).

De acuerdo con Abud et. al. (2013), la inhibición del crecimiento de la raíz primaria debida a la exposición al cobre, se correlaciona con la pérdida de la actividad mitótica, ya que la zona de crecimiento se hace más pequeña cuando la raíz se expone al metal, por la expansión de las células a una menor distancia del ápice.



Figura 8.6: Maceta de plástico soplado de 75 litros
Fuente: <http://www.arbolviejo.com.ar/macetas-de-plastico>

Sin embargo, debido al uso de estos contenedores en la producción de plantas, los tamaños disponibles no corresponden con las necesidades del SHBV (figura 8.6). Por lo que se recomienda su uso al interior de un canal excavado previamente (figura 8.7)

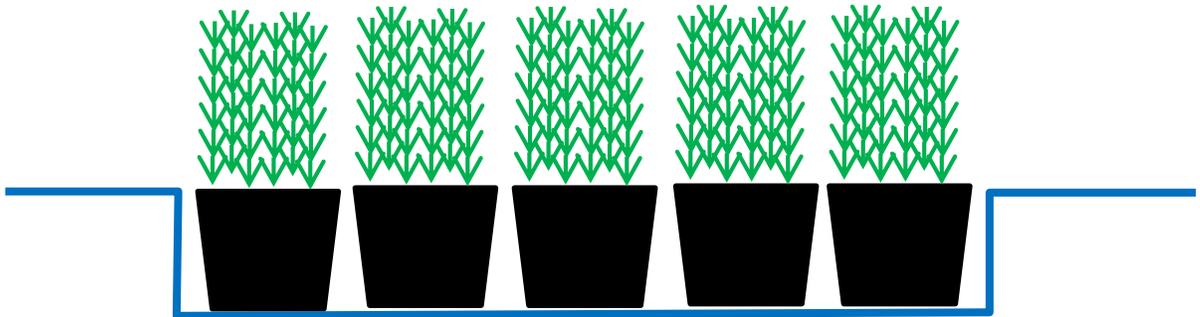


Figura 8.7: Esquema del uso de contenedores plásticos con recubrimiento de cobre en el canal del humedal.

8.1.3 Tubería para conexión

La tubería recomendada para la instalación del SHBV es la de PVC sanitario. El diámetro utilizado comúnmente para instalaciones de agua residual doméstica oscila entre 2" – 4" y depende directamente del gasto generado. Si se trata de una casa habitación unifamiliar, rara vez se requiere un diámetro mayor a 2", sin embargo, con la intención de evitar que se generen taponamientos debido a los sólidos que comúnmente se encuentran en este tipo de agua residual, se utiliza un diámetro mayor (generalmente 4"), de tal forma que se garantice el flujo continuo siempre.

Debido a su relativamente bajo costo de este tipo de tubería, utilizar un diámetro mayor no representa un gran incremento en el costo total del SHBV, y si puede facilitar el funcionamiento y evitar gastos posteriores por mantenimiento correctivo (limpieza y desazolve de la tuberías).

Por otra parte, debido a que se trata de un material de uso común, se pueden encontrar fácilmente todo tipo de accesorios como válvulas y conexiones (figura 8.8).



Figura 8.8: Tubería y accesorios de PVC

Fuente: https://http2.mlstatic.com/D_Q_NP_974325-MLM25422233146_032017-H.jpg

Cabe mencionar que el uso de este tipo de tubería y accesorios facilita la instalación del SHBV, ya que no se requiere de mano de obra especializada y prácticamente cualquier persona con una instrucción básica puede realizar dicha instalación. Lo anterior cobra relevancia porque repercute en el costo de la mano de obra, el cual en general puede ser reducido o incluso eliminado si el propietario está dispuesto a realizarlo por sí mismo.

Al final estos pequeños detalles contribuyen de manera importante a la sustentabilidad del SHBV, ya que uno de los obstáculos que presentan algunas tecnologías ambientales es precisamente la necesidad de mano de obra especializada y los costos derivados de la misma.

8.1.4 Contenedores para almacenar el agua residual y el agua tratada

Los contenedores para almacenamiento de agua recomendados para el SHBV son los mismos utilizados en las instalaciones hidráulicas y sanitarias de los edificios habitacionales y de servicios. Los más comúnmente utilizados son elaborados con polietileno de alta densidad y su costo depende directamente de su capacidad.

Cabe mencionar que es necesario verificar las dimensiones de los accesorios de conexión, ya que si los contenedores se utilizan para agua potable, el diámetro de las entradas y salidas no concuerda con el de la tubería de instalaciones sanitarias, por lo que se hace necesario instalar accesorios para la conexión.



Figura 8.9: ejemplo de contenedor de almacenamiento

8.2 Diseño sostenible

A raíz del deterioro ambiental acelerado de la segunda mitad del siglo XX, creció la preocupación respecto del impacto ambiental originado por la construcción y operación de las edificaciones, lo cual a su vez dio como consecuencia el surgimiento de posibles alternativas para minimizar y mitigar dicho impacto ambiental. Una de las alternativas que pretende dar soluciones desde el origen mismo de la problemática es el diseño sostenible aplicado a la construcción de edificios. Derivado de esto, a lo largo de las últimas décadas han surgido diversas metodologías. En la tabla 8.4 se enumeran algunas de las principales metodologías desarrolladas con este propósito.

Tabla 8.4: Metodologías para el diseño sostenible

Metodología	Principios
Diseñar con la naturaleza	Busca limitar el impacto ambiental de la construcción y se esfuerza por fortalecer los sistemas que sostienen la vida.
Principios Todd	El diseño debe ser sostenible a través de la integración de sistemas vivos. El diseño debe seguir las leyes de la vida, no oponerse a ellas.
Principios Sanborn	Ecológicamente responsables reconociendo el límite de los recursos. Accesibles física y económicamente; para personas con capacidades diferentes e ingresos limitados; mezcla de usos.
Diseño integrado y regenerativo	Aplicar el pensamiento sistémico para abordar el sistema como un todo, no solo las partes, logrando diseños ecológicos, costeables y profundamente eficientes.
Principios Melbourne para comunidades sostenibles	Modelar los procesos urbanos en los procesos naturales de los ecosistemas.
Principios One Planet	Cero carbón Cero residuos Agua sostenible Hábitats naturales; flora y fauna silvestres
Biomimesis	Se basa en emular las estrategias de los seres vivos para desempeñar las funciones que queremos que desempeñen las tecnologías. Emular el proceso Emular el ecosistema

Fuente: Elaborada con información de Aguilar-Dubose (2011)

Además de la metodología para el diseño sostenible, también es posible aplicar el modelo “Posibilista” de arquitectura bioclimática (ver tabla 8.4) planteado por d'Amico, (2014). Este modelo expresa la necesidad de tomar en cuenta las condiciones actuales y motivar cambios paulatinos y “posibles” en la construcción de edificios nuevos y modificación de los existentes. Para el modelo posibilista la aplicación de herramientas amigables con el ambiente no se limita a tecnologías sofisticadas de altos costos de instalación y operación como el modelo Hi – tech, o a técnicas de aprovechamiento de los elementos naturales que prohíben el uso de materiales comunes en la actualidad, cayendo en un extremo conservacionista inviable para esta época como es el caso del modelo primitivista. Para el modelo posibilista, el objetivo es aplicar conocimientos, materiales, herramientas, etc. que sean amigables con el medio ambiente, al mismo tiempo que son compatibles con el estilo de vida de “la mayoría” de las personas en la época actual. En la tabla 8.4 se describen los tres modelos planteados por la arquitectura bioclimática.

En la arquitectura bioclimática debe existir una conexión con la naturaleza, Teniendo en cuenta las condiciones climáticas y medioambientales para lograr óptimo confort térmico dentro. Se trata de diseño y elementos arquitectónicos, evitando la dependencia total de los sistemas mecánicos, que se solo consideran apoyo (Tundrea & Budescu 2013).

Tabla 8.5: Modelos de arquitectura bioclimática

Modelo	Descripción
Primitivista	Soluciones vernáculas. Reivindicación de lo natural. Asentamientos humanos de baja densidad, una vuelta al medio rural. Fundamentalismo ecológico, prohibición o limitación de materiales de construcción, de mayor consumo energético o procesos industriales con una alta repercusión ambiental. Empleo de materiales considerados naturales, como la tierra, la madera o la arcilla. Escasa solvencia para ser empleadas a gran escala en el asentamiento de millones de personas. Inviabile para aplicación masiva. Insostenible por ser imposible su sustitución a gran escala.
Hi - tech	Integración ambiental, de la tecnología: "eco-tech". Modelo exhibicionista que aplica alardes técnicos en la resolución de edificios, con complejos sistemas activos de control climático (vidrios de alta eficiencia, sistemas móviles robotizados de protección, sistemas de captación solar activa) controlados por ordenador (domótica). La eficiencia energética se limita al mantenimiento, sin tener en cuenta el costo energético de construcción (generalmente elevadísimo). Debido a su elevado costo sólo es asumible por corporaciones privadas de alto nivel económico, que lo exhiben como símbolo de poder y como objeto publicitario dentro de la moda actual por lo ecológico. Positivo: apuesta por la innovación continua Negativo: empleo de soluciones y sistemas sobredimensionados, satisfacer una imagen, su elevado costo, inviable a gran escala, y muy poco aplicable a la edificación de viviendas, el sector económicamente más necesitado.
Posibilista	Modelo que se basa en introducir, mejoras en el diseño arquitectónico con un pequeño incremento de costos, se obtengan notables beneficios en ahorro energético y adecuación ambiental. No implica complejas transformaciones de la industria productiva actual (utiliza materiales habituales en el proceso constructivo). Está en concordancia con normativas internacionales en concepto de eficiencia energética y protección ambiental y suficientemente flexible para adaptarse a diferentes necesidades y demandas económicas y sociales. Adaptable a la idiosincrasia social y económica de cada lugar. Compatible con las necesidades de desarrollo y sostenibilidad a las que se enfrentan los países del segundo y tercer mundo.

Fuente: Elaborada con información de d'Amico, (2014)

La incorporación del SHBV al diseño de cualquier tipo de edificios, fomentaría la aplicación de los principios citados en la tabla 8.5, ya que su objetivo principal es la disminución del impacto ambiental, mediante la integración de sistemas vivos, además de que plantea el aprovechamiento de los recursos (agua residual) de manera sustentable. Por otra parte, se trata de un sistema sencillo y barato accesible para un gran número de personas de diversas condiciones económicas y sociales. Asimismo, se trata de un sistema integral multifuncional, que propone la integración de elementos naturales en el ambiente urbano. Por último, el uso de humedales para el tratamiento de agua residual y amortiguamiento térmico, constituye una "imitación" de los ecosistemas.

8.3 Variables de diseño

8.3.1 Volumen de agua residual

El volumen de agua residual es la variable más importante en el diseño del humedal. El volumen de generación y el tiempo de residencia en conjunto determinan el tamaño del humedal, sin embargo, como el tiempo de residencia se establecerá como una constante ($t_r = 5$ días), toda la responsabilidad recae sobre el volumen de agua residual.

El volumen de agua residual puede determinarse por varios métodos.

i. *Método de la dotación*

Este método es el más sencillo y se usa mucho para diseñar instalaciones hidráulicas y sanitarias. Consiste en investigar el valor de la dotación diaria de agua potable establecida por persona para la zona donde se ubica el edificio. Ese valor solo se multiplicará por el número de habitantes del edificio y posteriormente por el tiempo de residencia. Al final se obtendrá el volumen de agua generado en un periodo de tiempo similar al que permanecerá el agua en el humedal.

La información sobre la dotación de agua potable para cada región puede estar disponible en las oficinas de los organismos de agua potable de cada municipio o delegación. Este método es útil cuando se trata de edificios nuevos, tales como casas de interés social, edificios de departamentos entre otros.

Ejemplo:

Dotación de agua potable = 100 lt / hab . día

No. de personas en la vivienda = 4

Tr = 5 días

Vol. de agua residual = dotación X habitantes X tiempo de residencia
= 100 lt / hab . día X 4 hab. X 5 días = 2000 lt

i. *Método del flujo volumétrico*

Este método consiste en la medición directa del flujo volumétrico en la descarga de agua residual que se conectará al humedal. Para obtener un valor de flujo volumétrico útil en el dimensionamiento del humedal, se requiere realizar un muestreo de 16-24 horas como se establece en la NMX-003-AA-SCFI-1980 (ver tabla 8.6). Este muestreo debe repetirse a lo largo de una semana para obtener el promedio semanal.

Tabla 8.6: Planeación de muestreo compuesto

Duración del muestreo (horas)	No. de muestras simples	Tiempo entre muestras
0-4	1-2	2-4
4-8	2-4	2-4
8-16	3-4	3-4
16-24	4-6	4-6

Fuente: NMX-003-AA-SCFI-1980

En un edificio residencial se genera agua residual durante el tiempo que permanecen en actividad los habitantes de la misma, por lo que se requiere de un estudio del horario de actividades. De manera general se puede decir que la actividad en este tipo de edificios ocurre en el intervalo de

las 6:00 a.m. a las 11:00 p.m., por un periodo aproximado 15 horas, que en muchas ocasiones puede alargarse hasta 16 horas. Por tal motivo se sugiere tomar el periodo de 16 horas para el muestreo. A continuación se muestra un ejemplo de cómo debe realizarse el muestreo compuesto para un periodo de actividad de 16 horas.

Ejemplo de determinación de flujo volumétrico por muestreo compuesto de agua residual en un edificio residencial.

En la tabla 8.7 se muestra el número de muestras simples que deben tomarse, el periodo de tiempo de espera entre muestra y muestra y el horario sugerido para realizar la toma de cada muestra. También se muestran valores hipotéticos para el flujo volumétrico con los cuales se realizará el ejemplo del cálculo del volumen de agua residual generada.

Tabla 8.7: Ejemplo de programación de muestreo de agua residual

Duración del muestreo (horas)	No. de muestras simples	Tiempo entre muestras (horas)	Horario de la toma de muestras simples		Flujo volumétrico
			Muestra	Horario	
16	5	4	Muestra 1	6:00 hrs	1.5 l/min
			Muestra 2	10:00 hrs	0.2 l/min
			Muestra 3	14:00 hrs	1.0 l/min
			Muestra 4	18:00 hrs	0.5 l/min
			Muestra 5	20:00 hrs	0.8 l/min
Flujo volumétrico promedio					0.8 l/min
Volumen de agua residual					3840 l

Con los datos de flujo volumétrico de las muestras puntuales se calcula el flujo volumétrico promedio. Y con este promedio se calcula el volumen generado (ver ecuación 1) durante el periodo de tiempo indicado como tiempo de residencia (t_r) del humedal.

$$\text{Vol. de agua residual} = \text{flujo vol. prom.} \times 60 \text{ min} \times \text{periodo de actividades} \times t_r$$

$$\text{Vol. de agua residual} = 0.8 \text{ l/min} \times 60 \text{ min} \times 16 \text{ hr/día} \times 5 \text{ días}$$

$$\text{Vol. de agua residual} = 3840 \text{ l}$$

Como es de esperarse, si se realiza el muestreo por un periodo de tiempo mayor, se contará con resultados más confiables que si solo se realiza un día. La recomendación es realizarlo por lo menos durante una semana completa, para tener datos tanto de los días de trabajo como del fin de semana, ya que las actividades no son las mismas y por supuesto la generación de agua residual tiene variaciones importantes, tales como las correspondientes al uso de la lavadora de ropa y limpieza general de la casa, ya que por lo regular estas actividades solo se realizan y vez a la semana o incluso en ocasiones 1 vez cada dos semanas, en cuyo caso, el muestreo se deberá realizar por dos semanas.

Algunas desventajas de este método son:

- El flujo de agua residual es intermitente.
- El flujo de agua residual a lo largo del día es muy variable, por momentos puede ser muy grande y permanecer varias horas en cero.

ii. *Método del consumo promedio*

El método consiste en establecer un inventario de actividades que generan agua residual, posteriormente se determina el volumen generado por actividad, al final se multiplica el volumen de cada actividad por la frecuencia de la misma en el periodo establecido como tiempo de residencia. Cuando se tienen los datos de volumen por actividad, se suman para obtener el volumen de agua residual total.

Ejemplo de determinación de volumen de agua residual por consumo promedio.

En la tabla 8.8 se muestra un ejemplo de inventario de generación de agua residual con las actividades características para un edificio de uso habitacional.

Para determinar el volumen unitario se requiere que los habitantes realicen la medición directa del volumen de agua usado en cada una de las actividades. En algunos casos como el uso de la lavadora de ropa, puede recurrirse al consumo nominal del electrodoméstico, en caso de que el fabricante lo reporte en la ficha técnica. Es importante mencionar que se omite el WC dentro de este inventario debido a que el SHBV está indicado para usarlo solo con agua residual gris, ya que la mejor solución para el tratamiento del agua residual con excretas es la fosa séptica.

Tabla 8.8: Inventario de actividades generadoras de agua residual

<i>Actividad</i>	<i>Volumen unitario (m³)</i>	<i>Frecuencia en Tr</i>	<i>Volumen en Tr (m³)</i>
<i>Baño en regadera</i>	<i>0.05</i>	<i>5</i>	<i>0.25</i>
<i>Carga de ropa en lavadora</i>	<i>0.2</i>	<i>3</i>	<i>0.6</i>
<i>Lavado de trastes</i>	<i>0.1</i>	<i>1</i>	<i>0.1</i>
<i>Lavado de dientes</i>	<i>0.001</i>	<i>15</i>	<i>0.015</i>
<i>Lavado de manos</i>	<i>0.001</i>	<i>15</i>	<i>0.015</i>
<i>Limpieza general de la casa</i>	<i>0.05</i>	<i>1</i>	<i>0.05</i>
<i>Total</i>			<i>1.020</i>

Tr: tiempo de residencia = 5 días

Una de las principales desventajas de este método es la necesidad de determinar el volumen de agua residual generado por actividad, ya que se requiere de la participación activa de los habitantes de la residencia, lo cual en la mayoría de los casos es difícil de conseguir. Sin embargo, si se realiza a conciencia, este resulta el método más confiable para conocer el volumen de agua residual generado.

8.3.2 Porosidad de sustrato

Para determinar el volumen del humedal se requiere conocer el volumen de agua residual generada, el tiempo de residencia y el factor de porosidad del sustrato. Este último se refiere al volumen de agua residual que puede contenerse en los espacios vacíos existentes entre las partículas de sustrato, si además el sustrato tiene capacidad de absorber agua, este factor se incrementa. El factor de porosidad del sustrato depende de dos características básicas del mismo, el tamaño de partícula y la porosidad en sí misma. Para determinar el factor de porosidad del sustrato se requiere realizar una sencilla prueba, a continuación se detalla el procedimiento.

Procedimiento para determinar el factor de porosidad del sustrato

Materiales:

- Recipiente de volumen conocido, se recomienda utilizar un volumen de 1 litro
- Volumen de sustrato igual al del recipiente
- Agua
- Probeta

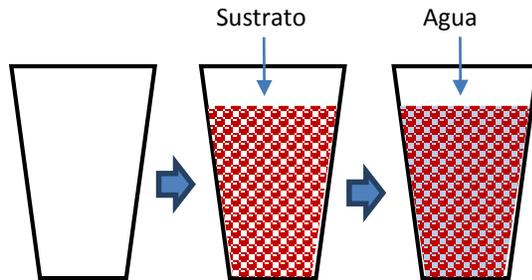


Figura 8.10: Procedimiento de determinación del factor de porosidad

- Colocar el sustrato a probar en un recipiente de volumen conocido
- Con un instrumento de medición de volumen (puede ser una probeta), agregar agua lentamente permitiendo que el aire se libere y los espacios sean ocupados por el agua, ayudar a que esto ocurra mediante movimientos ligeros del sustrato.
- Dejar reposar (30 min. aprox.) para asegurarse que todo el aire ha salido y que todos los poros han sido ocupados por el agua.
- En caso de ser necesario agregar más agua hasta que el sustrato quede totalmente cubierto.
- El factor de porosidad del sustrato se calcula con la siguiente fórmula

$$Fps = \text{Volumen de agua} / \text{volumen del sustrato}$$

- El Fps mínimo que se puede tener, considerando las partículas del sustrato como esferas perfectas y la porosidad del material propiamente dicho de cero, es de 0.48, por lo que es recomendable un valor mayor a 0.5. Para fines prácticos, se puede usar $Fps = 0.5$

Por otro lado, también es necesario tomar en cuenta la superficie de contacto de las partículas de sustrato, ya que estas proveen la superficie necesaria para el establecimiento de la película de microorganismos encargados de la degradación de los contaminantes del agua. La superficie de contacto depende directamente del tamaño de partícula del sustrato, de tal manera que entre menor sea el tamaño de partícula, será mayor la superficie de contacto. En la tabla 8.9 se muestra la superficie de contacto para diferentes tamaños de partícula considerando sustrato con partículas esféricas y sin poros.

Tabla 8.9: Cálculo de la superficie de contacto en función del tamaño de partícula del sustrato

<i>Tamaño de partícula (diámetro en cm)</i>	<i>Superficie de contacto por unidad de volumen del sustrato (m^2/m^3)</i>
<i>0.5 cm</i>	<i>628.3192</i>
<i>1.0 cm</i>	<i>314.1596</i>
<i>2.0 cm</i>	<i>157.0798</i>
<i>3.0 cm</i>	<i>101.6095</i>
<i>4.0 cm</i>	<i>78.5399</i>

8.3.3 *Tiempo de residencia*

Para efectos de tratamiento de agua residual, el tiempo de residencia se define como el periodo que transcurre desde que el agua residual ingresa al sistema de tratamiento hasta en el momento que sale del mismo. Para calcular el valor de este parámetro es necesario conocer la calidad del influente y la calidad que se requiere del efluente. El tiempo que tarda en alcanzar la eficiencia de remoción establecida como requisito en el efluente es diferente dependiendo del proceso que se utilice en el sistema de tratamiento.

Para el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial influyen otros factores como el clima, ya que con temperatura baja se inhibe la actividad de los microorganismos, también la especie vegetal utilizada, específicamente el tipo de raíces, y como ya se comentó anteriormente, el sustrato, sin embargo, para fines prácticos diversos estudios han establecido intervalos que pueden ser aplicados para obtener eficiencias de remoción aceptables. Delgadillo (2010) establece un tiempo de residencia de 4 – 15 días, siendo el valor usual 7 días. Mientras que Rodríguez (2003) recomienda valores de 3-4 y 6-10 dependiendo de la carga orgánica. Para el SHBV se establece un tiempo de residencia de 5 días debido a que el agua residual proviene solamente de la ducha, el lavado de ropa y de trastes, y no contiene la materia orgánica proveniente del WC, que representa la mayor aportación de este tipo de contaminante. Cabe aclarar que el objetivo principal del SHBV no es el tratamiento del agua residual, sino el aprovechamiento de la misma para el establecimiento de la barrera verde que proporcione otros beneficios como el amortiguamiento térmico – acústico y captura de carbono.

8.4 Ubicación

La ubicación del SHBV resulta de suma importancia porque nos permite aplicar las estrategias de bioclimatización, de acuerdo con el clima del sitio. Para designar la ubicación del humedal se utilizó el enfoque centrado en el movimiento del sol, ya que se trata de un fenómeno predecible de manera muy exacta. Dicho enfoque es el usado por el Colegio de Arquitectura Bioclimática A. C.

Para ubicar y orientar correctamente el humedal, de tal forma que sea posible obtener los mayores beneficios en cuanto bioclimatización es necesario conocer el clima específico del lugar donde se piensa instalar, ya que cada clima requiere estrategias diferentes para lograr el confort al interior de los edificios.

Para determinar el tipo de clima de una localidad en específico de manera práctica, es suficiente con conocer la temperatura media del mes más caluroso del año y la precipitación media anual. En la Matriz de zonas climáticas se muestran los principales climas presentes en el país, relacionados con los requerimientos para alcanzar el confort.

Figura 8.11: Matriz de zonas climáticas

		CÁLIDO SECO: Enfriamiento y humidificación	CÁLIDO: Enfriamiento	CÁLIDO HÚMEDO: Enfriamiento y deshumidificación
26°C				
Temperatura media del mes más caluroso		TEMPLADO SECO: Humidificación	TEMPLADO: Sin requerimientos	TEMPLADO HÚMEDO: Deshumidificación
	21°C			
		SEMI-FRÍO SECO: Calentamiento y humidificación	SEMI-FRÍO: Calentamiento	SEMI-FRÍO HÚMEDO: Calentamiento y Deshumidificación
			650 mm	1000 mm

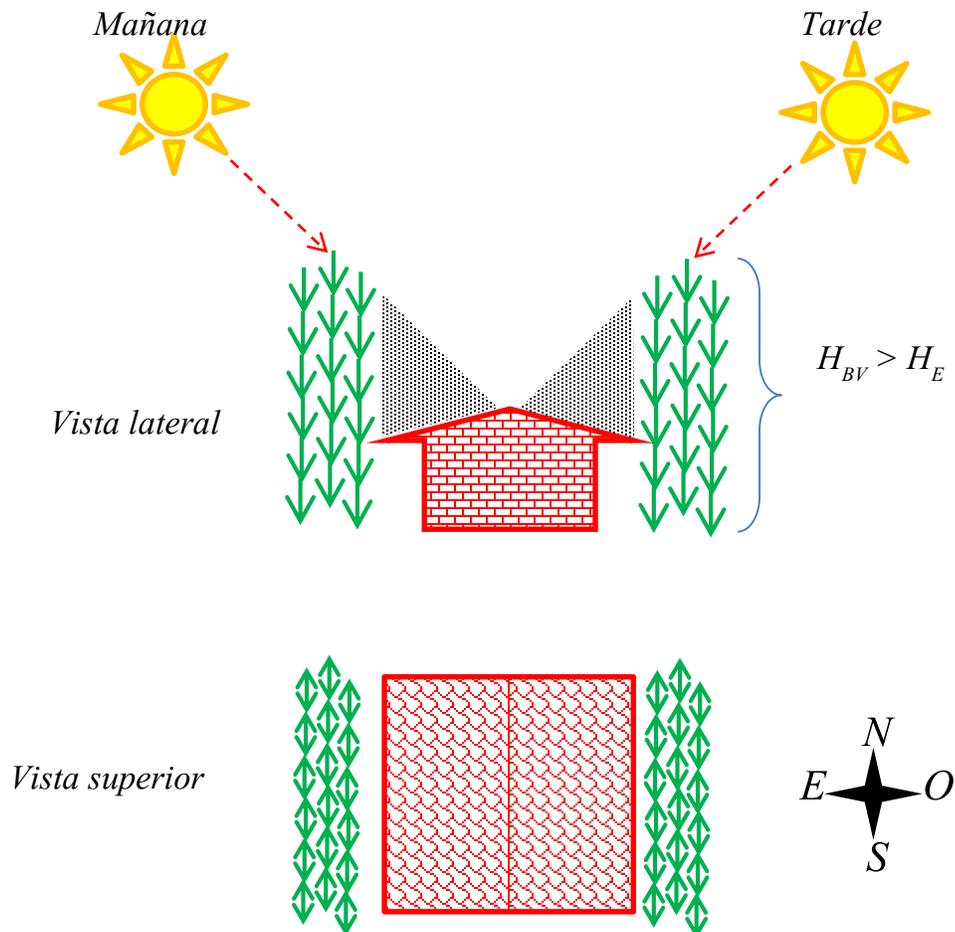
Fuente: Colegio de Arquitectura Bioclimática Aplicada A.C.

En la Matriz de zonas climáticas se especifican los requerimientos para cada tipo de clima. Aplicando las estrategias bioclimáticas proporcionadas por el sistema humedal-barrera verde, el enfriamiento puede conseguirse mediante el sombreado, el cual puede ser regulado mediante la ubicación y la altura de las plantas. La humidificación se obtiene a partir de la transpiración de las plantas, para regular el nivel de humidificación se debe variar el volumen de biomasa, por medio de la variación en el ancho del humedal y la altura de las plantas. El calentamiento y la deshumidificación se consiguen mediante el calentamiento solar, motivo por el cual la ubicación del humedal no debe entorpecer el paso de los rayos del sol cuando esto sea necesario.

Una vez que se haya identificado el tipo de clima típico de la región donde se quiere instalar el SHBV se puede usar como guía los esquemas para cada tipo de clima que se muestran a continuación.

En estos esquemas se especifica el tipo de clima, la orientación respecto a los puntos cardinales, el ancho del sistema y la altura de las plantas recomendados, también se justifica la ubicación del humedal respecto a las estrategias bioclimáticas empleadas.

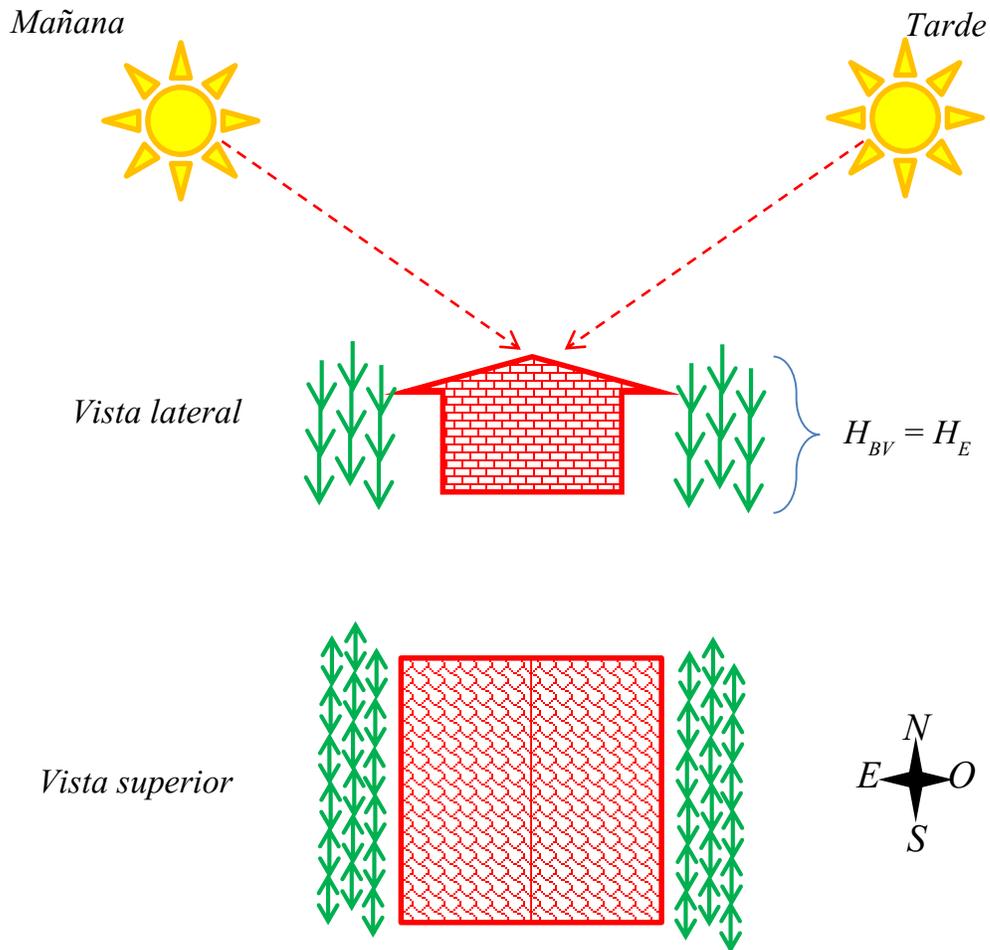
Figura 8.12: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO SECO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Asimismo, para maximizar este beneficio es conveniente dejar que las plantas alcancen la mayor altura posible, cabe recordar que la especie *Arundo donax* puede crecer en promedio 6 m de altura en condiciones ambientales favorables.

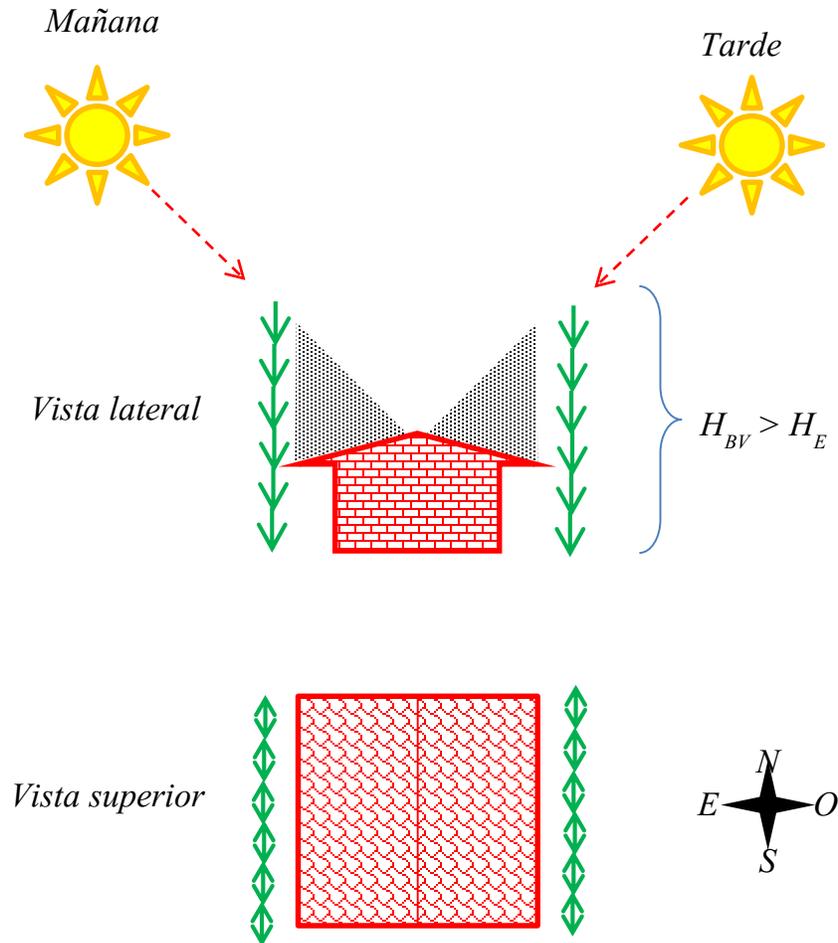
Si se tiene una altura de las plantas mayor a la altura del edificio se reducen las horas de sol, solo al medio día en el techo. Se debe maximizar el ancho del sistema (0.6 m o más de ser posible), para obtener el mayor volumen vegetal, lo cual a su vez dará como resultado mayor transpiración. De esta forma se maximizará la refrigeración evaporativa, principal estrategia bioclimática requerida en este tipo de clima.

Figura 8.13: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Debido a que en este caso la estrategia de refrigeración evaporativa se necesita en menor magnitud que en el caso del clima cálido seco, el volumen de la biomasa vegetal requerido para la transpiración es menor, por lo que la altura de las plantas puede mantenerse similar a la del edificio.

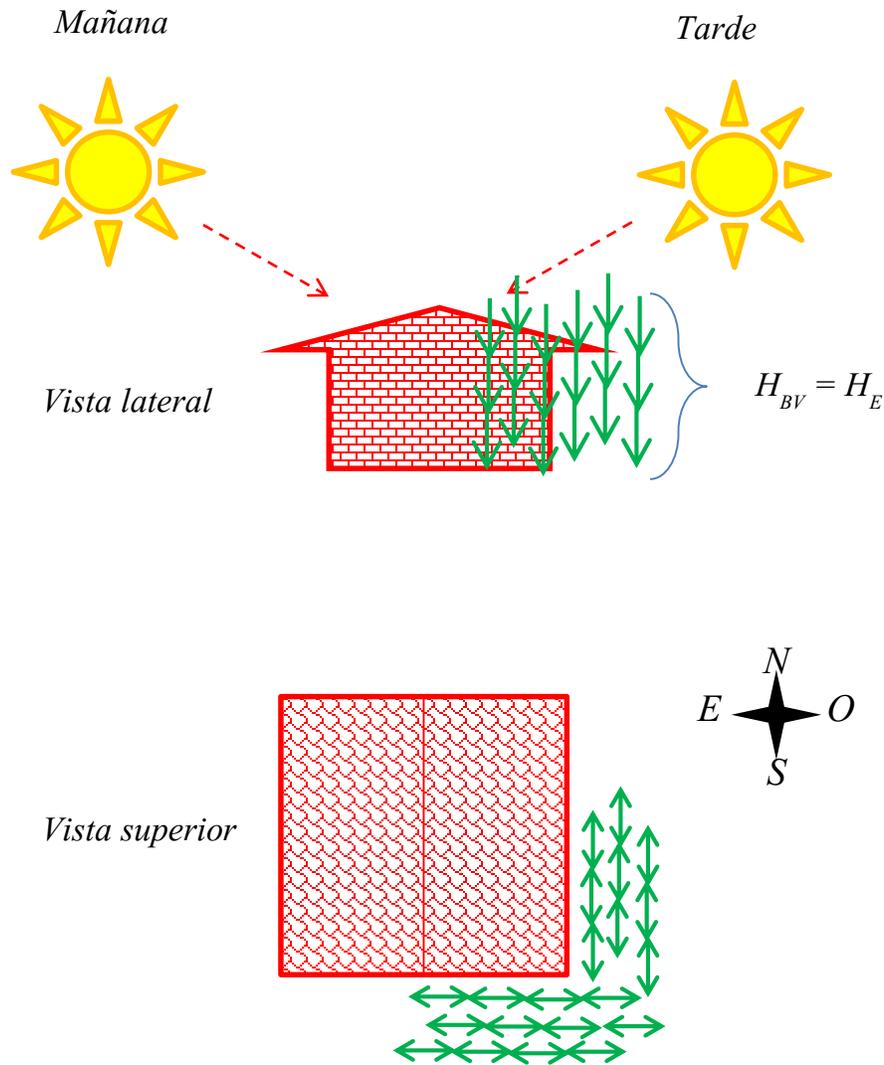
Figura 8.14: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA CÁLIDO HÚMEDO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste del edificio, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Con la finalidad de maximizar la estrategia de sombreado, la altura de las plantas, se recomienda, en la media de lo posible, mantenerla superior a la altura del edificio.

Contrario a los casos de clima cálido seco y clima cálido, en este caso no se requiere la estrategia de refrigeración evaporativa, por lo que se recomienda que el volumen de la biomasa vegetal debe minimizarse para evitar la transpiración, esto puede lograrse manteniendo el ancho del humedal en el valor mínimo (0.3 m).

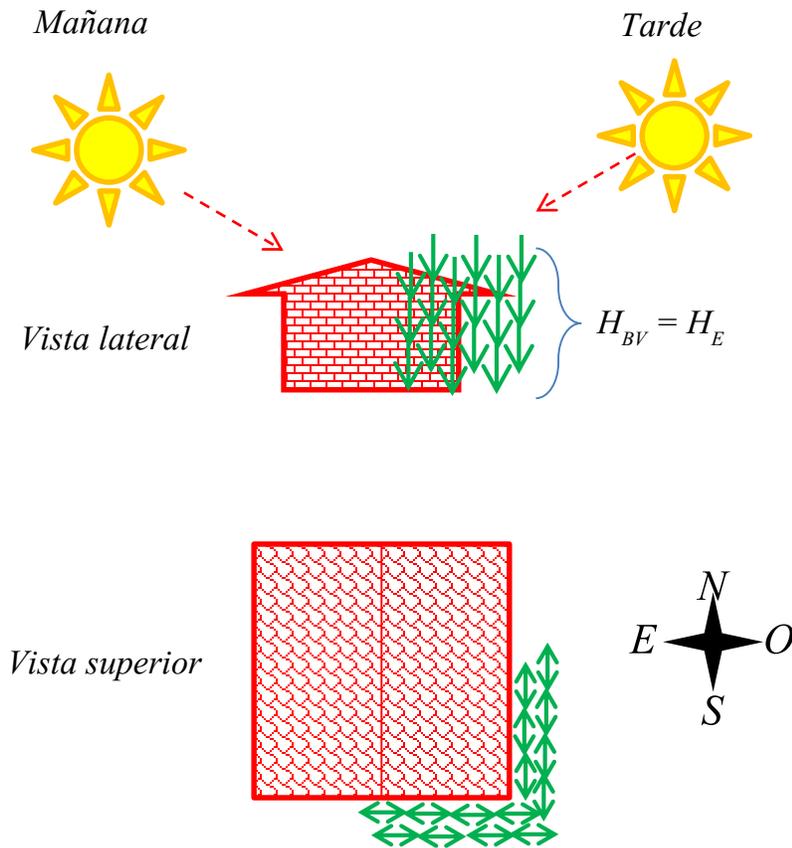
Figura 8.15: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPLADO SECO



Quando existe un clima templado seco, se requiere solo un poco de refrigeración evaporativa, por tal motivo se recomienda ubicar el humedal en el extremo noroeste del edificio, de tal manera que solo haya transpiración en las últimas horas de la tarde cuando el calentamiento es más intenso.

Esta ubicación también permitirá el calentamiento solar por la mañana cuando es menos intenso. En cuanto a la altura de las plantas, se recomienda mantenerla igual al edificio, ya que no se requiere estrategia de sombreado sobre el techo.

Figura 8.16: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPLADO HÚMEDO

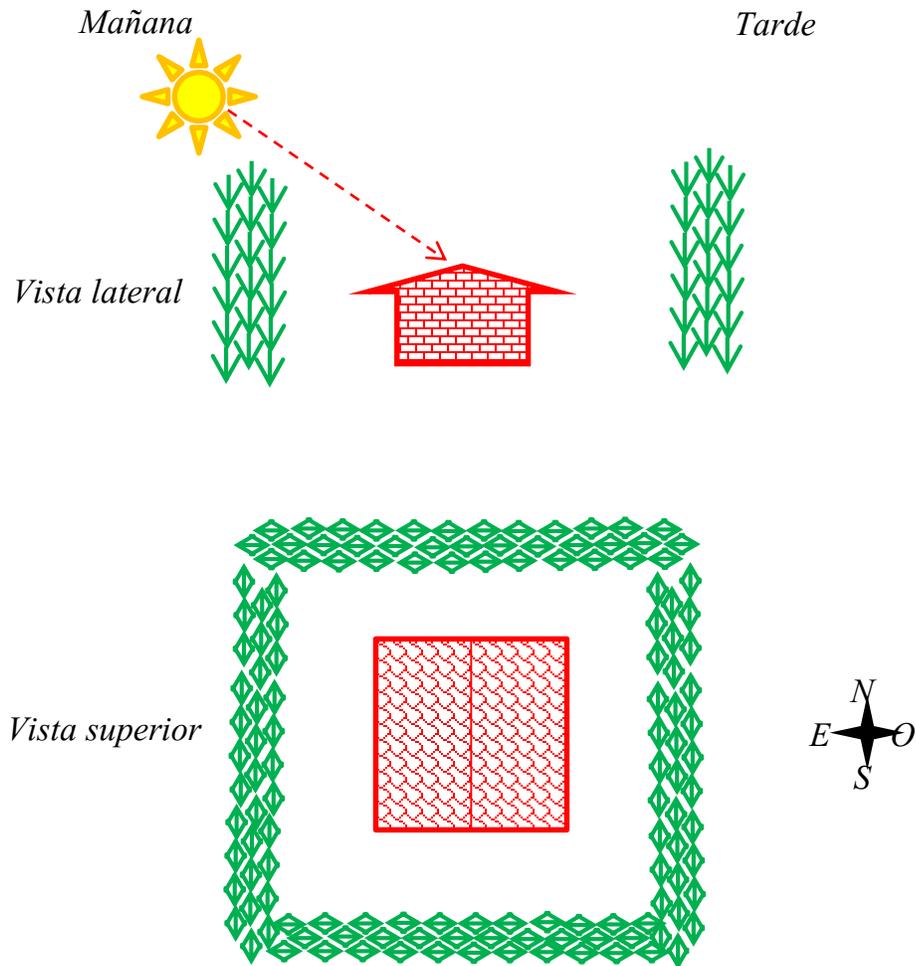


Cuando existe un clima templado húmedo, no se requiere refrigeración evaporativa, por tal motivo se recomienda disminuir el volumen de la biomasa vegetal mediante la reducción del ancho del humedal (0.4 m aprox.). Asimismo, se debe ubicar el humedal en el extremo noroeste del edificio, de tal manera que solo haya transpiración en las últimas horas de la tarde cuando el calentamiento es más intenso.

Esta ubicación también permitirá el calentamiento solar por la mañana cuando es menos intenso. En cuanto a la altura de las plantas, se recomienda mantenerla igual al edificio, ya que no se requiere estrategia de sombreado sobre el techo.

En este clima también puede aplicarse el humedal como barda perimetral que se muestra en la figura 8.17

Figura 8.17: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA TEMPLADO

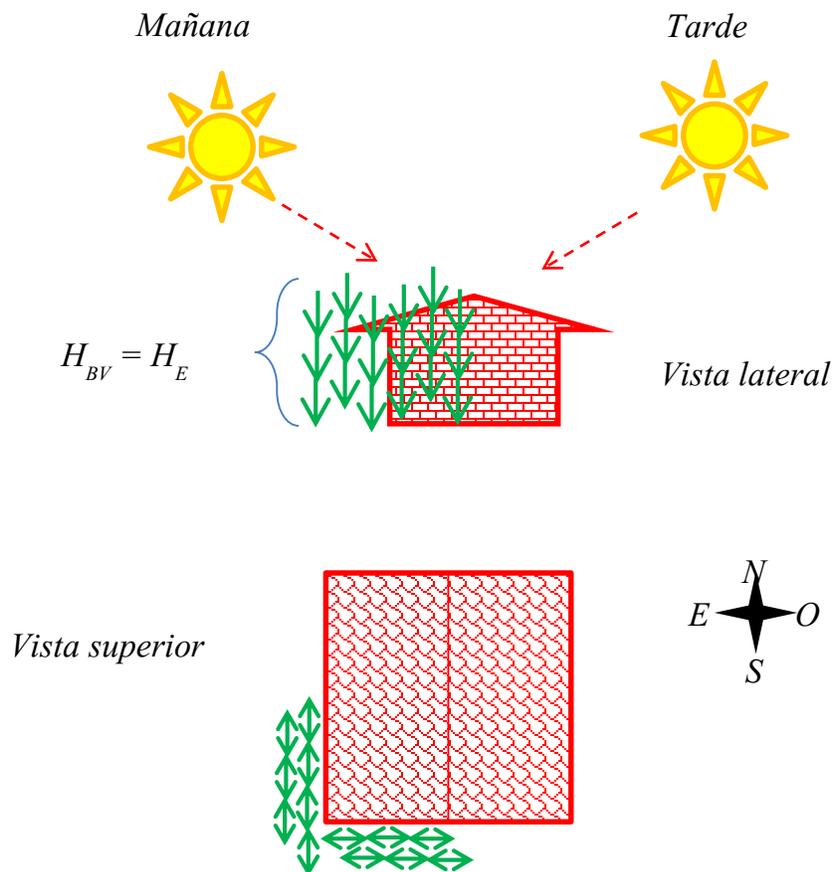


El clima templado no requiere la aplicación de estrategias bioclimáticas para alcanzar condiciones ambientales de confort. Por tal motivo, la ubicación del humedal no tiene que ver con favorecer el sombreado o la transpiración.

En este caso se recomienda colocar el humedal como barda perimetral para aprovechar sus beneficios en la captura de carbono, el amortiguamiento acústico, y aprovechamiento de agua residual. Además de proporcionar privacidad y mejorar el paisaje.

Con respecto a la altura de las plantas, ésta estará en función más de cuestiones estéticas que funcionales.

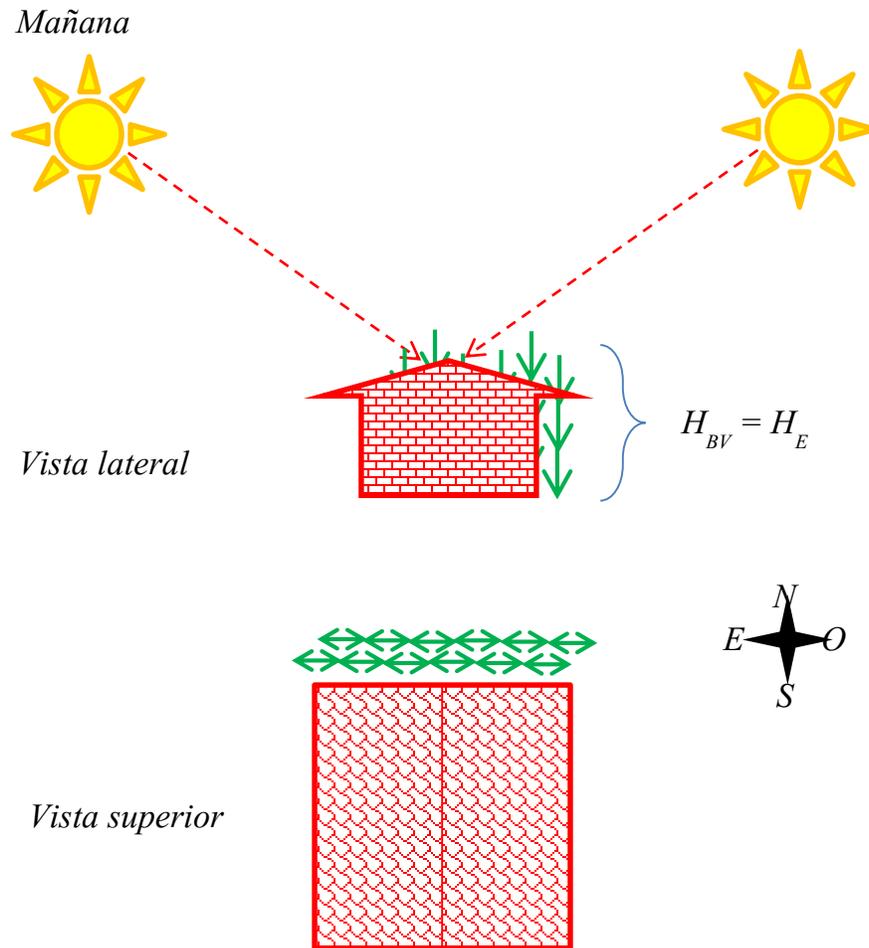
Figura 8.18: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA SEMIFRÍO SECO



Para el clima semifrío seco, la estrategia bioclimática requerida es calentamiento solar. La ubicación recomendada del humedal es el sureste, porque de esta manera se permitirá el asoleamiento la mayor parte del día sobre todo por la tarde cuando es más intenso. El calor ganado por dicho asoleamiento será suficiente para mantener el edificio caliente durante la noche. Por otra parte, solo se tendrá sombra en las primeras horas de la mañana. En cuanto a la transpiración, esta, debido a las temperaturas, no será elevada.

En todos los climas semifríos es recomendable realizar una poda completa en temporada de invierno.

Figura 8.19: Ubicación y orientación del SHBV en CLIMA SEMIFRÍO y SEMIFRÍO HÚMEDO



La ubicación del humedal en el Norte, es oportuna para los tres tipos de clima semifrío, porque como ya se mencionó en el esquema 7, en este tipo de clima lo que se requiere es la ganancia de calor mediante el calentamiento solar, por lo tanto es necesario permitir el asoleamiento el mayor tiempo posible. Respecto a la transpiración, no representa un problema, ya que debido a las temperaturas relativamente bajas, este fenómeno es de magnitud moderada.

En este caso no es necesario realizar la poda total del humedal en invierno, ya que no interfiere con el camino del sol en ningún momento del año.

8.5 Dimensionamiento

Como se mencionó anteriormente, para determinar las dimensiones del humedal es necesario conocer como mínimo el volumen generado, y el tiempo de residencia. Dado que la composición del agua residual doméstica tiene características relativamente similares, existen recomendaciones generales que pueden ser aprovechadas para la construcción de un humedal doméstico, por ejemplo, en la tabla 8.10 se muestran las dimensiones recomendadas por Yocum (2005) para humedales de distintas capacidades, tomando en cuenta una generación y composición promedio, para la región de Santa Bárbara en California.

Tabla 8.10: Dimensiones de un sistema de humedal tipo

Tipo de sistema	Profundidad (m)	Ancho (m)	Largo (m)	Área total (m ²)
Individual (una casa)	0.5	0.4	2.0	0.8
Múltiple (5 familias)	0.5	0.9	4.5	4.0
Comunidad (20 familias)	0.7	1.7	6.7	11.4
Comunidad (200 familias)	0.7	5.3	21.3	113.0

Fuente: elaborada con información de Yocum (2005).

Nota: Las dimensiones recomendadas corresponden a una contribución de 240 l/semana/familia, con tiempo de residencia de 5 días en promedio, y con temperatura ambiental promedio inferior a 3°C.

Para determinar las dimensiones del SHBV se utilizarán las variables de diseño descritas con anterioridad. Las dimensiones del SHBV que deben tomarse en cuenta son la longitud, el ancho y la profundidad. Sin embargo, la profundidad tiene un valor constante necesario para el desarrollo de las raíces de las plantas de *Arundo donax*. El ancho de la barrera verde depende del espacio disponible y la longitud está en función del ancho. La ecuación 8.1 permite calcular la longitud de la barrera verde partiendo del conocimiento del volumen de agua residual generado en 5 días (*tr*), la profundidad de 0.6 m y el ancho de la barrera verde. El volumen se multiplica por dos debido a que se tiene que tomar en cuenta el espacio ocupado por el sustrato como ya se explicó anteriormente.

$L_{bv} = 2 X V / [A X P] \dots$ ecuación 8.1	L_{bv} : Longitud del SHBV (m) V : volumen de agua residual generado en el tiempo de residencia (m ³) Tr : tiempo de residencia = 5 días A : ancho del SHBV (M) P : profundidad del sistema de humedal-barrera verde = 0.6 m
---	--

En la tabla 8.11 se muestran longitudes calculadas para cuatro valores de ancho de la barrera verde recomendados, y para 9 valores de volumen de agua residual típicos en casa habitación de zonas urbanas y zonas de transición urbana-rural.

Tabla 8.11: Longitud de la BV para diferentes valores de volumen de agua residual y ancho de la BV

Ancho de la BV (m)	Volumen de agua residual por tiempo de residencia (m ³ /tr)									Longitud de la BV (m)
	1	1.5	2	2.5	3	4	5	7.5	10	
0.3	11.1	16.7	22.2	27.8	33.3	44.4	55.6	83.3	111.1	
0.4	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0	33.3	41.7	62.5	83.3	
0.5	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	26.7	33.3	50.0	66.7	
0.6	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	22.2	27.8	41.7	55.6	

Por otra parte, si se desconoce el volumen de agua residual generado, se puede emplear el método de la dotación descrito con anterioridad. Utilizando un valor de dotación diaria de 100 l/persona, se construyó la tabla 8.10 con la finalidad de que sirva de guía para el dimensionamiento del SHBV conociendo únicamente el número de habitantes. Cabe aclarar que siempre será mejor tener datos lo más cercanos a la realidad, para evitar un sobredimensionamiento que a su vez dé como consecuencia mayor costo de construcción, o por el contrario tener un sistema que no cuente con la capacidad necesaria para tener un aprovechamiento eficiente del agua residual. Para calcular los valores de la tabla 8.12 se utilizó la ecuación 8.2.

$L_{bv} = 2 X N X D X Tr / [A X P] \dots \text{ecuación 8.2}$	<i>L_{bv}</i> : Longitud del SHBV (m) <i>N</i> : número de habitantes <i>D</i> : dotación de agua por habitante = 0.1 (m3) <i>Tr</i> : tiempo de residencia = 5 días <i>A</i> : ancho del SHBV (M) <i>P</i> : profundidad del SHBV = 0.6 m
---	---

Tabla 8.12: Longitud del sistema de SHBV para diferentes valores de ancho y No. de habitantes

Ancho de la BV (m)	No. habitantes										Longitud de la BV (m)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.3	5.6	11.1	16.7	22.2	27.8	33.3	38.9	44.4	50.0	55.6	
0.4	4.2	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0	29.2	33.3	37.5	41.7	
0.5	3.3	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	23.3	26.7	30.0	33.3	
0.6	2.8	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2	25.0	27.8	

8.6 Infraestructura previa

Para obtener el mejor funcionamiento del SHBV, es necesario contar con requerimientos mínimos de infraestructura previos a la instalación del sistema. Si se trata de edificios que aún no han sido construidos, se debe tomar en cuenta estos requerimientos en el diseño del mismo. En caso de que el edificio ya se encuentre construido, será necesario realizar las modificaciones indicadas.

El tiempo de residencia de 5 días es suficiente para dar tratamiento a aguas residuales jabonosas, sin embargo si se trata agua residual que incluya los desechos del WC, el tiempo requerido será mayor, que a su vez se traduce en mayores dimensiones del sistema. Por lo tanto se recomienda contar con sistema de drenaje separado. Es decir, contar con una tubería independiente que conduzca el agua residual originada en la ducha, en limpieza de la cocina y de la ropa, la cual sea susceptible se conectarse al SHBV. Por otra parte, el agua residual proveniente del WC debe ser conducida por una tubería diferente que pueda conectarse a una fosa séptica o en su defecto al sistema de drenaje y alcantarillado.

En cuanto al drenaje pluvial, en principio no representa un problema para el sistema, aunque se recomienda en lo posible evitar que descargue en humedal, ya que este, se saturaría en menor tiempo, lo que causaría la reducción en el tiempo de residencia, sin embargo, también da como consecuencia la dilución del agua residual, es decir una disminución de la concentración de los contaminantes.

8.7 Tipos de sistemas de humedal – barrera verde

Como se describió en el primer capítulo, la situación en nuestro país respecto a los servicios de drenaje y alcantarillado es muy variada, ya que existen regiones como la Ciudad de México completamente urbanizadas, donde el espacio disponible para la instalación de áreas verdes es muy reducido, sin embargo, de acuerdo con los datos oficiales, cuentan con red de drenaje y alcantarillado en una cobertura del 100%. Por otra parte, se encuentran regiones en los estados de Veracruz, Campeche y Estado de México donde no existe urbanización, no existe red de drenaje y alcantarillado y sí hay espacio disponible.

Estos dos casos constituyen los extremos de una gran variedad de realidades presentes en nuestro país, motivo por el cual no es posible proponer una alternativa única para dar solución a los impactos ambientales de la generación de agua residual, el amortiguamiento térmico, el amortiguamiento acústico y la captura de carbono en los edificios.

Por otra parte, de acuerdo con Peña et. al. (2003), dadas las bondades de los humedales artificiales, se debería considerar su aplicación en pequeñas comunidades nucleadas urbanas o rurales donde la sostenibilidad de la infraestructura sanitaria depende principalmente de los requerimientos de inversión inicial, eficiencia del sistema, mano de obra no calificada y labores de operación y mantenimiento. Un factor importante al momento de desarrollar estos sistemas es la posibilidad de sembrar especies vegetales nativas de la zona del proyecto, capaces de crecer y desarrollarse en medio saturado y preferiblemente que tengan algún valor económico por su potencialidad de reuso en otras actividades productivas.

Por tal motivo se plantearon tres escenarios posibles, tratando de incluir la mayor cantidad de casos posibles. En la tabla 8.13 se muestran dichos escenarios y las características del tipo de SHBV aplicable en cada caso.

Tabla 8.13: tipos de Sistemas de humedal – barrera verde

Nivel de SHBV	Características del sitio de ubicación	Características del SHBV
I: Básico	Zonas rurales, sin restricciones de área, muy baja densidad de construcciones	Materiales obtenidos del mismo sitio o sitios muy cercanos, control mínimo, mantenimiento mínimo (poda), inversión mínima (mano de obra)
II: Intermedio	Zonas de transición rural-urbano, zonas residenciales de casas solas, restricciones de área mínimas.	Inversión para construcción de infraestructura mínima de drenaje, impermeabilización mínima. Control y mantenimiento de la vegetación.
III: Avanzado	Zonas urbanas, edificios habitacionales y de servicios, fuentes fijas de ruido, restricciones de área,	Inversión para construcción de infraestructura de drenaje, impermeabilización, recuperación de agua tratada. Control del influente y del efluente, mantenimiento de las instalaciones, y de la vegetación.

Cabe mencionar que las opciones presentadas no son restrictivas, al contrario, pueden modificarse según las circunstancias e incluso pueden combinarse con alguna otras ecotecnias (por ejemplo trampas de grasas o filtros desarenadores) en caso de ser necesario. De esta forma, se hace evidente que una de las principales ventajas del SHBV es su flexibilidad y adaptabilidad a las muy variadas condiciones ambientales existentes a lo largo del país. En los siguientes apartados se describen detalladamente cada uno de los tipos de SHBV.

8.7.1 Sistema de humedal – barrera verde nivel I (SHBV – I)

El SHBV nivel I está pensado para ser utilizado en zonas rurales, donde las viviendas se encuentran dispersas en áreas relativamente grandes. En la mayoría de estos casos no se cuenta con red de drenaje y alcantarillado, y en muchas ocasiones se hace uso de fosas sépticas y/o la descarga de aguas residuales se realiza directamente en el suelo, o en cuerpos de agua. Aunado a esto, si se trata de población con escasos recursos económicos, las viviendas no cuentan con instalaciones sanitarias básicas como tarjas, lavabos o duchas lo cual lejos de constituir un impedimento, es una oportunidad para la instalación del SHBV, porque permitirá resolver el problema desde la conducción misma del agua residual, es como si se tratara de un edificio nuevo.

En la tabla 8.14 se describen los componentes del SHBV – I y algunas recomendaciones que faciliten su instalación. Asimismo, en la figura 4.12 se esquematiza el SHBV – I, se muestran los componentes, así como los flujos del agua.

Tabla 8.14: Descripción del SHBV – I

Componente	Descripción	Función	Recomendaciones
Línea de alimentación	Tubería de PVC	Alimentación del humedal	Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de éstas, obstruye la tubería.
Canal del humedal	Excavación desnuda, (prueba de infiltración), no requiere línea de salida.	Dar tratamiento al agua residual.	Infiltración ≤ 5 mm / h
	Instalación de Geomembrana plástica solo en el caso de que se necesite limitar el crecimiento de las plantas.	Riego para las plantas de <i>Arundo donax</i> .	Infiltración ≥ 6 mm / h
Línea de salida	Tubería de PVC	Salida del humedal	Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de éstas, obstruye la tubería.

El SHBV – I funciona por gravedad, ocasionando un requerimiento de una pendiente de 2% del canal, de acuerdo con Bernal et. al (2003), este tipo de sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales, pueden funcionar con pendientes > 5%. En este caso se recomienda el 2% para garantizar el tiempo de residencia de 5 días.

Por otra parte, si se coloca la geomembrana plástica para limitar el crecimiento de las raíces, se debe instalar una línea de salida, la cual debe tener un nivel ligeramente por debajo de la línea de entrada de tal manera que el agua salga del canal justo cuando alcance dicho nivel (ver figura 8.20) La prueba de infiltración es necesaria para garantizar el flujo del agua y evitar el encharcamiento a la salida del humedal.

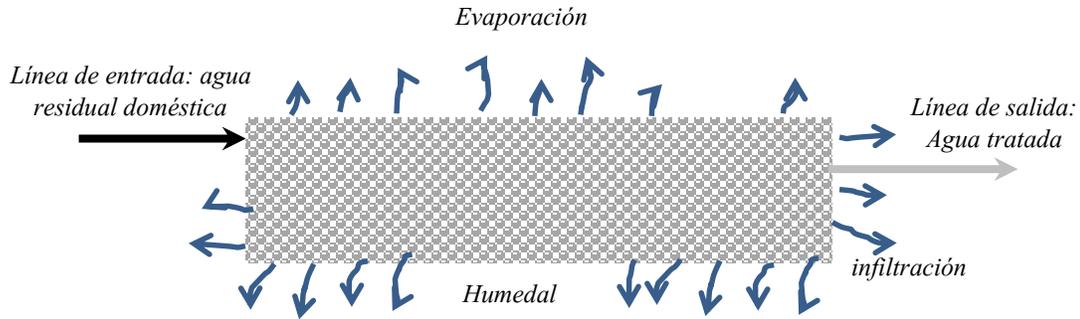


Figura 8.20: esquema del SHBV – I

Como se menciona en la tabla 8.14 se requiere determinar la capacidad de infiltración del suelo donde se colocará el SHBV. Bernal et. al (2003) recomienda para sistemas de humedal con flujo subsuperficial, una infiltración máxima 5 mm / h , este caso aplica cuando se trate de una excavación desnuda, ya que de esta manera se garantiza el tiempo de residencia de 5 días.

Por el contrario, si se instala la geomembrana plástica, se utiliza el criterio establecido por López (1994) que indica un valor mínimo de infiltración de 6 mm / h, para evitar encharcamiento a la salida del sistema, en caso de que no se cuente con esta infiltración, se requerirá la instalación de obras complementarias como zanjas filtrantes. A continuación se describe el procedimiento para realizar la prueba de infiltración.

Procedimiento de prueba de infiltración (López 1994):

- Excavar un hoyo de 0.3 x 0.3 x 0.6 m con paredes verticales (ver figura 8.21).
- Raspar las paredes y el fondo del agujero para eliminar las superficies sucias o grasosas que dificulten o impidan la filtración
- Colocar en el fondo del agujero 5 cm de arena gruesa o gravilla que servirá de medio filtrante para el agua.
- Verter agua hasta una altura aproximada de 0.3 m. En la mayoría de los casos es necesario seguir agregando agua durante un periodo de dos horas hasta que el suelo se haya saturado y el agua no se filtre de manera inmediata.
- Medir el tirante inicial.
- Dejar el agua durante un periodo de 24 horas y medir el tirante final

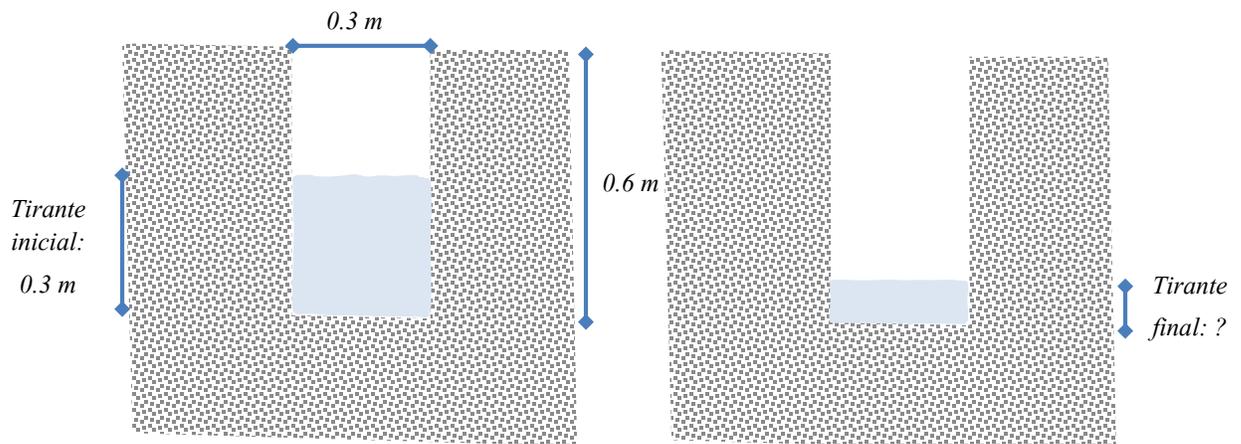


Figura 8.21: Esquema de la prueba de infiltración

8.7.2 Sistema de humedal – barrera verde nivel II: SHBV – II

El SHBV – II se diseñó para un escenario ubicado en el medio denominado **rurbano**, el cual se refiere a la zona de transición entre el medio rural y medio urbano debido al crecimiento desordenado de las periferias de las ciudades. También se encuentran en este caso las poblaciones rurales que poco a poco han ido migrando a convertirse en pequeñas “ciudades”. En nuestro país existe una gran cantidad de comunidades con estas características. En este tipo de medio, la densidad de población y por lo tanto la densidad de edificaciones es mayor que en el medio rural, por lo que la disponibilidad de área se reduce y en algunos casos, se puede presentar hacinamiento. Sin embargo, todavía se encuentran casas “unifamiliares”, y la mayoría de estas cuentan con cierta independencia de las viviendas vecinas.

En la tabla 8.15 se describen los componentes del SHBV – II diseñado para ser implementado en sitios con dichas características. También se hacen ciertas recomendaciones que faciliten su instalación y operación. En este caso no se requiere prueba de infiltración debido a que la línea de salida se conecta con el sistema de drenaje y alcantarillado. Sin embargo, debido a la presencia de tubería resulta indispensable evitar que el crecimiento de las raíces adentro de las mismas provoque taponamientos, por lo que es muy importante que la profundidad de las raíces no sea la misma que la profundidad de las tuberías.

Tabla 8.15: Componentes del SHBV – II

Componente	Descripción	Función	Recomendaciones
Línea de alimentación	Tubería de PVC	Alimentación del humedal.	Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de éstas, obstruye la tubería.
Canal del humedal	Excavación impermeabilizada	Dar tratamiento al agua residual. Riego para las plantas de <i>Arundo donax</i> .	Las dimensiones deben ser calculadas como se indica en el inciso 4.5
Impermeabilizante	Instalación de Geomembrana plástica o construcción del canal con concreto y acabado impermeable	Impedir la infiltración limitar el crecimiento de las plantas.	La selección del material impermeabilizante dependerá de la disponibilidad de recursos materiales y económicos.
Línea de salida	Tubería de PVC	Enviar el agua tratada al sistema de drenaje y alcantarillado	Debe tomarse en cuenta la evapotranspiración del lugar para determinar el volumen de salida y el diámetro de la tubería

La cantidad de agua tratada que se obtenga estará en función del clima. Si el sistema se instala en un clima cálido seco, una gran parte del volumen de agua será evapotranspirado, por lo que en la línea de salida se obtendrá un volumen mínimo de agua tratada, en estos casos se puede prescindir de la línea de salida. Para los demás tipos de clima, si se requiere la línea de salida. En la figura 8.22 se muestra el esquema del SHBV – II.

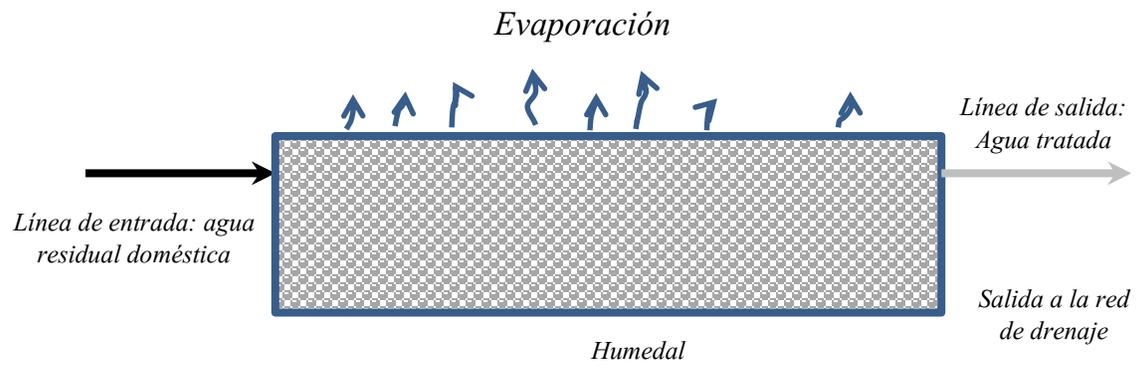


Figura 8.22: Esquema del SHBV - II

8.7.3 Sistema de humedal – barrera verde nivel III: SHBV – III

En principio, el SHBV se diseñó para su aplicación en el medio rural donde no existe infraestructura de recolección, tratamiento y aprovechamiento de agua residual, sin embargo, conforme se desarrolló el proyecto se identificó la posibilidad de utilizarlo en cualquier entorno. El SHBV – III está pensado para implementarlo en el medio completamente urbanizado, donde la densidad de edificios es muy alta. Las principales características de estos sitios relacionadas con este tema son:

- a) Elevado costo del terreno, lo que ocasiona baja o nula disponibilidad de área para instalaciones de este tipo.
- b) Suelo construido o pavimentado, que elimina toda posibilidad de espacios de infiltración o áreas verdes.
- c) Edificios de viviendas multifamiliares
- d) Viviendas unifamiliares de dimensiones muy pequeñas.

Derivado de lo anterior, surge la necesidad de proponer un sistema más tecnificado que se adapte a la infraestructura tanto urbana como de cada edificio. La adición de estos elementos por supuesto que repercute en el costo del sistema, sin embargo, aun así se trata de un sistema con costos relativamente bajos, además de que el SHBV – III puede contribuir al ahorro de energía empleada en la climatización del edificio. En la tabla 8.16 se incluyen los componentes del SHBV – III, con su descripción, función, y recomendaciones.

Tabla 8.16: Componentes del SHBV – III

Componente	Descripción	Función	Recomendaciones
Tanque ecualizador	Tanque de polietileno de alta densidad.	Almacenamiento del agua residual gris.	Su instalación en un nivel más elevado que el canal del humedal permite su funcionamiento por gravedad.
Línea de alimentación	Tubería de PVC sanitario	Alimentación del tanque ecualizador.	
Válvula de alimentación	Válvula de PVC	Controlar la alimentación del humedal.	
Canal del humedal con impermeabilizante	Excavación y construcción del canal con concreto o forrado con Geomembrana plástica. También pueden usarse Contenedores prefabricados, enterrados o colocados en la superficie.	Dar tratamiento al agua residual. Riego para las plantas de <u>Arundo donax</u> . Limitar el desarrollo de las plantas.	
Válvula de salida	Válvula de PVC	Controlar el tiempo de residencia del humedal.	
Bomba	Se puede colocar bomba en: - La entrada del humedal - La salida del tanque de almacenamiento de agua tratada	Enviar el agua al siguiente paso del sistema.	Se recomienda evitar el uso de bombas y en la medida de lo posible operar el sistema por gravedad.
Tanque de almacenamiento	Tanque de polietileno de alta densidad.	Almacenamiento de agua tratada.	

El SHBV – III al inicio cuenta con un tanque ecualizador que permite amortiguar los picos de generación de agua residual que ocurren en los horarios de mayor uso del agua, los cuales generalmente son por la mañana y por la noche, antes de que las personas salgan de casa y a su regreso, asimismo, los fines de semana cuando se realizan actividades de limpieza y lavado de ropa. Las válvulas permitirán controlar la entrada del agua residual al canal del humedal y la salida del agua tratada al finalizar el tiempo de residencia. En la salida se pueden instalar dos opciones, la primera que permitirá almacenar el agua tratada para su uso posterior, y la segunda que descargue directamente al sistema de drenaje y alcantarillado. Pueden instalarse ambas o solamente una, la que cumpla mejor con las necesidades de cada caso.

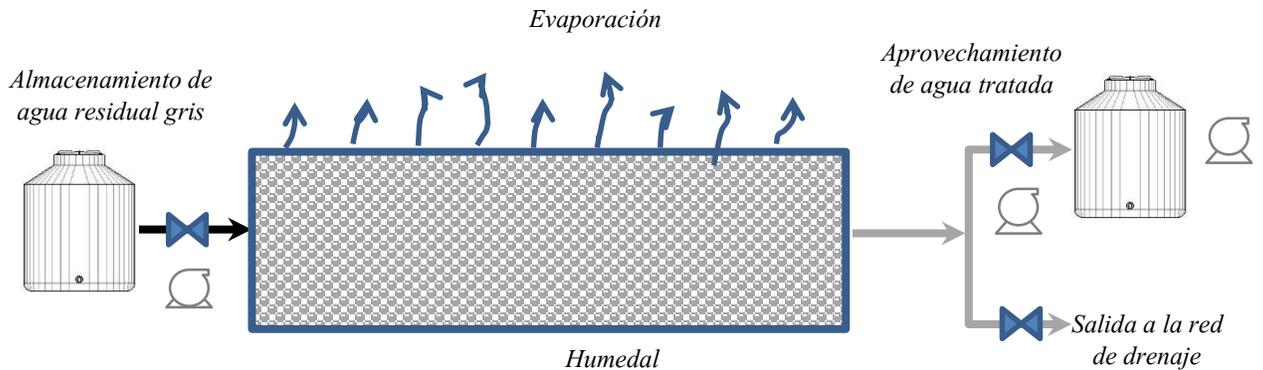


Figura 8.23: esquema del SHBV – III

El diseño original del SHBV está pensado para que opere por gravedad, sin embargo, cuando existen limitaciones de espacio, frecuentemente esto no es posible. Por tal motivo en esta versión, se incluyen bombas que pueden sustituir a las válvulas (ver figura 8.23), cuando la instalación se encuentre en diferentes niveles, sobre todo cuando exista la necesidad de colocar los tanques de almacenamiento enterrados y se requiera bombear el agua para que alcance el nivel del humedal o bombear el agua tratada a un tanque de almacenamiento elevado.

Por supuesto que la inclusión de este tipo de equipos tiene un costo, que se refleja tanto en la inversión inicial como en la operación del SHBV, al mismo tiempo que repercute en la sustentabilidad del sistema. Sin embargo, se incluyeron con la finalidad de ampliar las posibilidades de uso del SHBV.

8.8 Mantenimiento

El SHBV fue diseñado con un número mínimo de componentes, (dependiendo del tipo de SHBV I, II, o III), para disminuir el mantenimiento requerido.

Poda de la barrera verde de *Arundo donax*

La poda de la barrera verde representa la principal operación de mantenimiento que requiere el SHBV. Como se describió previamente, el *Arundo donax* tiene una de las productividades de biomasa más elevadas del mundo, lo cual puede ocasionar un crecimiento excesivo que se salga de control. Por tal motivo, se recomienda realizar podas regulares para mantener la forma de la barrera verde y la altura recomendada. La poda se puede realizar con herramientas comunes, y no se requieren técnicas específicas de poda. Si el corte se realiza al ras del suelo eliminando por completo los tallos, estos brotarán nuevamente en un periodo corto de tiempo, dependiendo del clima. Si el corte se realiza a una altura desde la base, los tallos se secarán, pero pueden brotarles nuevos retoños, los cuales serán más delgados y múltiples, lo que a su vez provocará mayor volumen en la parte superior de la barrera verde. Por tal motivo se recomienda un corte al ras que permita la renovación de los tallos completos (ver figura 8.24).

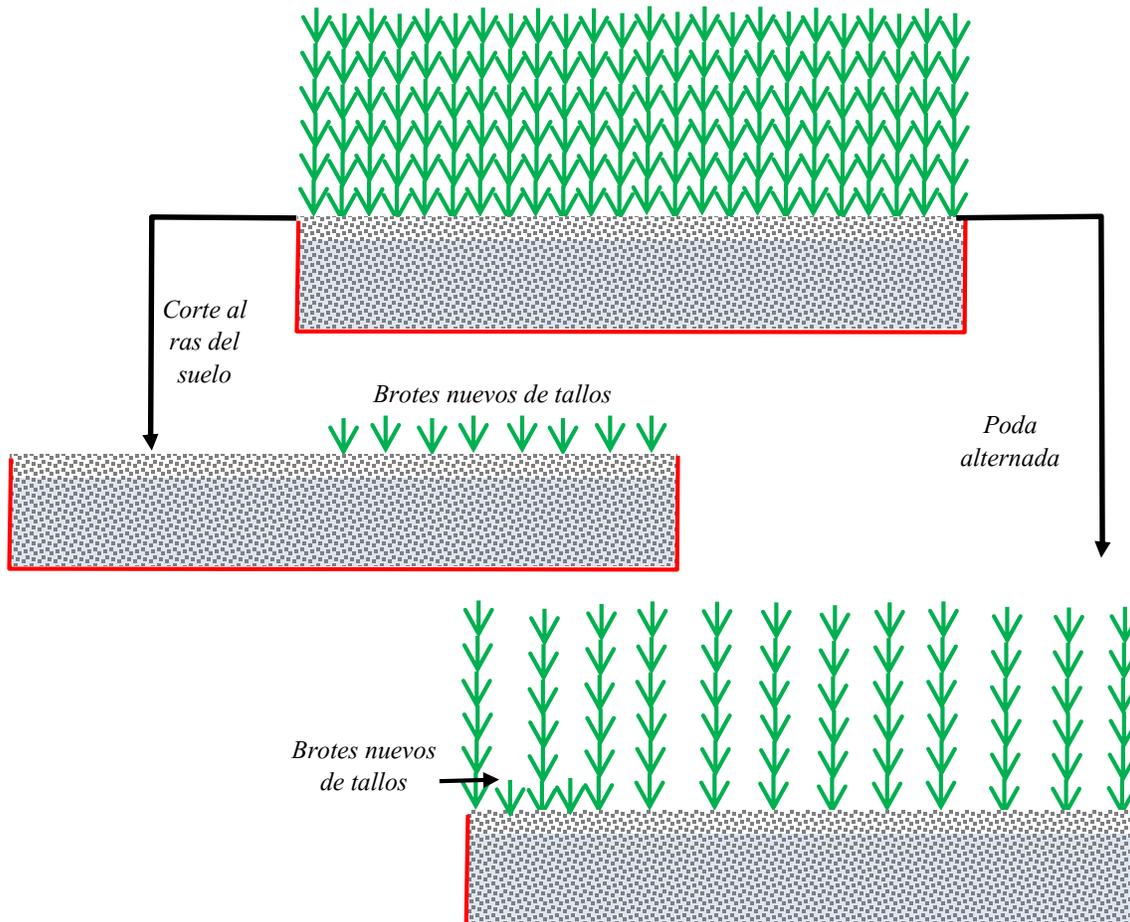


Figura 8.24: Esquema de los resultados obtenidos con los dos tipos de poda recomendados

Este tipo de poda garantiza mantener el color verde de la barrera, ya que los tallos de dos o más años de edad adquieren una coloración amarillenta debida a que las hojas secas que van recubriendo el tallo, manteniendo verde solo la parte superior del mismo.

Para climas templados y fríos se recomienda realizar una poda total al inicio de la temporada invernal. Para el caso de climas cálidos se recomienda una poda alternada de tal manera que en ningún momento quede desprovisto de vegetación.

8.9 Modelo de escalamiento de costos

Como es de esperarse, el costo de instalación del SHBV es una variable que depende, además de los precios del mercado, de las dimensiones y del tipo de sistema que se instale. El SHBV-I al ser el más sencillo, con menos componentes, será también el más económico, y por el contrario el SHBV-III será el más costoso por tener la mayor cantidad de componentes. En la tabla 8.17 se presenta un resumen que permite identificar fácil y rápidamente los componentes de cada tipo de SHBV, lo anterior con la finalidad de utilizar esta información para el llenado de la hoja de cálculo que se elaboró específicamente para la determinación del costo aproximado del SHBV.

Tabla 8.17: Componentes de acuerdo al tipo de SHBV

Categoría		Descripción	SHBV-I	SHBV-II	SHBV-III
Materiales	Sustrato	Arena	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)
		Grava			
		Tezontle			
		Tepojal			
	Tubería pvc	2"	✓ (se selecciona un diámetro)	✓ (se selecciona un diámetro)	✓ (se selecciona un diámetro)
		4"			
	Accesorios	"T", Codos, etc.			
		Válvula		✓	✓
		Bomba			✓
	Impermeabilizante	Geomembrana	✓	✓	✓
		Canales construidos		✓	✓
		Contenedores plásticos			✓
		Contenedores concreto			✓
	Almacenamiento de agua	Tanque de almacenamiento de agua residual			✓
		Tanque de almacenamiento de agua tratada			✓
	Mano de obra	Excavación		✓	✓
Construcción de canales			✓	✓	
Instalación de tanque de almacenamiento de agua residual				✓	
Instalación de tanque de almacenamiento de agua tratada				✓	
Instalación de tubería de conexión del sistema (entrada)		✓	✓	✓	
Instalación de tubería de conexión del sistema (salida)			✓	✓	
Extracción de rizomas		✓	✓	✓	
Plantación de rizomas		✓	✓	✓	
Instalación de bomba				✓	

Esta hoja de cálculo permite conocer el costo aproximado del sistema si se cuenta con los datos de las variables de diseño y los costos unitarios. Se elaboraron dos versiones, una para ser utilizada con la dotación y otra para utilizar el volumen de agua residual generado.

Los datos que se deben alimentar en la hoja de cálculo son:

- Número de habitantes, ancho, precios unitarios.
- Volumen de agua residual generado, ancho, precios unitarios.

Para la construcción de dicha hoja de cálculo se emplean las ecuaciones 4.1 y 4.2 además de los siguientes factores empíricos:

- Factor de almacenamiento de agua residual = 0.5
- Factor de almacenamiento de agua tratada = 0.25
- Factor de extracción de rizomas de *Arundo donax* = 0.1
- Factor de plantación de rizomas de *Arundo donax* = 0.1

En la tabla 8.18 se muestra un ejemplo del costo del SHBV – I empleando como variables de diseño, 4 habitantes, con una dotación: 100 l/hab.día y el ancho del canal de 0.5 m. Con estos datos y los precios unitarios, la hoja de cálculo, puede determinar los costos aproximados del sistema

Tabla 8.18: Ejemplo de cálculo del costo del SHBV-I

Categoría		Descripción	P.U.	Cantidad	Unidades	Total (\$)
Materiales	Sustrato	Tepojal	100	4.0	m ³	400.0
	Tubería pvc	2"			pza	0.0
		4"			pza	0.0
	Accesorios	"T", Codos, etc.			pza	0.0
		Válvula			pza	0.0
		bomba			pza	0.0
	Impermeabilizante	Geomembrana		22.7	m ²	0.0
		Canales construidos		13.3	M	0.0
		Contenedores plásticos			pza	0.0
		Contenedores concreto			pza	0.0
	Almacenamiento de agua	Tanque de almacenamiento de agua residual		1.0	m ³	0.0
		Tanque de almacenamiento de agua tratada		0.5	m ³	0.0
Mano de obra	Excavación		100	13.3	M	1333.3
	Extracción de rizomas		100	1.3	jornal	133.3
	Plantación de rizomas		100	1.3	jornal	133.3
	Instalación de bomba				pza	0.0
					TOTAL	2000.0

Los costos de la mano de obra pueden ser eliminados en caso de que se trate de sistemas de autoconstrucción, lo cual ocurre muy frecuentemente en zonas rurales, donde además se aplica el reuso de materiales, por lo que en algunos casos, será posible eliminar por completo el costo del SHBV-I.

Como es de esperarse, conforme se incrementa la tecnificación, se incrementan los costos. En este caso los mayores costos están asociados al almacenamiento y el bombeo de agua. En la tabla 8.19 se calculó el costo para el SHBV-III con capacidad similar al calculado en la tabla 8.18.

Tabla 8.19: Ejemplo de costo del SHBV-III

Categoría		Descripción	P.U.	Cantidad	Unidades	Total (\$)
Materiales	Sustrato	Arena			m ³	0.0
		Grava			m ³	0.0
		Tezontle	100	4.0	m ³	400.0
		Tepojal			m ³	0.0
	Tubería pvc	2"	15	4.0	m	60.0
		4"			m	0.0
	Accesorios	"T" pvc, Codo 90° pvc, Codo 45° pvc			pza	0.0
		Válvula			pza	0.0
		Reducción			pza	0.0
		Bomba	2635	2.0	pza	5270.0
	Impermeabilizante	Geomembrana	55	22.7	m ²	1246.7
		Canales construidos			m	0.0
		Contenedores plásticos			pza	0.0
		Contenedores concreto			pza	0.0
Almacenamiento de agua	Tanque de almacenamiento de agua residual	4000	1.0	m ³	4000.0	
	Tanque de almacenamiento de agua tratada	4000	0.5	m ³	2000.0	
Mano de obra	Excavación		100	13.3	m	1333.3
	Construcción de canales			13.3	m	0.0
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua residual		100	1.0	pza	100.0
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua tratada		100	1.0	pza	100.0
	Instalación de tubería de conexión del sistema (entrada)		100	1.0	pza	100.0
	Instalación de tubería de conexión del sistema (salida)		100	1.0	pza	100.0
	Extracción de rizomas		100	1.3	jornal	133.3
	Plantación de rizomas		100	1.3	jornal	133.3
	Instalación de bomba		100	2.0	pza	200.0

TOTAL 15176.7

Se observa que el SHBV-III tiene un costo 6 veces mayor que el SHBV-I. La mayor contribución a esta diferencia se da por parte del almacenamiento y bombeo del agua, como se mencionó anteriormente, motivo por el cual se recomienda evitar estas operaciones dentro del sistema, para incrementar la sustentabilidad del sistema.

9. CONCLUSIONES

9.1 Amortiguamiento térmico

El sistema de barrera verde de Arundo donax posee características térmicas susceptibles de ser aprovechadas para contribuir a la eficiencia energética de los edificios tales como la estrategia pasiva de refrigeración por sombreado, además de la estrategia dinámica de refrigeración por transpiración, propia de los organismos vegetales.

El SHBV puede tener una utilidad importante en diversas regiones de México, con climas extremos, especialmente en el norte del país, donde los climas son secos. La baja humedad en el ambiente propicia la transpiración de las plantas y con esto la refrigeración por transpiración. Debido a que la barrera verde emplea agua residual para su mantenimiento, aporta una ventaja adicional al no consumir agua potable y evitar la contaminación derivada de la descarga del agua residual sin tratamiento. Asimismo conlleva el ahorro de energía por concepto de climatización y se captura carbono en la biomasa de la barrera verde. Por otra parte, una limitación que presenta este sistema es la altura del edificio que puede proteger, ya que el Arundo donax, en condiciones climáticas favorables puede alcanzar 9 – 10 m de altura, sin embargo, se le encuentra mayormente con altura de 5 – 6 m. Además se debe tener en cuenta la necesidad de poda regular debido a su alta productividad de biomasa.

El amortiguamiento térmico, resultado de la experimentación, muestra que se logró un ahorro total del 31% del consumo energético para alcanzar la temperatura de confort.

9.2 Amortiguamiento acústico

Como resultado de este trabajo de investigación se determinó una ecuación experimental que permite calcular la reducción de ruido en función de la masa de la barrera verde, la cual a su vez puede ser determinada conociendo la densidad y el espesor de la misma, y aunque dicha ecuación solo es aplicable bajo condiciones de densidad y espesor específicas, puede resultar de gran utilidad, ya que de acuerdo con Arenas (1996), las predicciones de las atenuaciones introducidas por las barreras requerirán de fórmulas para el diseño que sean fáciles de manejar y que permitan hacer cálculos rápidos. Es fácil darse cuenta que la sencillez en el cálculo de dichas medidas de mitigación incrementará el uso de las mismas.

Otra ventaja que autores como Olalla (1994) resaltan de las pantallas antirruído, son la protección física y privacidad que proveen. Adicionalmente, se puede decir que las barreras verdes de Arundo donax mejoran el paisaje y tienen el potencial de captura de carbono.

A raíz del presente estudio, se puede concluir que la barrera verde de Arundo donax es una alternativa para la reducción de ruido que puede implementarse en los establecimientos reconocidos como generadores de ruido en las ciudades a fin de contribuir al cumplimiento de los límites máximos permisibles establecidos en la normatividad aplicable en la materia. Del estudio se observa que, en un espacio relativamente reducido (0.3 a 0.8 m de espesor), es posible obtener una reducción promedio de la transmisión directa de entre 14 – 20 dBA cuando se trata de una fuente puntual de ruido.

9.3 Reducción del volumen de Agua residual descargado

La reducción del volumen de agua residual descargado está directamente relacionado con la transpiración de los individuos de Arundo donax. La transpiración, a su vez depende de factores relacionados con la planta y factores ambientales. En el caso de los primeros, estos se pueden agrupar en el área foliar, y posteriormente traducirla en volumen del humedal.

En cuanto a los factores ambientales, se analizaron las condiciones climáticas extremas (temperatura y humedad) presentes en el clima cálido seco debido a que es precisamente en estas donde se presentan valores máximos de transpiración. En los otros tipos de clima, sobre todo en los del tipo húmedo, la transpiración será menor, por lo que el beneficio obtenido del SHBV en materia de reducción del volumen de agua residual descargado también se verá disminuido.

La reducción del volumen de agua residual descargado anualmente va del 5 al 14 %, sin embargo, representa solo una parte del total transpirado, ya que corresponden a la transpiración en las condiciones climáticas extremas. Es un hecho que la reducción de dicho volumen siempre será mayor, ya que la transpiración ocurre, aunque en niveles más bajos, en otras condiciones ambientales, sin embargo, para conocer los valores exactos es necesario realizar la determinación de transpiración en diferentes condiciones climáticas.

9.4 Captura de CO₂

De estudio realizado se desprende que, mediante un SHBV de 0.5 m de ancho y 3.3 m de largo, el cual, es capaz de dar servicio a una persona promedio con una dotación de agua potable de 100 lt/hab.día, y tomando como base la altura promedio que alcanzan los individuos de *Arundo donax* de 4m, es posible capturar 304.9 kg de CO₂ por ciclo (un ciclo se refiere al periodo que se deja crecer la biomasa antes de ser podada, este puede ser anual).

Si se realiza la comparación con la huella de carbono promedio mostrada por la calculadora de carbono (<http://calculator.carbonfootprint.com/calculator.aspx?lang=es&tab=8>), donde se reporta un promedio de 4 ton de CO₂/año para los mexicanos, entonces el SHBV puede contribuir a capturar el 7% del CO₂ generado por un mexicano promedio. Este resultado es muy alentador si se toma en cuenta que el área requerida para la instalación del mismo es tan solo de 1.8 m², de tal manera que en 25 m² se podría capturar el total del CO₂ generado por un mexicano promedio. Cabe aclarar que esto es cierto, siempre y cuando se realice una poda total cada año, la cual permita la regeneración total de la biomasa vegetal, lo cual conlleva la necesidad de disponer adecuadamente de dicho material.

9.5 Beneficios y limitaciones del SHBV

El SHBV ofrece una alternativa para la mitigación de los impactos ambientales originados por la operación de los edificios habitacionales, específicamente los relacionados con la generación de agua residual, generación de ruido y generación de CO₂ por concepto de climatización sin embargo, como en la mayoría de los casos de aplicaciones tecnológicas, su implementación tiene algunas limitaciones. En la tabla 9.1 se muestran los beneficios obtenidos del sistema así como las limitaciones que presenta.

Tabla 9.1: Beneficios y limitaciones del SHBV

Beneficios	Limitaciones
Posee características térmicas tales como la refrigeración por sombreado, y refrigeración por transpiración susceptibles de ser aprovechadas para la bioclimatización.	Funciona muy bien en climas cálidos y secos, sin embargo, en climas fríos y húmedos su aplicación no es requerida.
Por su rápido crecimiento y anatomía regular, el <i>Arundo donax</i> representa una alternativa de sombreado para edificios. El tiempo de cobertura es relativamente corto (1 año) y el área requerida es pequeña (1.8 m ² /hab.)	La altura del edificio que se desea proteger está limitada por la altura de las plantas, que en condiciones climáticas favorables pueden alcanzar 9 – 10 m de altura, sin embargo, se le encuentra mayormente con altura de 5 – 6 m.

Continuación de la tabla 9.1

<i>Beneficios</i>	<i>Limitaciones</i>
<i>Por acción de la transpiración vegetal, en climas cálidos secos, es posible la reducción del volumen de agua residual descargada de hasta el 15%.</i>	<i>Debido a una menor transpiración vegetal, en climas húmedos la reducción de volumen de agua residual descargada es mínima. Sin embargo el humedal si reduce la carga contaminante.</i>
<i>Es posible capturar hasta el 7% de la generación promedio de CO₂ generado por un mexicano en 1.8 m².</i>	<i>Se requiere la poda anual que permita la regeneración de la biomasa vegetal. Motivo por el cual se hace necesario contar con un destino para la disposición de dicha biomasa vegetal.</i>
<i>Su costo de instalación y operación es relativamente bajo, sobre todo en ambientes rurales (aprox. \$600.00/hab.).</i>	<i>En ambientes urbanos debido a la falta de espacio y las necesidades de conducción y descarga de agua residual, los costos se incrementan (aprox. \$8240.00/hab.).</i>
<i>No se requiere de mano de obra especializada durante la construcción y operación.</i>	
<i>Hace posible contar con vegetación en espacios reducidos y sin tener que consumir agua potable para su mantenimiento debido al riego con agua residual gris.</i>	

*Por todo ello, además de ser un elemento bioclimático, el SHBV de *Arundo donax* puede representar una alternativa integral para disminuir el impacto ambiental derivado de la operación de edificios residenciales por la generación de agua residual gris y la emisión de gases de efecto invernadero.*

9.6 Obligaciones legales en materia de generación de GEI

Cuando se realizó la revisión de la normatividad aplicable se identificó la obligación que existe por parte de diferentes sectores productivos tanto de reportar la generación de GEI derivada de su actividad, como de implementar medidas de mitigación en la materia.

Por otra parte, prácticamente todos los sectores productivos, independientemente del giro, cuentan con instalaciones (edificios) que generan agua residual gris (de servicios) susceptible de ser aprovechada. Además en la mayoría existen bardas perimetrales que delimitan los predios donde se encuentran instaladas.

Por lo tanto, la implementación del SHBV puede representar una alternativa para los diferentes sectores productivos para el mejoramiento de su desempeño ambiental en los rubros de generación de agua residual y generación GEI

9.7 Investigaciones futuras

Dada la importancia de la transpiración en el comportamiento térmico de la barrera verde se identificó la necesidad de realizar investigaciones posteriores enfocadas a establecer la contribución individual de cada mecanismo de refrigeración (sombreamiento y transpiración), así como en diversas condiciones ambientales (temperatura y humedad). Lo anterior permitirá determinar con mayor precisión las regiones y los periodos estacionales donde la implementación de este modelo de barrera verde puede ser de mayor utilidad.

Asimismo, se requiere la determinación del ahorro energético derivado de la implementación del SHBV. Ya que las pruebas realizadas en el presente trabajo solo fueron exploratorias. Por otra parte, al

ampliar la información acerca de la transpiración del SHBV, se podrá contar con más elementos para determinar la potencia de refrigeración del sistema, lo cual a su vez contribuirá de manera importante a la determinación del ahorro energético.

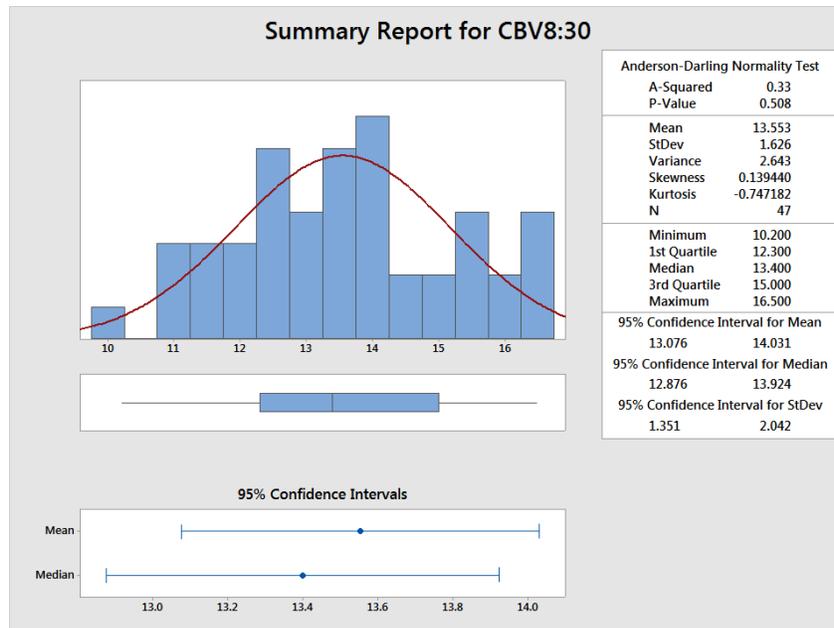
10. ANEXOS

ANEXO 1: MEDICIONES DE TEMPERATURA

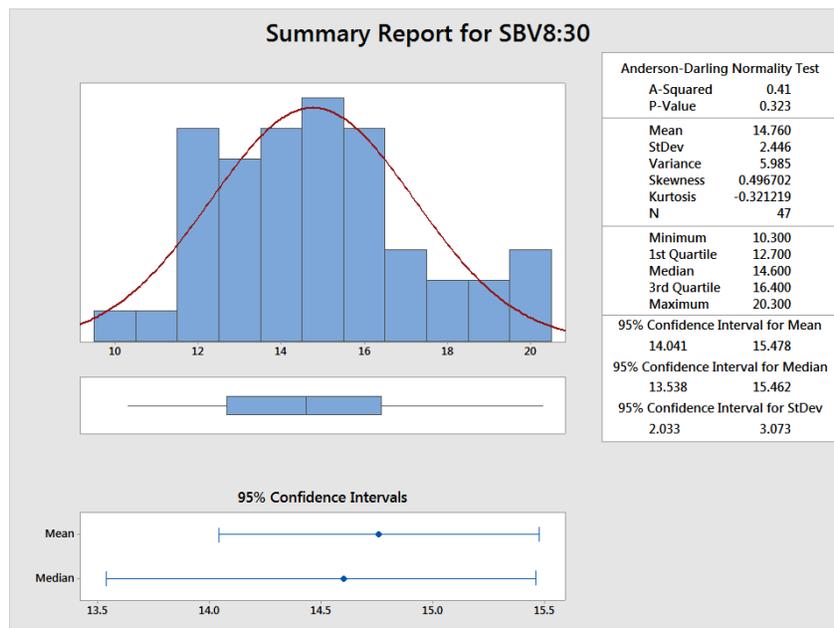
Tabla A1.1: mediciones de temperatura en el horario de las 8:30 a.m.

<i>Temperatura interior</i>				<i>Temperatura exterior</i>			
<i>cbv</i>		<i>Sbv</i>		<i>cbv</i>		<i>Sbv</i>	
12.3	13.8	13	15.3	12.2	18.2	12.2	18.9
11.8	13.3	12.2	13.5	28.5	13	28.5	17.6
13.8	15.4	15.4	17.6	14.6	21.9	16.8	21.9
13.3	13.8	14.6	15.1	26.3	22.7	28	22.8
12.3	13.1	12.7	14.3	19	14	19	14
14.1	15.3	15.8	17.1	17.4	16	17.7	22.1
12.5	11.4	14.5	11.8	23.5	24.3	24	24.3
15	13.3	16	13.5	13.8	22.1	14.5	22.1
11.1	16.5	12	20	22.6	20.2	23.2	20.6
12.7	16.3	15.6	16.5	29.6	25.8	29.9	26.1
12.1	15.3	14.6	16.4	17.3	21.8	17.8	25
14.1	13.8	16.6	14	17.1	19.4	17.1	19.4
16.4	14	19.7	15	14.5	27.7	15.5	34.1
14.5	14.6	16.4	15.5	15.2	21.1	15.3	23
13	11.5	14.1	11.6	19.7	17.1	20.7	17.1
15.8	16.5	20.3	18.1	14.2	29	14.2	29
11.1	15.8	12.2	18.5	27	20.4	27.3	20.4
13.4	11.7	15.1	11.8	18.6	20.4	18.6	20.4
12.4	13.7	13.3	10.3	14.7	16.5	15.4	17.2
12.5	12.1	12.5	12.5	13.7	21.2	14.1	21.6
15.6	13.5	19	13.6	12.8	25	12.8	28
11.2	15.1	12	16.1	13.6	21	13.6	21.7
13.2	12.8	13.8	12.9	18.1	18	18.4	18
10.2		11.3		18.2		18.5	
<i>promedio</i>	13.55	<i>promedio</i>	14.75	<i>promedio</i>	19.55	<i>promedio</i>	20.39

Figura A1.1: Pruebas de Anderson-Darling para evaluar si los datos de las 8:30 a.m. tienen una distribución normal.



a) con barrera verde

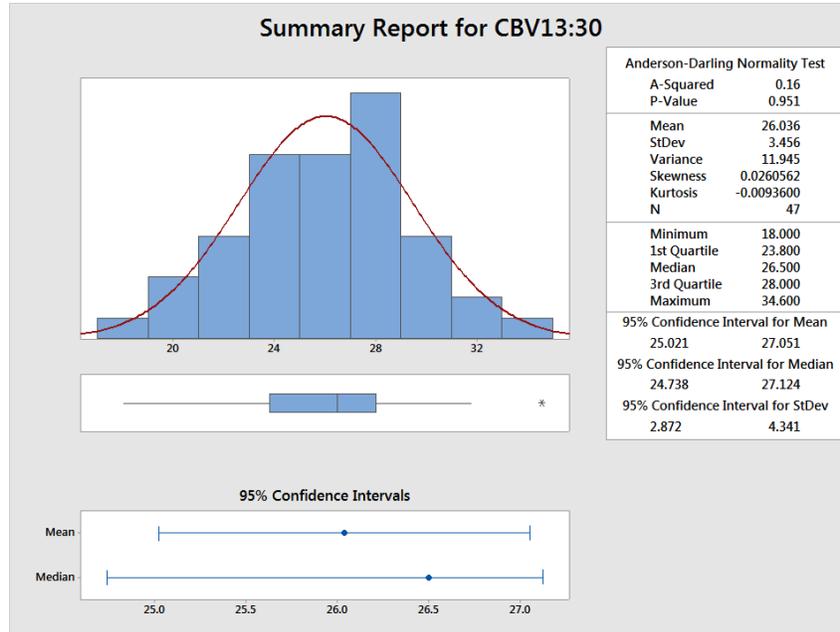


b) sin barrera verde

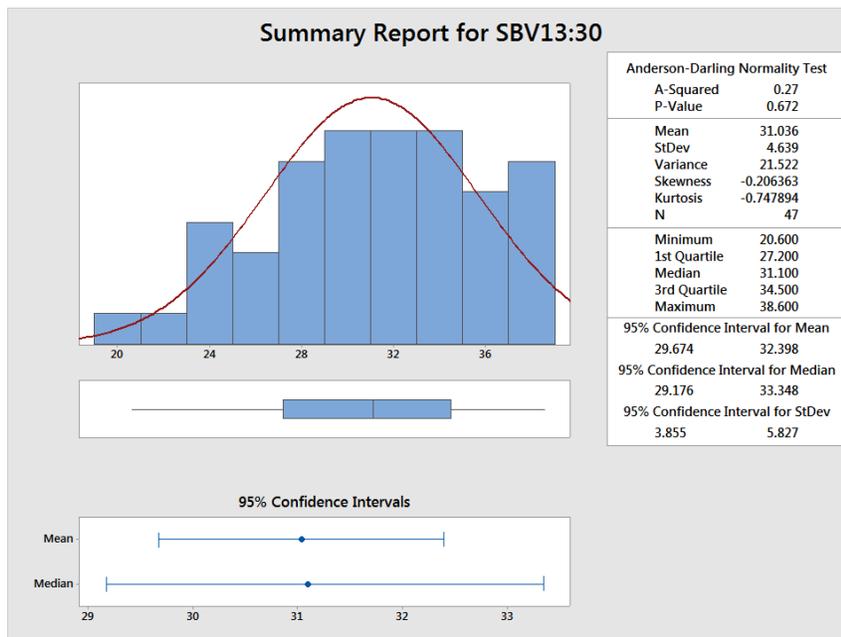
Tabla A1.2: mediciones de temperatura en el horario de las 13:30 a.m.

<i>Temperatura interior</i>				<i>Temperatura exterior</i>			
<i>Cbv</i>		<i>sbv</i>		<i>sbv</i>		<i>cbv</i>	
30.8	24.8	36.4	33.1	40.6	51.8	40	51.8
31.8	27	38	27.2	46	32.3	43.7	32
28.8	22.6	33.8	26.9	49.2	36.9	48.1	36.9
28.5	28	34.1	28.1	41.9	32.1	41.9	32.1
26	27.6	37.1	36	40.5	48.1	40.5	45.3
27.3	26.8	33.5	32.5	40	46.3	40	45.6
23.1	30.6	29.1	37.3	39.3	40.9	33.3	40.9
30	25.6	30	31.1	33.1	32.8	33.1	25.8
27	31.8	34.1	32.1	46.1	35.4	45.7	35.3
26.5	22.6	31.8	24.6	37.5	39.7	37.5	39.6
28.4	24.2	38.1	35.3	43.1	38.6	39.8	38.6
24.2	24.7	31.8	32.4	38.6	49.5	38.6	47.4
22.3	24	27.4	30.1	40.5	33.7	40.5	33.7
23.1	30.5	27	38.6	35	51.8	33.3	49.9
18	25.7	22.5	30.5	34.4	36.6	34.4	36.4
28	24	30	29.3	36.2	41.2	36.1	41.2
26.5	25.1	35	28.5	42.4	37.8	42.1	37.8
27.2	34.6	36	38.6	32.3	47.4	32.3	46.4
27.5	23.8	34.2	26.8	41.3	35.2	41	33.6
30	21.5	31	23.8	33.7	24.6	33.5	24.3
20.9	22.6	25	24.6	22.1	24.3	22	24.3
27	25.8	27.1	29	32.4	36.1	32	36.1
19.8	20.2	24.2	20.6	31.2	26.2	31.2	26.2
26.9		34.5		38.6		38.2	
<i>promedio</i>	26.93	<i>promedio</i>	31.03	<i>promedio</i>	38.29	<i>promedio</i>	37.44

Figura A1.2: Pruebas de Anderson- Darling para evaluar si los datos del horario de las 13:30 horas tienen una distribución normal.



a) con barrera verde

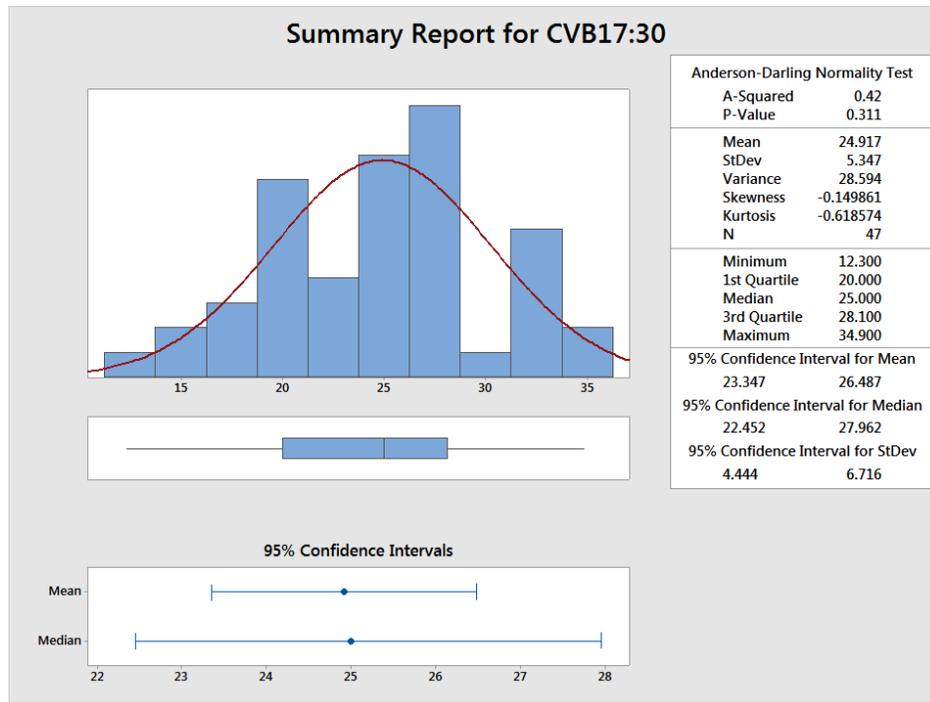


b) sin barrera verde

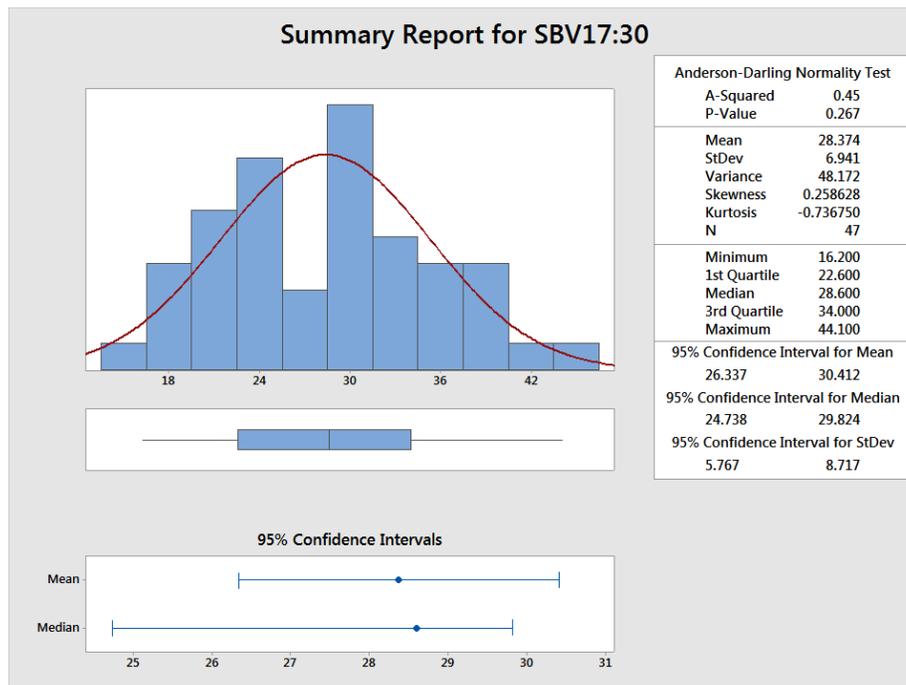
Tabla A1.3: mediciones de temperatura en el horario de las 17:00 a.m.

<i>Temperatura interior</i>				<i>Temperatura exterior</i>			
<i>cbv</i>		<i>sbv</i>		<i>sbv</i>		<i>cbv</i>	
28.6	12.3	29.9	16.2	34.3	20.7	33.7	20.1
34.9	26	44.1	29	51.4	30	49.5	30.8
33	28	40.8	29	40.1	32.4	40.1	32
32.2	25	39.8	25	41.7	29	41.7	29
28.1	19.6	30.2	24.8	39.5	23.6	39.5	23.6
27.3	22.7	29.7	23.3	38.6	32.8	38.6	28.6
20.8	27.3	21	28.8	33	29	33	29
20	24	22	24	33.7	25.6	33.6	26.8
28.1	28	28.5	28	34.1	29	28.8	29
32.2	28	37.9	33.2	42.3	39.7	42.3	39.7
27.9	25	31.6	28	37.6	25.6	32.7	25.4
28	20	36.5	20	39.7	21.2	39.7	20.5
21	18.6	22	20.6	24	19.2	24	19.1
15.6	31.3	18.6	37.7	20.1	35.9	20.1	34.2
26	31.3	34	37.2	34.6	35.5	34.6	35.5
24.2	18.5	32	18.6	39.2	15.8	39.1	15.8
25	34.1	34	38.3	30.1	39	30	39
19	30.4	22.6	36.5	19.8	36.8	19.6	36.7
21.9	32.3	28.6	35.8	26.7	40.2	26.5	39.9
28	21.6	29	21.8	30	23.5	30	22.1
19	22.3	23	24	20	25.7	20	25.2
26	18.7	29	18.8	30.8	15.5	30	15.5
23.8	15.9	28	17.5	27.8	18.1	27.8	18.1
19.6		24.7		23.7		23.6	
<i>promedio</i>	24.9	<i>promedio</i>	28.4	<i>promedio</i>	30.6	<i>promedio</i>	30.1

Figura A1.3: Pruebas de Anderson- Darling para evaluar si los datos del horario de las 17:30 horas tienen una distribución normal.

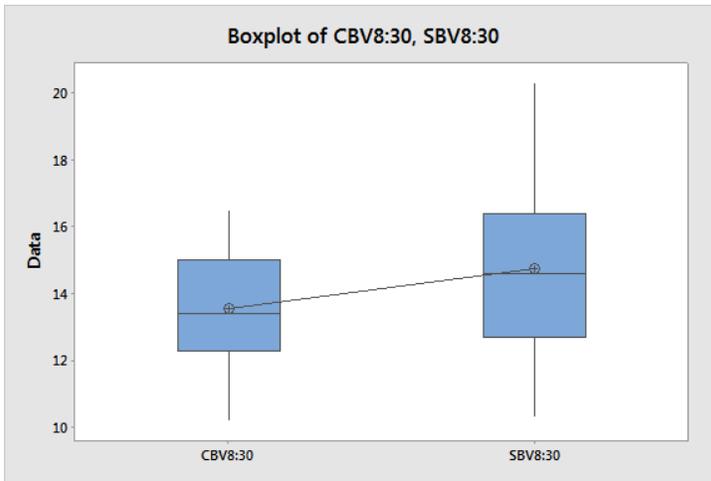


a) con barrera verde



b) sin barrera verde

Figura A1.4: Diagramas de caja



One-way ANOVA: CBV8:30, SBV8:30

Method
 Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

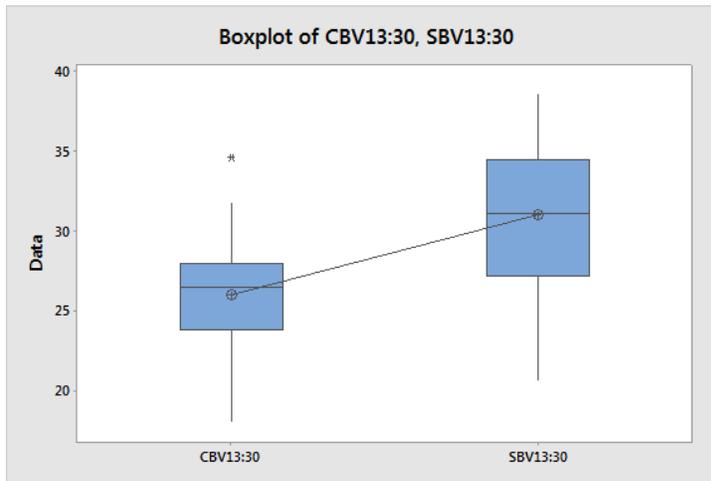
Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	CBV8:30, SBV8:30

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	34.20	34.201	7.93	0.006
Error	92	396.91	4.314		
Total	93	431.11			

a) Horario 8:30 a.m.



One-way ANOVA: CBV13:30, SBV13:30

Method
 Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

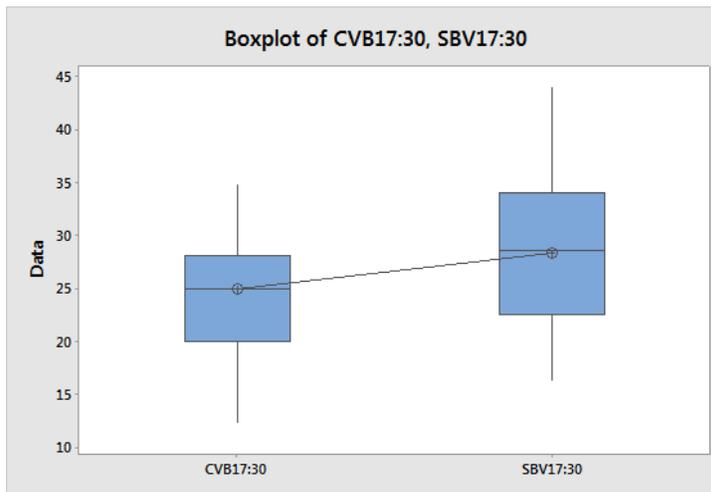
Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	CBV13:30, SBV13:30

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	587.5	587.50	35.11	0.000
Error	92	1539.5	16.73		
Total	93	2127.0			

b) horario de 13:30 horas



One-way ANOVA: CVB17:30, SBV17:30

Method
 Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	CVB17:30, SBV17:30

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	280.9	280.92	7.32	0.008
Error	92	3531.2	38.38		
Total	93	3812.1			

c) horario 17:30 horas

ANEXO 2: MEDICIONES DE RUIDO

Tabla A2.1: Resultados de las mediciones de ruido realizadas en los tres escenarios planteados

<i>Barrera verde</i>				
<i>0 m</i>	<i>0.7m</i>	<i>1.1m</i>	<i>1.5m</i>	<i>1.9m</i>
91.8	73.0	69.9	63.2	59.5
93.9	73.6	70.3	65.7	59.8
94.7	74.1	70.4	66.0	60.3
95.4	74.5	71.3	66.7	62.4
95.7	74.7	71.7	67.5	64.7
96.4	76.5	71.9	67.7	65.2
96.8	76.7	71.9	67.8	65.5
98.0	77.8	72.3	68.1	66.3
98.3	78.1	72.6	68.6	67.1
99.3	79.6	72.9	68.7	67.5
99.6	79.7	73.0	68.9	67.6
100.1	80.0	73.2	68.9	67.7
100.5	80.5	74.3	70.1	68.0
100.7	81.0	75.1	71.4	68.9
100.9	81.3	75.3	71.6	69.0
101.3	81.7	75.3	72.8	69.4
101.6	81.9	76.3	73.0	69.7
102.0	82.3	68.8	74.3	69.8
102.7	82.4	77.0	75.0	62.6
102.8	83.2	77.3	75.0	69.9
102.9	83.3	77.5	75.3	70.6
103.0	83.5	77.5	75.8	72.1
103.0	83.8	77.6	75.8	72.1
103.9	83.9	79.5	75.9	72.3
104.7	84.2	79.7	76.3	72.3
105.1	84.7	79.7	77.2	72.3
105.3	84.7	80.1	77.3	73.1
105.6	85.6	80.6	78.4	73.9
106.3	85.6	80.7	78.4	74.2
107.0	86.1	80.8	79.0	74.3
107.3	86.4	80.9	79.7	74.6
107.4	87.0	81.9	79.8	75.2
107.7	87.2	82.5	80.1	75.8
117.0	87.3	82.6	80.3	76.8
122.0	88.5	85.1	83.3	77.3

<i>Aire</i>				
<i>0 m</i>	<i>0.7m</i>	<i>1.1m</i>	<i>1.5m</i>	<i>1.9m</i>
101.0	74.0	73.0	70.0	75.0
101.0	76.0	79.0	72.0	75.0
102.0	76.0	80.0	73.0	75.0
102.0	78.0	80.0	76.0	76.0
102.0	79.0	81.0	76.0	76.0
103.0	79.0	82.0	79.0	76.0
103.0	80.0	82.0	80.0	76.0
103.0	80.0	82.0	82.0	77.0
104.0	80.0	82.0	82.0	78.0
104.0	80.0	82.0	82.0	78.0
104.0	80.0	82.0	82.0	78.0
106.0	80.0	82.0	82.0	78.0
106.0	81.0	83.0	82.0	78.0
106.0	81.0	83.0	82.0	78.0
106.0	82.0	83.0	82.0	78.0
106.0	82.0	84.0	82.0	78.0
107.0	82.0	84.0	83.0	78.0
107.0	83.0	84.0	83.0	78.0
107.0	83.0	85.0	83.0	78.0
107.0	83.0	85.0	83.0	80.0
107.0	86.0	85.0	84.0	82.0
108.0	86.0	85.0	84.0	82.0
108.0	88.0	85.0	84.0	82.0
108.0	88.0	85.0	84.0	82.0
108.0	89.0	85.0	84.0	83.0
108.0	90.0	85.0	84.0	83.0
108.0	90.0	85.0	85.0	83.0
109.0	90.0	85.0	86.0	83.0
109.0	91.0	86.0	87.0	84.0
109.0	91.0	86.0	87.0	84.0
110.0	93.0	86.0	88.0	85.0
111.0	93.0	87.0	89.0	86.0
112.0	94.0	88.0	90.0	86.0

<i>Sustrato</i>				
<i>0 m</i>	<i>0.7m</i>	<i>1.1m</i>	<i>1.5m</i>	<i>1.9m</i>
90.5	68.1	69.5	68.1	61.7
90.7	70.7	73.5	62.4	65.3
86.7	71.5	71.2	66.2	65.0
95.3	67.3	66.4	69.2	62.3
77.7	67.7	67.1	63.5	65.4
87.6	65.9	60.8	57.6	65.6
86.6	64.6	63.5	62.5	58.5
80.2	63.9	67.3	59.4	57.3
88.6	69.1	70.2	65.9	55.6
86.3	61.3	53.9	58.3	59.4
90.2	68.9	72.3	65.9	63.4
89.9	60.0	58.8	55.3	53.3
85.9	64.5	64.4	61.2	65.1
90.8	67.7	72.4	67.9	58.5
85.4	66.2	62.8	65.2	58.7
85.4	59.3	62.5	69.3	55.4
89.0	78.0	74.8	70.5	65.7
88.5	75.0	69.3	69.0	63.0
85.4	77.6	70.3	69.9	65.5
86.8	73.8	66.8	66.9	64.6
90.0	68.5	66.3	65.2	63.5
93.2	71.6	71.2	67.9	68.0
91.8	71.2	67.0	66.9	64.3
90.0	70.5	69.0	69.6	68.7
89.9	68.9	63.8	55.0	53.9
88.5	66.2	67.0	72.0	65.0
82.0	67.0	63.2	62.6	54.6
84.0	67.6	66.9	66.3	65.0
95.4	68.7	61.7	66.0	63.1
87.7	58.9	56.5	56.0	53.8
81.6	65.0	58.3	57.4	51.6
87.8	67.9	66.1	64.5	61.3

ANEXO 3:

Tabla A3.1 Volumen transpirado por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 30 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.

		Volumen transpirado por el SHBV (lt/año)					
Ancho	Alto	Largo (m)					
(m)	(m)	1	2	3.3	5	10	20
0.3	2.0	158.4	316.8	522.7	792.0	1584.0	3168.0
	3.0	237.6	475.2	784.1	1188.0	2376.0	4752.0
	4.0	316.8	633.6	1045.4	1584.0	3168.0	6336.0
	5.0	396.0	792.0	1306.8	1980.0	3960.0	7920.0
	6.0	475.2	950.4	1568.2	2376.0	4752.0	9504.0
0.4	2.0	211.2	422.4	697.0	1056.0	2112.0	4224.0
	3.0	316.8	633.6	1045.4	1584.0	3168.0	6336.0
	4.0	422.4	844.8	1393.9	2112.0	4224.0	8448.0
	5.0	528.0	1056.0	1742.4	2640.0	5280.0	10560.0
	6.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
0.5	2.0	264.0	528.0	871.2	1320.0	2640.0	5280.0
	3.0	396.0	792.0	1306.8	1980.0	3960.0	7920.0
	4.0	528.0	1056.0	1742.4	2640.0	5280.0	10560.0
	5.0	660.0	1320.0	2178.0	3300.0	6600.0	13200.0
	6.0	792.0	1584.0	2613.6	3960.0	7920.0	15840.0
0.6	2.0	316.8	633.6	1045.4	1584.0	3168.0	6336.0
	3.0	475.2	950.4	1568.2	2376.0	4752.0	9504.0
	4.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
	5.0	792.0	1584.0	2613.6	3960.0	7920.0	15840.0
	6.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.7	2.0	369.6	739.2	1219.7	1848.0	3696.0	7392.0
	3.0	554.4	1108.8	1829.5	2772.0	5544.0	11088.0
	4.0	739.2	1478.4	2439.4	3696.0	7392.0	14784.0
	5.0	924.0	1848.0	3049.2	4620.0	9240.0	18480.0
	6.0	1108.8	2217.6	3659.0	5544.0	11088.0	22176.0
0.8	2.0	422.4	844.8	1393.9	2112.0	4224.0	8448.0
	3.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
	4.0	844.8	1689.6	2787.8	4224.0	8448.0	16896.0
	5.0	1056.0	2112.0	3484.8	5280.0	10560.0	21120.0
	6.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0

Tabla A3.2 Volumen transpirado por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 60 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.

		Volumen transpirado por el SHBV (lt/año)					
ancho	alto	largo (m)					
(m)	(m)	1	2	3.3	5	10	20
0.3	2.0	316.8	633.6	1045.4	1584.0	3168.0	6336.0
0.3	3.0	475.2	950.4	1568.2	2376.0	4752.0	9504.0
0.3	4.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
0.3	5.0	792.0	1584.0	2613.6	3960.0	7920.0	15840.0
0.3	6.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.4	2.0	422.4	844.8	1393.9	2112.0	4224.0	8448.0
0.4	3.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
0.4	4.0	844.8	1689.6	2787.8	4224.0	8448.0	16896.0
0.4	5.0	1056.0	2112.0	3484.8	5280.0	10560.0	21120.0
0.4	6.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0
0.5	2.0	528.0	1056.0	1742.4	2640.0	5280.0	10560.0
0.5	3.0	792.0	1584.0	2613.6	3960.0	7920.0	15840.0
0.5	4.0	1056.0	2112.0	3484.8	5280.0	10560.0	21120.0
0.5	5.0	1320.0	2640.0	4356.0	6600.0	13200.0	26400.0
0.5	6.0	1584.0	3168.0	5227.2	7920.0	15840.0	31680.0
0.6	2.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
0.6	3.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.6	4.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0
0.6	5.0	1584.0	3168.0	5227.2	7920.0	15840.0	31680.0
0.6	6.0	1900.8	3801.6	6272.6	9504.0	19008.0	38016.0
0.7	2.0	739.2	1478.4	2439.4	3696.0	7392.0	14784.0
0.7	3.0	1108.8	2217.6	3659.0	5544.0	11088.0	22176.0
0.7	4.0	1478.4	2956.8	4878.7	7392.0	14784.0	29568.0
0.7	5.0	1848.0	3696.0	6098.4	9240.0	18480.0	36960.0
0.7	6.0	2217.6	4435.2	7318.1	11088.0	22176.0	44352.0
0.8	2.0	844.8	1689.6	2787.8	4224.0	8448.0	16896.0
0.8	3.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0
0.8	4.0	1689.6	3379.2	5575.7	8448.0	16896.0	33792.0
0.8	5.0	2112.0	4224.0	6969.6	10560.0	21120.0	42240.0
0.8	6.0	2534.4	5068.8	8363.5	12672.0	25344.0	50688.0

Tabla A3.2 Volumen transpirado por el SHBV cuando se presentan condiciones climáticas extremas (temperatura superior a 40°C durante 2 horas/día) en 90 días al año. El recuadro resaltado corresponde al valor promedio para una persona con dotación de agua potable de 100 lt/hab. día.

		Volumen transpirado por el SHBV (lt/año)					
ancho	alto	largo (m)					
(m)	(m)	1	2	3.3	5	10	20
0.3	2.0	475.2	950.4	1568.2	2376.0	4752.0	9504.0
0.3	3.0	712.8	1425.6	2352.2	3564.0	7128.0	14256.0
0.3	4.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.3	5.0	1188.0	2376.0	3920.4	5940.0	11880.0	23760.0
0.3	6.0	1425.6	2851.2	4704.5	7128.0	14256.0	28512.0
0.4	2.0	633.6	1267.2	2090.9	3168.0	6336.0	12672.0
0.4	3.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.4	4.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0
0.4	5.0	1584.0	3168.0	5227.2	7920.0	15840.0	31680.0
0.4	6.0	1900.8	3801.6	6272.6	9504.0	19008.0	38016.0
0.5	2.0	792.0	1584.0	2613.6	3960.0	7920.0	15840.0
0.5	3.0	1188.0	2376.0	3920.4	5940.0	11880.0	23760.0
0.5	4.0	1584.0	3168.0	5227.2	7920.0	15840.0	31680.0
0.5	5.0	1980.0	3960.0	6534.0	9900.0	19800.0	39600.0
0.5	6.0	2376.0	4752.0	7840.8	11880.0	23760.0	47520.0
0.6	2.0	950.4	1900.8	3136.3	4752.0	9504.0	19008.0
0.6	3.0	1425.6	2851.2	4704.5	7128.0	14256.0	28512.0
0.6	4.0	1900.8	3801.6	6272.6	9504.0	19008.0	38016.0
0.6	5.0	2376.0	4752.0	7840.8	11880.0	23760.0	47520.0
0.6	6.0	2851.2	5702.4	9409.0	14256.0	28512.0	57024.0
0.7	2.0	1108.8	2217.6	3659.0	5544.0	11088.0	22176.0
0.7	3.0	1663.2	3326.4	5488.6	8316.0	16632.0	33264.0
0.7	4.0	2217.6	4435.2	7318.1	11088.0	22176.0	44352.0
0.7	5.0	2772.0	5544.0	9147.6	13860.0	27720.0	55440.0
0.7	6.0	3326.4	6652.8	10977.1	16632.0	33264.0	66528.0
0.8	2.0	1267.2	2534.4	4181.8	6336.0	12672.0	25344.0
0.8	3.0	1900.8	3801.6	6272.6	9504.0	19008.0	38016.0
0.8	4.0	2534.4	5068.8	8363.5	12672.0	25344.0	50688.0
0.8	5.0	3168.0	6336.0	10454.4	15840.0	31680.0	63360.0
0.8	6.0	3801.6	7603.2	12545.3	19008.0	38016.0	76032.0

ANEXO 4: MANUAL DEL SHBV



*MANUAL
DE
CONSTRUCCIÓN
Y
MANTENIMIENTO
DEL
SISTEMA
DE
HUMEDAL
BARRERA
VERDE
(SHBV)*



Introducción

*El SHBV consiste de un canal que contiene un sustrato mineral natural (grava, arena, tepojal, o tezontle) donde se plantan ejemplares de carrizo (*Arundo donax*) y se riegan con el agua residual proveniente de actividades de lavado de ropa, limpieza del edificio, duchas y cocina. Se ubica en la cara del edificio donde se requiera mayor sombreado, dependiendo del clima, en caso de que no se requiera sombreado, puede colocarse como barda perimetral.*

El SHBV se desarrolló con la finalidad de brindar una alternativa para disminuir el impacto ambiental generado por la operación de edificios habitacionales y de servicios.

La principal característica de este sistema consiste en que se trata de una solución integral que ofrece disminuir, la necesidad de climatización de los edificios, al mismo tiempo que se aprovecha el agua residual y se captura carbono en la biomasa vegetal. Todo lo anterior con bajos costos de instalación y mantenimiento.

Una característica importante de resaltar del SHBV es que al tratarse de un sistema sencillo, no requiere mano de obra especializada. El SHBV-I puede ser construido por cualquier persona, independientemente de su formación académica, los cálculos para el dimensionamiento se pueden llevar a cabo con las cuatro operaciones matemáticas básicas (+, -, x, ÷), la instalación requiere tareas como excavación y plantación de rizomas, el mantenimiento se reduce a la poda de los tallos. El caso del SHBV-II es muy similar, solo se adiciona el requerimiento de conexión de tubería sanitaria. Para el SHBV-III, los conocimientos técnicos necesarios para su construcción y mantenimiento se centran en instalaciones sanitarias de tubería, depósitos y bombas.

El presente documento tiene como objetivo difundir la información necesaria para la instalación del SHBV de forma accesible para todo público, con la finalidad de que esta tecnología pueda ser incorporada en edificios nuevos y edificios pre – existentes.

La información presentada corresponde a las instrucciones básicas para el dimensionamiento, ubicación, construcción y mantenimiento del SHBV.

1. Dimensionamiento

Para dimensionar el SHBV se requiere conocer el volumen de agua residual gris generado. Se pueden utilizar cualquiera de los siguientes métodos:

a) Dotación de agua potable

La información sobre la dotación de agua potable para cada región puede estar disponible en las oficinas de los organismos de agua potable de cada municipio o delegación.

Este método es útil cuando se trata de edificios nuevos, tales como casas de interés social, edificios de departamentos entre otros.

Ejemplo:

Dotación de agua potable = 100 lt / hab . día

No. de personas en la vivienda = 4

Tr = 5 días

Vol. de agua residual = dotación X habitantes X tiempo de residencia
 = 100 lt / hab . día X 4 hab. X 5 días = 2000 lt

b) Flujo volumétrico

Para la determinación de flujo volumétrico por muestreo compuesto de agua residual en un edificio residencial se requiere realizar un muestreo. En la tabla A3.1 se muestra el número de muestras simples que deben tomarse, el periodo de tiempo de espera entre muestra y muestra y el horario sugerido para realizar la toma de cada muestra. También se muestran valores hipotéticos para el flujo volumétrico con los cuales se realizará el ejemplo del cálculo del volumen de agua residual generada.

Tabla A3.1: Ejemplo de programación de muestre de agua residual

Duración del muestreo (horas)	No. de muestras simples	Tiempo entre muestras (horas)	Horario de la toma de muestras simples		Flujo volumétrico hipotético
16	5	4	Muestra 1	6:00 hrs	1.5 l/min
			Muestra 2	10:00 hrs	0.2 l/min
			Muestra 3	14:00 hrs	1.0 l/min
			Muestra 4	18:00 hrs	0.5 l/min
			Muestra 5	20:00 hrs	0.8 l/min
Flujo volumétrico promedio					0.8 l/min
Volumen de agua residual					3840 l

Con los datos de flujo volumétrico de las muestras puntuales se calcula el flujo volumétrico promedio. Y con este promedio se calcula el volumen generado (ver ecuación 1) durante el periodo de tiempo indicado como tiempo de residencia (tr) del humedal.

Vol. de agua residual = flujo vol. prom. X 60 min X periodo de actividades X tr

Vol. de agua residual = 0.8 l/min X 60 min X 16 hr/día X 5 días

Vol. de agua residual = 3840 l

Como es de esperarse, si se realiza el muestreo por un periodo de tiempo mayor, se contará con resultados más confiables que si solo se realiza un día. La recomendación es realizarlo por lo menos durante una semana completa, para tener datos tanto de los días de trabajo como del fin de semana, ya que las actividades no son las mismas y por supuesto la generación de agua residual tiene variaciones importantes, tales como las correspondientes al uso de la lavadora de ropa y limpieza general de la casa, ya que por lo regular estas actividades solo se realizan una vez a la semana o incluso en ocasiones 1 vez cada dos semanas, en cuyo caso, el muestreo se deberá realizar por dos semanas.

c) Consumo promedio

Para determinar el consumo promedio se requiere en primer lugar determinar el volumen unitario por lo que a su vez es necesario que los habitantes realicen la medición directa del volumen de agua usada en cada una de las actividades. En algunos casos como el uso de la lavadora de ropa, puede recurrirse al consumo nominal del electrodoméstico, en caso de que el fabricante lo reporte en la ficha técnica. Es importante mencionar que se omite el WC dentro de este inventario debido a que el SHBV está indicado para usarlo solo con agua residual gris, ya que la mejor solución para el tratamiento del agua residual con excretas es la fosa séptica.

Tabla A3.2: Inventario de actividades generadoras de agua residual

Actividad	Volumen unitario (m ³)	Frecuencia en tr	Volumen en tr (m ³)
Baño en regadera	0.05	5	0.25
Carga de ropa en lavadora	0.2	3	0.6
Lavado de trastes	0.1	1	0.1
Lavado de dientes	0.001	15	0.015
Lavado de manos	0.001	15	0.015
Limpieza general de la casa	0.05	1	0.05
<i>Total</i>			1.020

Una de las principales desventajas de este método es la necesidad de determinar el volumen de agua residual generado por actividad, ya que se requiere de la participación activa de los habitantes de la residencia, lo cual en la mayoría de los casos es difícil de conseguir. Sin embargo, si se realiza a conciencia, este resulta el método más confiable para conocer el volumen de agua residual generado.

Cuando se conoce la generación de agua residual, es posible aplicar la ecuación A3.1 para determinar la longitud del canal del SHBV. Cabe mencionar que el ancho depende del espacio disponible y del clima, ya que como se verá en el apartado de ubicación y orientación, en climas húmedos se recomienda menor volumen de biomasa, lo cual puede lograrse con un ancho de canal menor. El tiempo de residencia y la profundidad son valores estandarizados que no cambian.

$L_{bv} = 2 X V / [A X P] \dots$ ecuación A3.1	L_{bv} : Longitud del SHBV (m) V: volumen de agua residual generado en el tiempo de residencia (m^3) Tr: tiempo de residencia = 5 días A: ancho del SHBV (M) P: profundidad del SHBV = 0.6 m
--	--

En la tabla A3.3 se muestran longitudes calculadas para cuatro valores de ancho de la barrera verde recomendados y nueve valores de volumen de agua residual típicos en casa habitación de zonas urbanas y zonas de transición urbana-rural.

Tabla A3.3: Longitud de la BV para diferentes valores de volumen de agua residual y ancho de la BV

Ancho de la BV (m)	Volumen de agua residual por tiempo de residencia (m^3/tr)									Longitud de la BV (m)
	1	1.5	2	2.5	3	4	5	7.5	10	
0.3	11.1	16.7	22.2	27.8	33.3	44.4	55.6	83.3	111.1	
0.4	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0	33.3	41.7	62.5	83.3	
0.5	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	26.7	33.3	50.0	66.7	
0.6	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	22.2	27.8	41.7	55.6	

Por otra parte, si la información disponible corresponde a la dotación (lt/hab.día) se puede emplear la ecuación A3.2 para determinar la longitud del canal del SHBV. Utilizando un valor de dotación diaria de 100 l/persona, se construyó la tabla A3.4 con la finalidad de que sirva de guía para el dimensionamiento del SHBV conociendo únicamente el número de habitantes.

$L_{bv} = 2 X N X D X Tr / [A X P] \dots$ ecuación A3.2	L_{bv} : Longitud del SHBV (m) N: número de habitantes D: dotación de agua por habitante = 0.1 (m^3) Tr: tiempo de residencia = 5 días A: ancho del SHBV (M) P: profundidad del SHBV = 0.6 m
---	---

Tabla A3.4: Longitud del sistema de SHBV para diferentes valores de ancho y No. de habitantes

Ancho de la BV (m)	No. habitantes										Longitud de la BV (m)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0.3	5.6	11.1	16.7	22.2	27.8	33.3	38.9	44.4	50.0	55.6	
0.4	4.2	8.3	12.5	16.7	20.8	25.0	29.2	33.3	37.5	41.7	
0.5	3.3	6.7	10.0	13.3	16.7	20.0	23.3	26.7	30.0	33.3	
0.6	2.8	5.6	8.3	11.1	13.9	16.7	19.4	22.2	25.0	27.8	

Cabe aclarar que siempre será mejor tener datos lo más cercanos a la realidad, para evitar un sobredimensionamiento que a su vez de como consecuencia mayor costo de construcción, o por el contrario tener un sistema que no cuente con la capacidad necesaria para tener un aprovechamiento eficiente del agua residual.

2. Ubicación

Para ubicar y orientar correctamente el humedal, de tal forma que sea posible obtener los mayores beneficios en cuanto bioclimatización es necesario conocer el clima específico del lugar donde se piensa instalar, ya que cada clima requiere estrategias diferentes para lograr el confort al interior de los edificios.

En caso de que se desconozca el tipo de clima, es posible determinarlo conociendo la temperatura y la precipitación media, utilizando la figura A3.1, en la cual se muestra con letras mayúsculas el tipo de clima y con letras minúsculas la estrategia de climatización que se requiere.

Figura A3.1: Matriz de zonas climáticas

		<p><i>CALIDO SECO:</i> Enfriamiento y humidificación</p>	<p><i>CÁLIDO:</i> Enfriamiento</p>	<p><i>CÁLIDO HÚMEDO:</i> Enfriamiento y deshumidificación</p>
<p>Temperatura media del mes más caluroso</p>	<p>26°C</p>	<p><i>TEMPLADO SECO:</i> Humidificación</p>	<p><i>TEMPLADO:</i> Sin requerimientos</p>	<p><i>TEMPLADO HÚMEDO:</i> Deshumidificación</p>
	<p>21°C</p>	<p><i>SEMI-FRÍO SECO:</i> Calentamiento y humidificación</p>	<p><i>SEMI-FRÍO:</i> Calentamiento</p>	<p><i>SEMI-FRÍO HÚMEDO:</i> Calentamiento y Deshumidificación</p>
		<p>650 mm</p>	<p>1000 mm</p>	

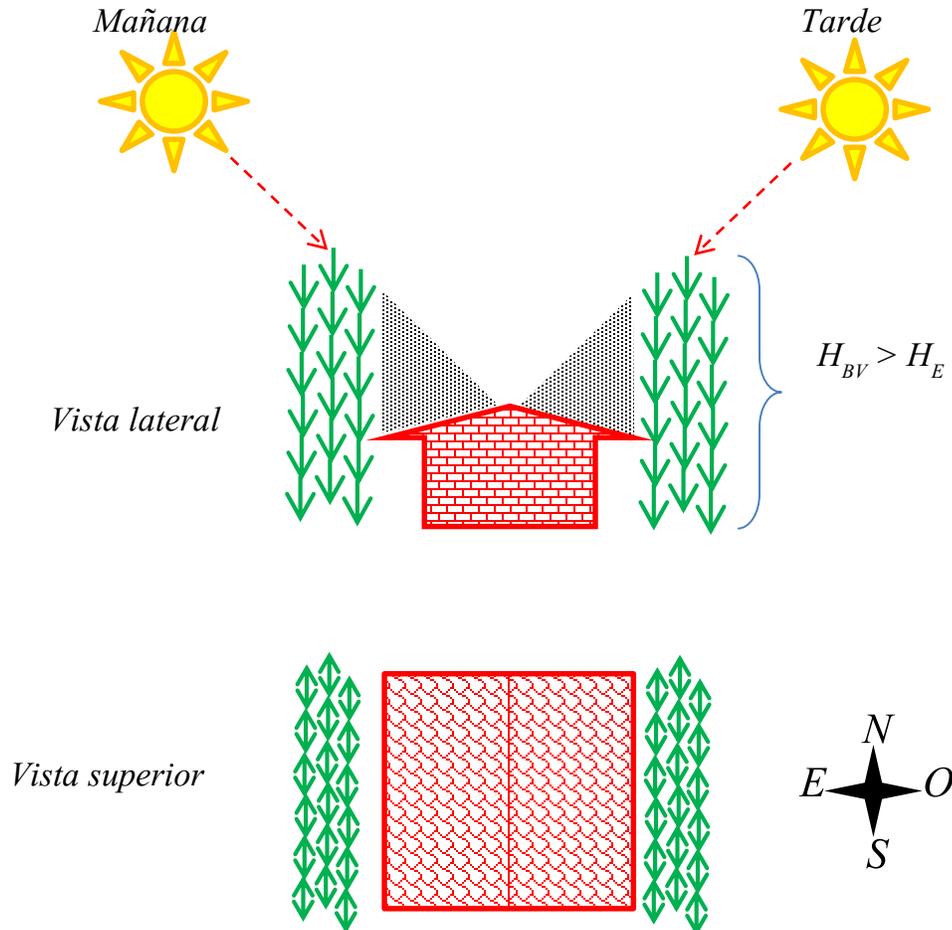
Fuente: Colegio de Arquitectura Bioclimática Aplicada A.C.

Desde el punto de vista de la bioclimatización, el SHBV es especialmente útil en el clima CALIDO SECO, en el cual se requiere de enfriamiento y humidificación. Lo anterior, debido a que puede proveer enfriamiento por sombreado y evaporación.

Contrariamente, en el clima SEMI-FRÍO HÚMEDO, donde la necesidad consiste en calentamiento y deshumidificación, el SHBV no tiene utilidad en cuanto a la bioclimatización, sin embargo, una ubicación inadecuada puede ocasionar temperatura muy baja y exceso de humedad al interior del edificio.

Por lo tanto, en todos los casos es indispensable ubicar y orientar adecuadamente el SHBV, ya sea para obtener el máximo beneficio en bioclimatización, o para evitar problemas de enfriamiento excesivo.

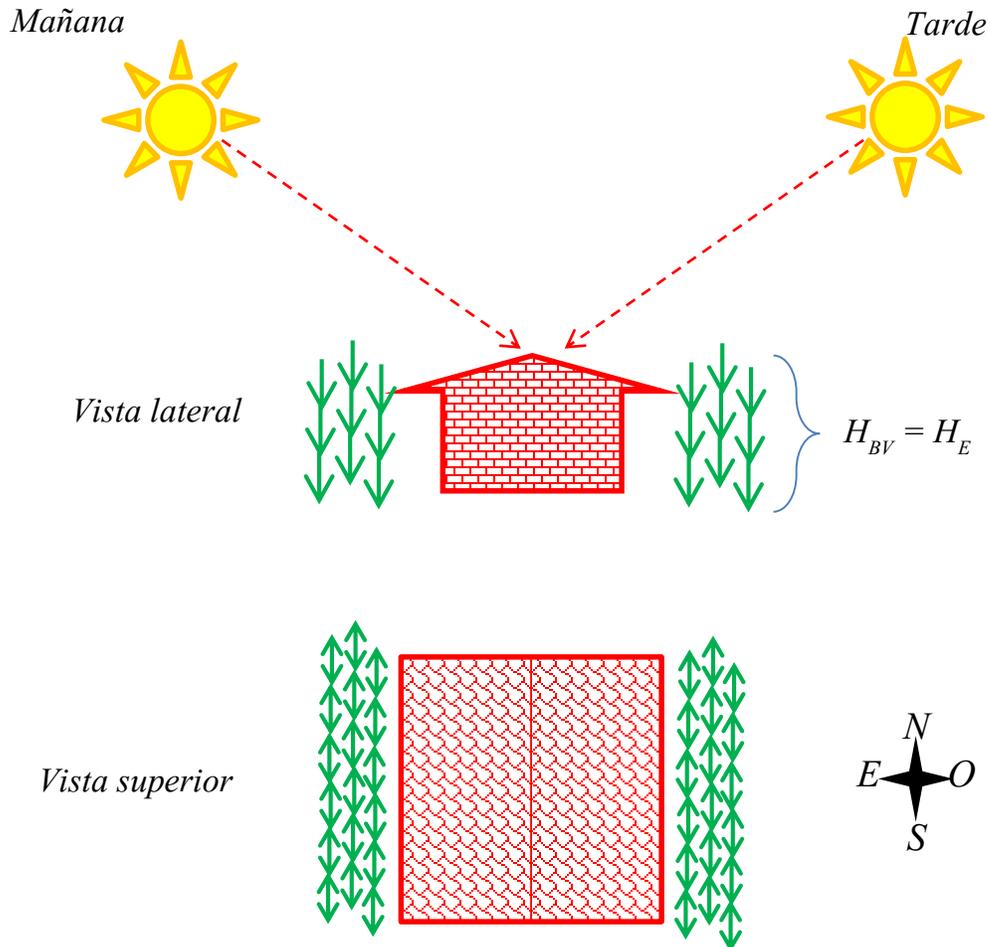
FIGURA A3.2: CLIMA CÁLIDO SECO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Asimismo, para maximizar este beneficio es conveniente dejar que las plantas alcancen la mayor altura posible, cabe recordar que la especie *Arundo donax* puede crecer en promedio 6 m de altura en condiciones ambientales favorables.

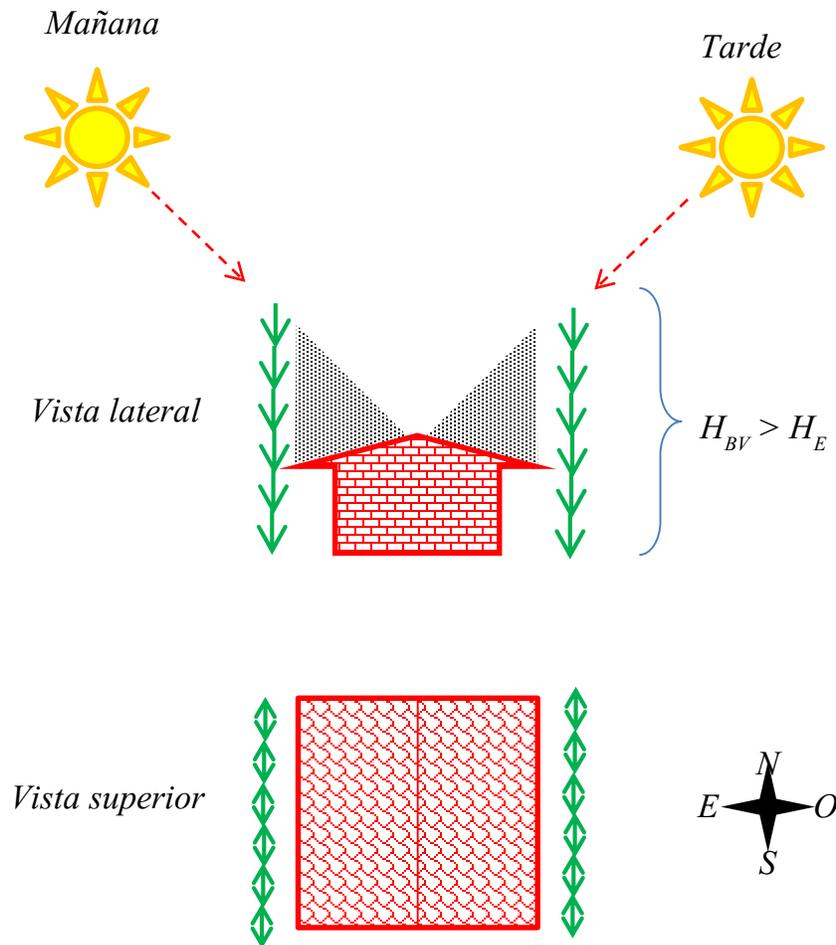
Si se tiene una altura de las plantas mayor a la altura del edificio se reducen las horas de sol, solo al medio día en el techo. Se debe maximizar el ancho del sistema (0.6 m o más de ser posible), para obtener el mayor volumen vegetal, lo cual a su vez dará como resultado mayor transpiración. De esta forma se maximizará la refrigeración evaporativa, principal estrategia bioclimática requerida en este tipo de clima.

FIGURA A3.3: CLIMA CÁLIDO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Debido a que en este caso la estrategia de refrigeración evaporativa se necesita en menor magnitud que en el caso del clima cálido seco, el volumen de la biomasa vegetal requerido para la transpiración es menor, por lo que la altura de las plantas puede mantenerse similar a la del edificio.

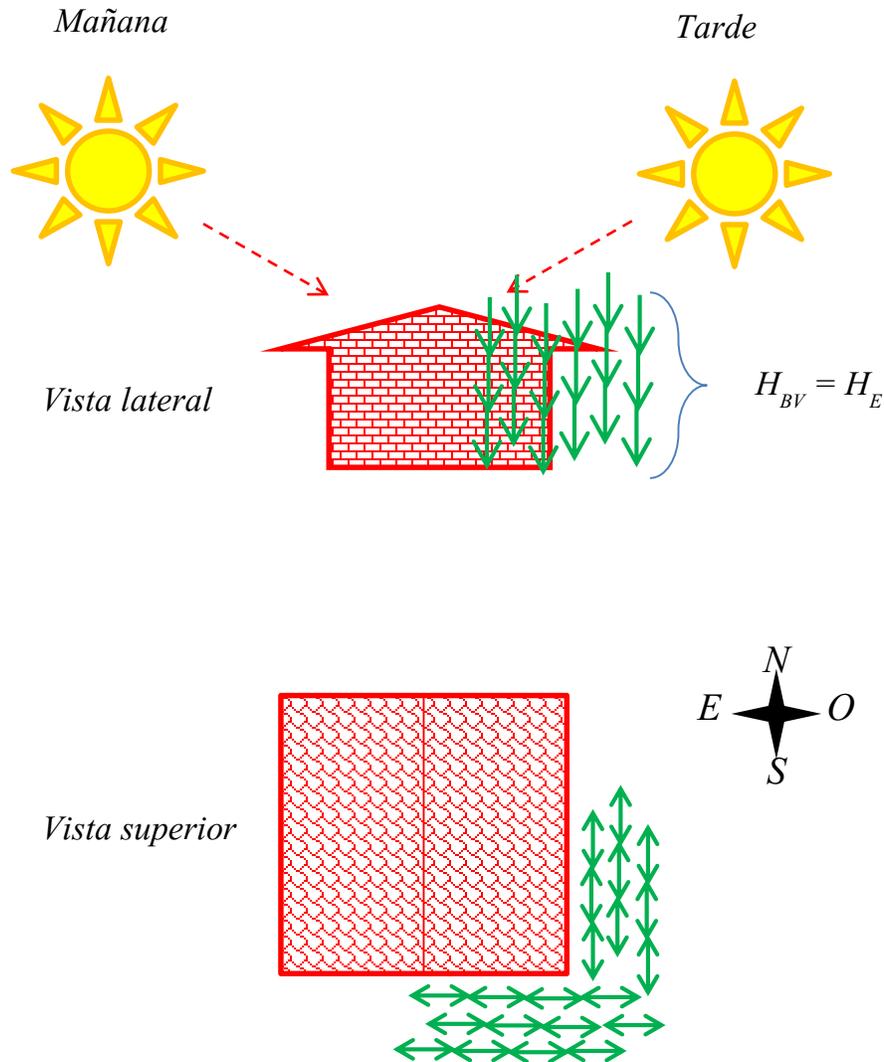
FIGURA A3.4: CLIMA CÁLIDO HÚMEDO



El sistema debe ubicarse de preferencia tanto en la cara Este como en la Oeste del edificio, con la finalidad de obtener el mayor número de horas de sombra tanto en la mañana como en la tarde. Con la finalidad de maximizar la estrategia de sombreado, la altura de las plantas, se recomienda, en la media de lo posible, mantenerla superior a la altura del edificio.

Contario a los casos de clima cálido seco y clima cálido, en este caso no se requiere la estrategia de refrigeración evaporativa, por lo que se recomienda que el volumen de la biomasa vegetal debe minimizarse para evitar la transpiración, esto puede lograrse manteniendo el ancho del humedal en el valor mínimo (0.3 m).

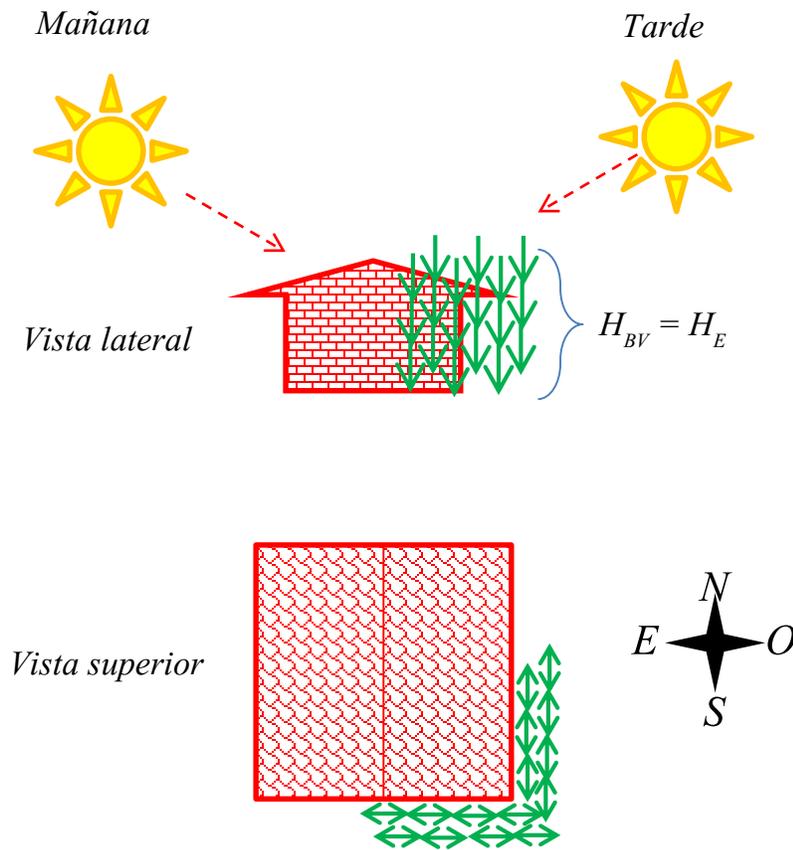
FIGURA A3.5: CLIMA TEMPLADO SECO



Cuando existe un clima templado seco, no se requiere refrigeración evaporativa, solo se necesita humidificación, por tal motivo se recomienda ubicar el humedal en el extremo noroeste del edificio, de tal manera que solo haya transpiración en las últimas horas de la tarde cuando el calentamiento es más intenso.

Esta ubicación también permitirá el calentamiento solar por la mañana cuando es menos intenso. En cuanto a la altura de las plantas, se recomienda mantenerla igual al edificio, ya que no se requiere estrategia de sombreamiento sobre el techo.

FIGURA A3.6: CLIMA TEMPLADO HÚMEDO

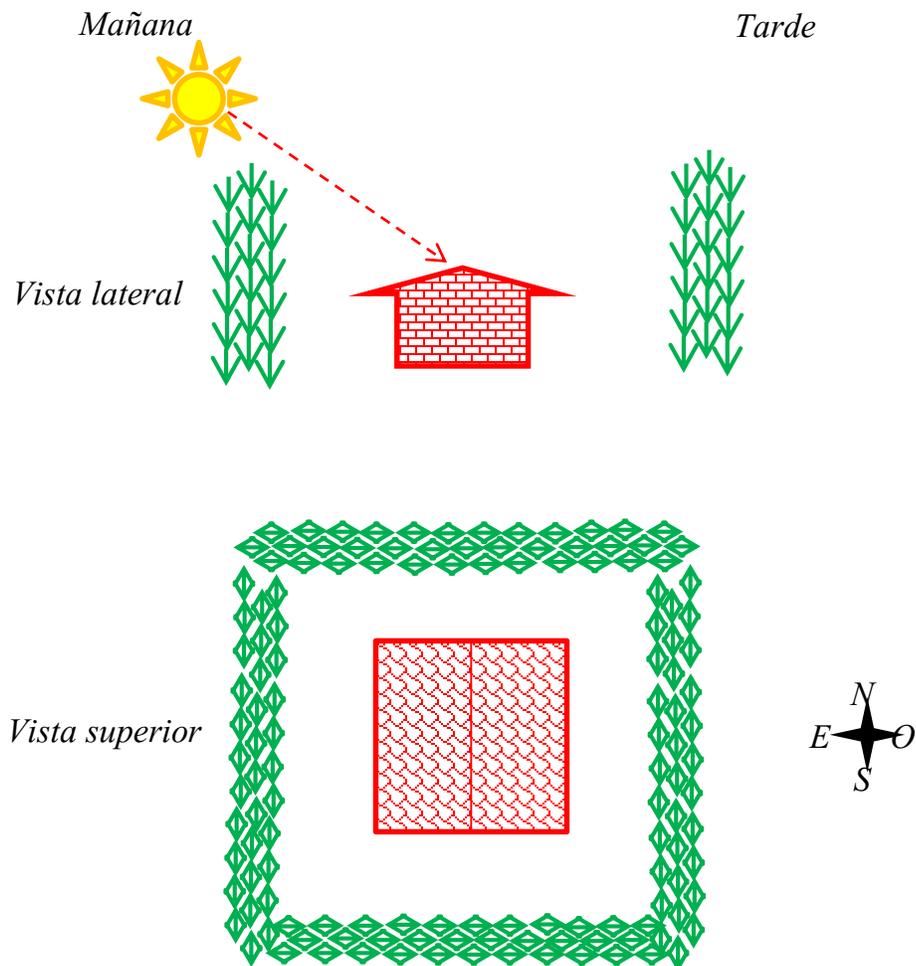


Cuando existe un clima templado húmedo, no se requiere refrigeración evaporativa, por tal motivo se recomienda disminuir el volumen de la biomasa vegetal mediante la reducción del ancho del humedal (0.4 m aprox.). Asimismo, se debe ubicar el humedal en el extremo noroeste del edificio, de tal manera que solo haya transpiración en las últimas horas de la tarde cuando el calentamiento es más intenso.

Esta ubicación también permitirá el calentamiento solar por la mañana cuando es menos intenso. En cuanto a la altura de las plantas, se recomienda mantenerla igual al edificio, ya que no se requiere estrategia de sombreado sobre el techo.

En este clima también puede aplicarse el humedal como barda perimetral que se muestra en el esquema A3.7

FIGURA A3.7: CLIMA TEMPLADO

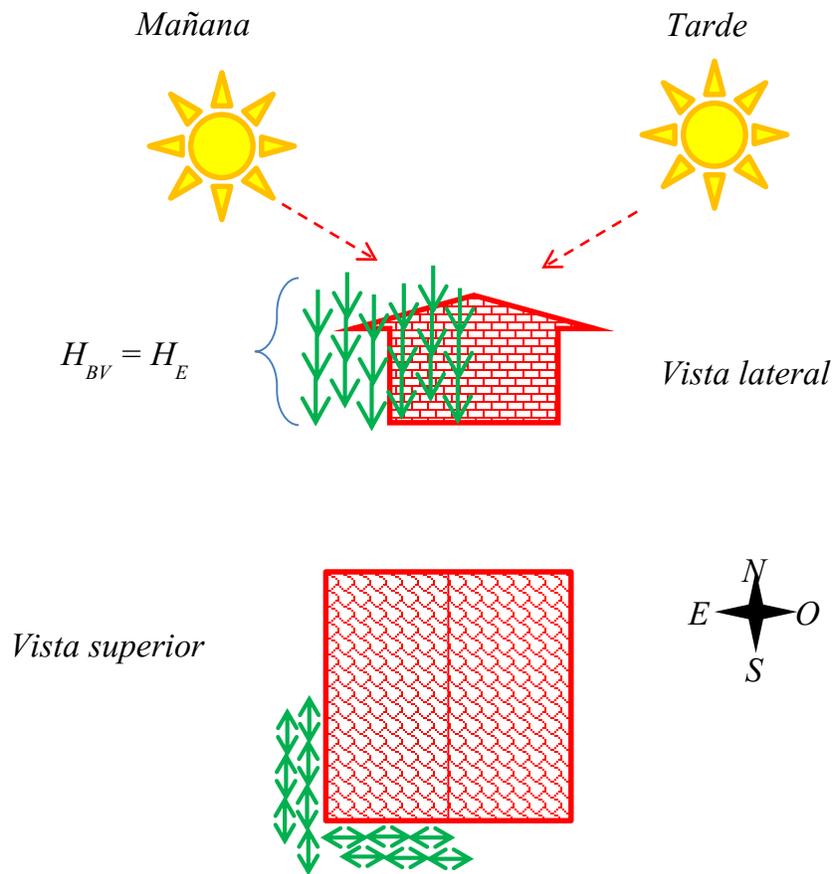


El clima templado no requiere la aplicación de estrategias bioclimáticas para alcanzar condiciones ambientales de confort. Por tal motivo, la ubicación del humedal no tiene que ver con favorecer el sombreado o la transpiración.

En este caso se recomienda colocar el humedal como barda perimetral para aprovechar sus beneficios en la captura de carbono, el amortiguamiento acústico, y aprovechamiento de agua residual. Además de proporcionar privacidad y mejorar el paisaje.

Con respecto a la altura de las plantas, está estará en función más de cuestiones estéticas que funcionales.

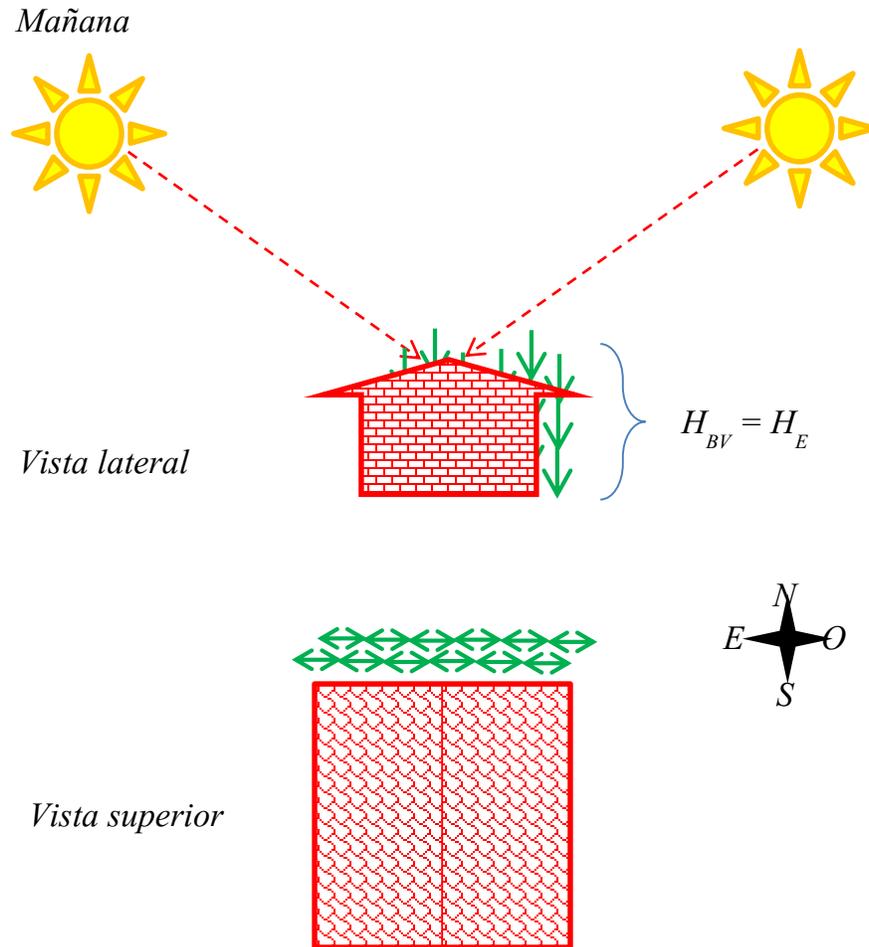
FIGURA A3.8: CLIMA SEMIFRÍO SECO



Para el clima semifrío seco, la estrategia bioclimática requerida es calentamiento solar. La ubicación recomendada del humedal es el sureste, porque de esta manera se permitirá el asoleamiento la mayor parte del día sobre todo por la tarde cuando es más intenso. El calor ganado por dicho asoleamiento será suficiente mantener el edificio caliente durante la noche. Por otra parte, solo se tendrá sombra en las primeras horas de la mañana. En cuanto a la transpiración, esta, debido a las temperaturas, no será elevada.

En todos los climas semifríos es recomendable realizar una poda completa en temporada de invierno, (ver mantenimiento).

FIGURA A3.9: CLIMA SEMIFRÍO y SEMIFRÍO HÚMEDO



La ubicación del humedal en el Norte, es oportuna para los tres tipos de clima semifrío, porque como ya se mencionó en el esquema 7, en este tipo de clima lo que se requiere es la ganancia de calor mediante el calentamiento solar, por lo tanto es necesario permitir el asoleamiento el mayor tiempo posible. Respecto a la transpiración, no representa un problema, ya que debido a las temperaturas relativamente bajas, este fenómeno es de magnitud moderada.

En este caso no es necesario realizar la poda total del humedal en invierno, ya que no interfiere con el camino del sol en ningún momento del año.

3. Costos

Para conocer el costo de instalación del SHBV se debe contar con la siguiente información:

- Dimensiones: largo y ancho
- Tipo de sistema: SHBV-I, SHBV-II, SHBV-III)
- Costos de los componentes

En la tabla A3.5 se presenta un resumen que permite identificar fácil y rápidamente los componentes de cada tipo de SHBV, lo anterior con la finalidad de utilizar esta información para el llenado de la hoja de cálculo que se elaboró específicamente para la determinación del costo aproximado del SHBV (hoja de cálculo de costos del SHBV.xlsx)

Tabla A3.5: Componentes de acuerdo al tipo de SHBV

Categoría		Descripción	SHBV-I	SHBV-II	SHBV-III
Materiales	Sustrato	Arena	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)	✓ (se selecciona un tipo de sustrato)
		Grava			
		Tezontle			
		Tepojal			
	Tubería pvc	2"	✓ (se selecciona un diámetro)	✓ (se selecciona un diámetro)	✓ (se selecciona un diámetro)
		4"			
	Accesorios	"T", Codos, etc.			
		Válvula		✓	✓
		Bomba			✓
	Impermeabilizante	Geomembrana	✓	✓	✓
		Canales construidos		✓	✓
		Contenedores plásticos			(Se selecciona un tipo de contenedor)
		Contenedores concreto			
	Almacenamiento de agua	Tanque de almacenamiento de agua residual			✓
Tanque de almacenamiento de agua tratada				✓	
Mano de obra	Excavación		✓	✓	✓
	Construcción de canales			✓	✓
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua residual				✓
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua tratada				✓
	Instalación de tubería de conexión del sistema (entrada)		✓	✓	✓
	Instalación de tubería de conexión del sistema (salida)			✓	✓
	Extracción de rizomas		✓	✓	✓
	Plantación de rizomas		✓	✓	✓
	Instalación de bomba				✓

Esta hoja de cálculo permite conocer el costo aproximado del sistema si se cuenta con los datos de las variables de diseño y los costos unitarios. Se elaboraron dos versiones, una para ser utilizada con el método de dimensionamiento que emplea la dotación y otra para utilizar el volumen de agua residual generado.

A continuación se muestra un ejemplo del cálculo de costos del SHBV empleando la hoja de cálculo con la opción del volumen de generación de agua residual y SHBV-III

Figura A3.10: ejemplo de cálculo de costos del SHBV-III

Dimencionamiento empleando el volumen de agua residual generado						
DATOS		Tipo de sistema	SHBV-III			
		Ancho del canal (m)	0.5			
		Volumen de agua residual (m3)	5			
		Longitud del canal(m)	33.3			
Categoría	Descripción	P.U.	Cantidad	Unidade	Total (\$)	
Materiales	Sustrato	Arena		10.0	m ³	0.0
		Grava		10.0	m ³	0.0
		Tezontle	100	10.0	m ³	1000.0
		Tepojal		10.0	m ³	0.0
	Tubería pvc	2"	15	4.0	m	60.0
		4"			m	0.0
	Accesorios	"T", codos, etc.			pza	0.0
		reducción			pza	0.0
		Válvula			pza	0.0
		Bomba	2635	2.0	pza	5270.0
	Impermeabilizan	Geomembrana	55	56.7	m ²	3116.7
		Canales construidos		33.3	m	0.0
		Contenedores plásticos			pza	0.0
		Contenedores concreto			pza	0.0
Almacenamiento de agua	de almacenamiento de agua res	4000	2.5	m ³	10000.0	
	de almacenamiento de agua tra	4000	1.3	m ³	5000.0	
Mano de obra	Excavación	100	33.3	m	3333.3	
	Construcción de canales		33.3	m	0.0	
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua res	100	1.0	pza	100.0	
	Instalación de tanque de almacenamiento de agua tra	100	1.0	pza	100.0	
	Instalación de tubería de conexión del sistema (entra	100	1.0	pza	100.0	
	Instalación de tubería de conexión del sistema (sali	100	1.0	pza	100.0	
	Extracción de rizomas	100	3.3	jornal	333.3	
	Plantación de rizomas	100	3.3	jornal	333.3	
	Instalación de bomba	100	2.0	pza	200.0	
	TOTAL					29046.7

Para el cálculo de costos del ejemplo se utilizaron como datos el ancho del canal, volumen de agua residual generada y los precios unitarios de los componentes del SHBV-III, los cuales se muestran en color rojo en la figura A3.10. Los valores en negro son los determinados por la hoja de cálculo.

Se determinó el costo de un SHBV-I, para 5 personas y con un valor de 0.4 m de ancho del canal. Al igual que en el anterior, también se requirieron los datos de precios unitarios de los componentes (se muestran en color rojo en la fig. A3.11)

Figura A3.11: Ejemplo de determinación del costo del SHBV-I para 5 habitantes.

J29							
A	B	C	D	E	F	G	
1	Dimensionamiento empleando número de habitantes						
2							
3		Tipo de sistema	SHBV-I				
4	DATOS	Número de habitantes	5				
5		Ancho del canal (m)	0.4				
6		Longitud del canal (m)	20.8				
7							
8	Categoría	Descripción	P.U.	Cantidad	Unidad	Total (\$)	
9	Materiales	Sustrato	Arena		5.0	m ³	0.0
10			Grava		5.0	m ³	0.0
11			Tezontle		5.0	m ³	0.0
12			Tepojal	100	5.0	m ³	500.0
13	Tubería pvc	2"			pza	0.0	
14		4"			pza	0.0	
15	Accesorios pvc	"T", codos, etc.			pza	0.0	
16		Reducción			pza	0.0	
17		Válvula			pza	0.0	
18		Bomba			pza	0.0	
19	Impermeabilizan	Geomembrana		35.4	m ²	0.0	
20		Canales construidos		20.8	m	0.0	
21		Contenedores plásticos			pza	0.0	
22		Contenedores concreto			pza	0.0	
23	Almacenamiento de agua	Almacenamiento de agua residual		1.3	m ³	0.0	
24		Almacenamiento de agua tratada		0.6	m ³	0.0	
25	Mano de obra	Excavación	100	20.8	m	2083.3	
26		Construcción de canales		20.8	m	0.0	
27		Instalación de tanque de almacenamiento de agua residual			pza	0.0	
28		Instalación de tanque de almacenamiento de agua tratada			pza	0.0	
29		Instalación de tubería de conexión del sistema (entrada)			pza	0.0	
30		Instalación de tubería de conexión del sistema (salida)			pza	0.0	
31		Extracción de rizomas	100	2.1	jornal	208.3	
32		Plantación de rizomas	100	2.1	jornal	208.3	
33	Instalación de bomba			pza	0.0		
34					TOTAL	3000.0	
35							
36							
37							

4. Construcción

Sistema de humedal – barrera verde nivel I (SHBV – I)

El SHBV nivel I está pensado para ser utilizado en zonas rurales, donde las viviendas se encuentran dispersas en áreas relativamente grandes. En la mayoría de estos casos no se cuenta con red de drenaje y alcantarillado, y en muchas ocasiones se hace uso de fosas sépticas y/o la descarga de aguas residuales se realiza directamente en el suelo, o en cuerpos de agua. Aunado a esto, si se trata de población con escasos recursos económicos, las viviendas no cuentan con instalaciones sanitarias básicas como tarjas, lavabos o duchas lo cual lejos de constituir un impedimento, es una oportunidad para la instalación del SHBV, porque permitirá resolver el problema desde la conducción misma del agua residual, es como si se tratara de un edificio nuevo.

En la tabla A3.6 se describen los componentes del SHBV – I y algunas recomendaciones que faciliten su instalación. Asimismo, en la figura A3.12 se esquematiza el SHBV – I, se muestran los componentes, así como los flujos del agua.

Tabla A3.6: Descripción del SHBV – I

<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>	<i>Función</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Línea de alimentación</i>	<i>Tubería de PVC</i>	<i>Alimentación del humedal</i>	<i>Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de estas, obstruye la tubería.</i>
<i>Canal del humedal</i>	<i>Excavación desnuda, (prueba de infiltración), no requiere línea de salida.</i>	<i>Dar tratamiento al agua residual. Riego para las plantas de Arundo donax.</i>	<i>Infiltración \leq 5 mm / h</i>
	<i>Instalación de Geomembrana plástica solo en el caso de que se necesite limitar el crecimiento de las plantas.</i>		<i>Infiltración \geq 6 mm / h</i>
<i>Línea de salida</i>	<i>Tubería de PVC</i>	<i>Salida del humedal</i>	<i>Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de estas, obstruye la tubería.</i>

El SHBV – I funciona por gravedad por lo el canal requiere una pendiente de 2%, para garantizar el tiempo de residencia de 5 días. Por otra parte, si se coloca la geomembrana plástica para limitar el crecimiento de las raíces, se debe instalar una línea de salida, la cual debe tener un nivel ligeramente por debajo de la línea de entrada de tal manera que el agua salga del canal justo cuando alcance dicho nivel (ver figura A3.12) La prueba de infiltración es necesaria para asegurar el flujo del agua y evitar el encharcamiento a la salida del humedal.

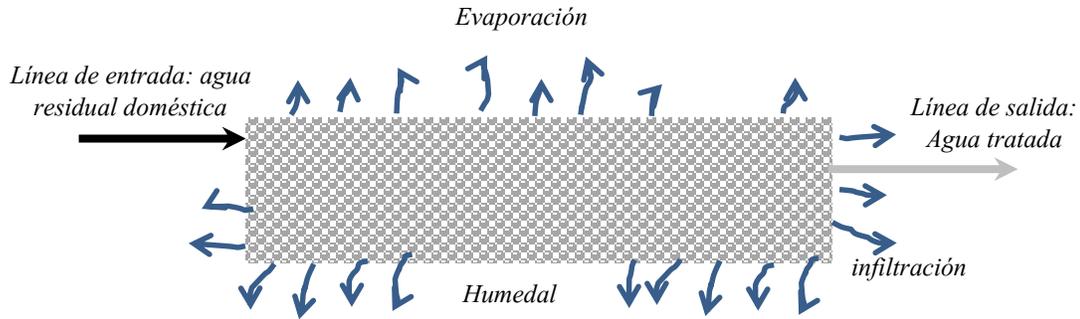


Figura A3.12: esquema del SHBV – I

Como se menciona en la tabla 8.14 se requiere determinar la capacidad de infiltración del suelo donde se colocará el SHBV. Se recomienda una infiltración máxima 5 mm/h, este caso aplica cuando se trate de una excavación desnuda, ya que de esta manera se garantiza el tiempo de residencia de 5 días.

Por el contrario, si se instala la geomembrana plástica, se utiliza un valor mínimo de infiltración de 6 mm / h, para evitar encharcamiento a la salida del sistema, en caso de que no se cuente con esta infiltración, se requerirá la instalación de obras complementarias como zanjas filtrantes. A continuación se describe el procedimiento para realizar la prueba de infiltración.

Procedimiento de prueba de infiltración:

- g) Excavar un hoyo de 0.3 x 0.3 x 0.6 m con paredes verticales (ver figura A3.13).
- h) Raspar las paredes y el fondo del agujero para eliminar las superficies sucias o grasosas que dificulten o impidan la filtración
- i) Colocar en el fondo del agujero 5 cm de arena gruesa o gravilla que servirá de medio filtrante para el agua.
- j) Verter agua hasta una altura aproximada de 0.3 m. En la mayoría de los casos es necesario seguir agregando agua durante un periodo de dos horas hasta que el suelo se haya saturado y el agua no se filtre de manera inmediata.
- k) Medir el tirante inicial.
- l) Dejar el agua durante un periodo de 24 horas y medir el tirante final

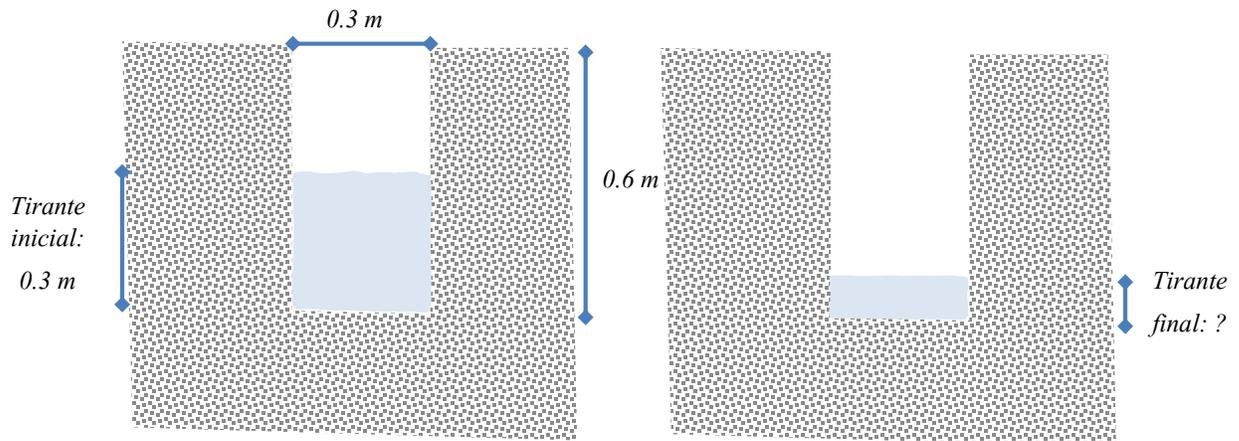


Figura A3.13: Esquema de la prueba de infiltración

Sistema de humedal – barrera verde nivel II: SHBV – II

El SHBV – II se diseñó para un escenario ubicado en el medio denominado **rurbano**, el cual se refiere a la zona de transición entre el medio rural y medio urbano debido al crecimiento desordenado de las periferias de las ciudades. También se encuentran en este caso las poblaciones rurales que poco a poco han ido migrando a convertirse en pequeñas “ciudades”. En nuestro país existe una gran cantidad de comunidades con estas características. En este tipo de medio, la densidad de población y por lo tanto la densidad de edificaciones es mayor que en el medio rural, por lo que la disponibilidad de área se reduce y en algunos casos, se puede presentar hacinamiento. Sin embargo, todavía se encuentran casas “unifamiliares”, y la mayoría de estas cuentan con cierta independencia de las viviendas vecinas.

En la tabla A3.7 se describen los componentes del SHBV – II diseñado para ser implementado en sitios con dichas características. También se hacen recomendaciones que faciliten su instalación y operación. En este caso no se requiere prueba de infiltración debido a que la línea de salida se conecta con el sistema de drenaje y alcantarillado. Sin embargo, debido a la presencia de tubería resulta indispensable evitar que el crecimiento de las raíces adentro de las mismas provoque taponamientos, por lo que es muy importante que la profundidad de las raíces no sea la misma que la profundidad de las tuberías.

Tabla A3.7: Componentes del SHBV – II

Componente	Descripción	Función	Recomendaciones
Línea de alimentación	Tubería de PVC	Alimentación del humedal.	Se debe instalar de manera superficial, ya que si se encuentra en el mismo nivel que las raíces, el crecimiento de estas, obstruye la tubería.
Canal del humedal	Excavación impermeabilizada	Dar tratamiento al agua residual. Riego para las plantas de <u>Arundo donax</u> .	Las dimensiones deben ser calculadas como se indica en el inciso 4.5
Impermeabilizante	Instalación de Geomembrana plástica o construcción del canal con concreto y acabado impermeable	Impedir la infiltración limitar el crecimiento de las plantas.	A selección del material impermeabilizante dependerá de la disponibilidad de recursos materiales y económicos.
Línea de salida	Tubería de PVC	Enviar el agua tratada al sistema de drenaje y alcantarillado	Debe tomarse en cuenta la evapotranspiración del lugar para determinar el volumen de salida y el diámetro de la tubería

La cantidad de agua tratada que se obtenga estará en función del clima. Si el sistema se instala en un clima cálido seco, una gran parte del volumen de agua será evapotranspirado, por lo que en la línea de salida se obtendrá un volumen mínimo de agua tratada, en estos casos se puede prescindir de la línea de salida. Para los demás tipos de clima, si se requiere la línea de salida. En la figura A3.14 se muestra el esquema del SHBV – II.

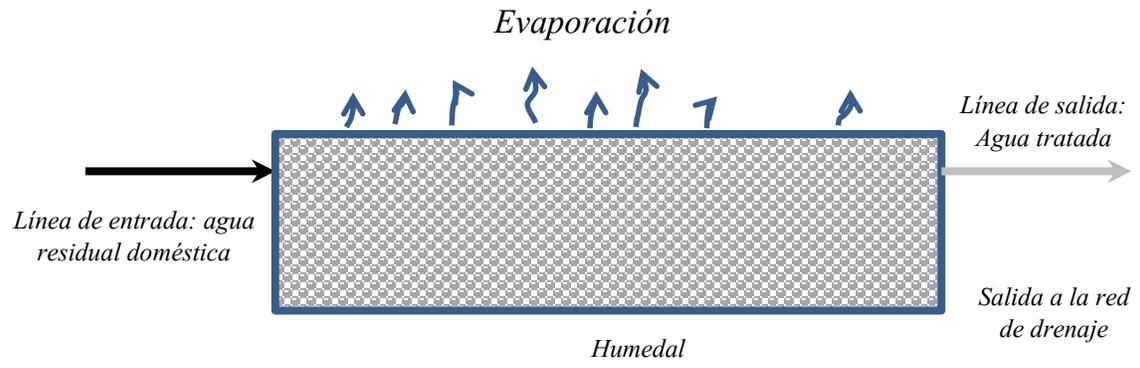


Figura A3.14: Esquema del SHBV - II

Sistema de humedal – barrera verde nivel III: SHBV – III

El SHBV – III está pensado para implementarlo en el medio completamente urbanizado, donde la densidad de edificios es muy alta. Las principales características de estos sitios relacionadas con este tema son:

- e) Elevado costo del terreno, lo que ocasiona baja o nula disponibilidad de área para instalaciones de este tipo.*
- f) Suelo construido o pavimentado, que elimina toda posibilidad de espacios de infiltración o áreas verdes.*
- g) Edificios de viviendas multifamiliares*
- h) Viviendas unifamiliares de dimensiones muy pequeñas.*

Derivado de lo anterior, surge la necesidad de proponer un sistema más tecnificado que se adapte a la infraestructura tanto urbana como de cada edificio. La adición de estos elementos por supuesto que repercute en el costo del sistema, sin embargo, aun así se trata de un sistema con costos relativamente bajos, además de que el SHBV – III puede contribuir al ahorro de energía empleada en la climatización del edificio. En la tabla A3.8 se incluyen los componentes del SHBV – III, con su descripción, función, y recomendaciones.

Tabla A3.8: Componentes del SHBV – III

<i>Componente</i>	<i>Descripción</i>	<i>Función</i>	<i>Recomendaciones</i>
<i>Tanque ecualizador</i>	<i>Tanque de polietileno de alta densidad.</i>	<i>Almacenamiento del agua residual gris</i>	<i>Su instalación en un nivel más elevado que el canal del humedal permite su funcionamiento por gravedad</i>
<i>Línea de alimentación</i>	<i>Tubería de PVC sanitario</i>	<i>Alimentación del tanque ecualizador</i>	
<i>Válvula de alimentación</i>	<i>Válvula de PVC</i>	<i>Controlar la alimentación del humedal</i>	
<i>Canal del humedal con impermeabilizante</i>	<i>Excavación y construcción del canal con concreto o forrado con Geomembrana plástica. También pueden usarse Contenedores prefabricados, enterrados o colocados en la superficie.</i>	<i>Dar tratamiento al agua residual. Riego para las plantas de <u>Arundo donax</u>. Limitar el desarrollo de las plantas</i>	
<i>Válvula de salida</i>	<i>Válvula de PVC</i>	<i>Controlar el tiempo de residencia del humedal</i>	
<i>Bomba</i>	<i>Se puede colocar bomba en:</i> - <i>La entrada del humedal</i> - <i>La salida del tanque de almacenamiento de agua tratada</i>	<i>Enviar el agua al siguiente paso del sistema</i>	<i>Se recomienda evitar el uso de bombas y en la medida de lo posible operar el sistema por gravedad</i>
<i>Tanque de almacenamiento</i>	<i>Tanque de polietileno de alta densidad.</i>	<i>Almacenamiento de agua tratada</i>	

El SHBV – III al inicio cuenta con un tanque ecualizador que permite amortiguar los picos de generación de agua residual que ocurren en los horarios de mayor uso del agua, los cuales generalmente son por la mañana y por la noche, antes de que las personas salgan de casa y a su regreso, y los fines de semana cuando se realizan actividades de limpieza y lavado de ropa. Las válvulas permitirán controlar la entrada del agua residual al canal del humedal y la salida del agua tratada al finalizar el tiempo de residencia. En la salida se pueden instalar dos opciones, la primera que permitirá almacenar el agua tratada para su uso posterior, y la segunda que descargue directamente al sistema de drenaje y alcantarillado. Pueden instalarse ambas o solamente una, la que cumpla mejor con las necesidades de cada caso.

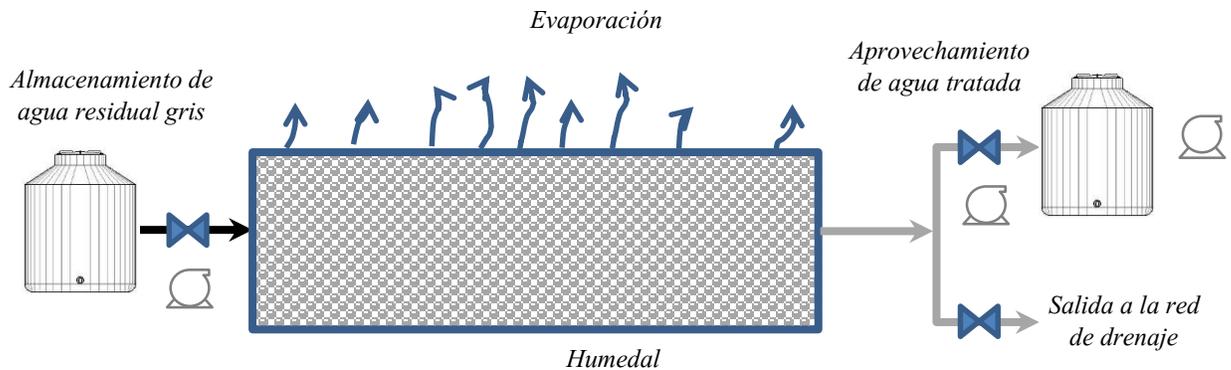


Figura A3.15: esquema del SHBV – III

El diseño original del SHBV está pensado para que opere por gravedad, sin embargo, cuando existen limitaciones de espacio, frecuentemente esto no es posible. Por tal motivo en esta versión, se incluyen bombas que pueden sustituir a las válvulas (ver figura A3.15), cuando la instalación se encuentre en diferentes niveles, sobre todo cuando exista la necesidad de colocar los tanques de almacenamiento enterrados y se requiera bombear el agua para que alcance el nivel del humedal o bombear el agua tratada a un tanque de almacenamiento elevado.

Por supuesto que la inclusión de este tipo de equipos tiene un costo, que se refleja tanto en la inversión inicial como en la operación del SHBV, al mismo tiempo que repercute en la sustentabilidad del sistema. Sin embargo, se incluyeron con la finalidad de ampliar las posibilidades de uso del SHBV.

5. Mantenimiento

La poda de la barrera verde representa la principal operación de mantenimiento que requiere el SHBV. Como se describió previamente, el *Arundo donax* tiene una de las productividades de biomasa más elevadas del mundo, lo cual puede ocasionar un crecimiento excesivo que se salga de control. Por tal motivo, se recomienda realizar podas regulares para mantener la forma de la barrera verde y la altura recomendada. La poda se puede realizar con herramientas comunes, y no se requieren técnicas específicas de poda. Si el corte se realiza al ras del suelo eliminando por completo los tallos, estos brotarán nuevamente en un periodo corto de tiempo, dependiendo del clima. Si el corte se realiza a una altura desde la base, los tallos se secarán, pero pueden brotarles nuevos retoños, los cuales serán más delgados y múltiples, lo que a su vez provocará mayor volumen en la parte superior de la barrera verde. Por tal motivo se recomienda un corte al ras que permita la renovación de los tallos completos (ver figura A3.16).

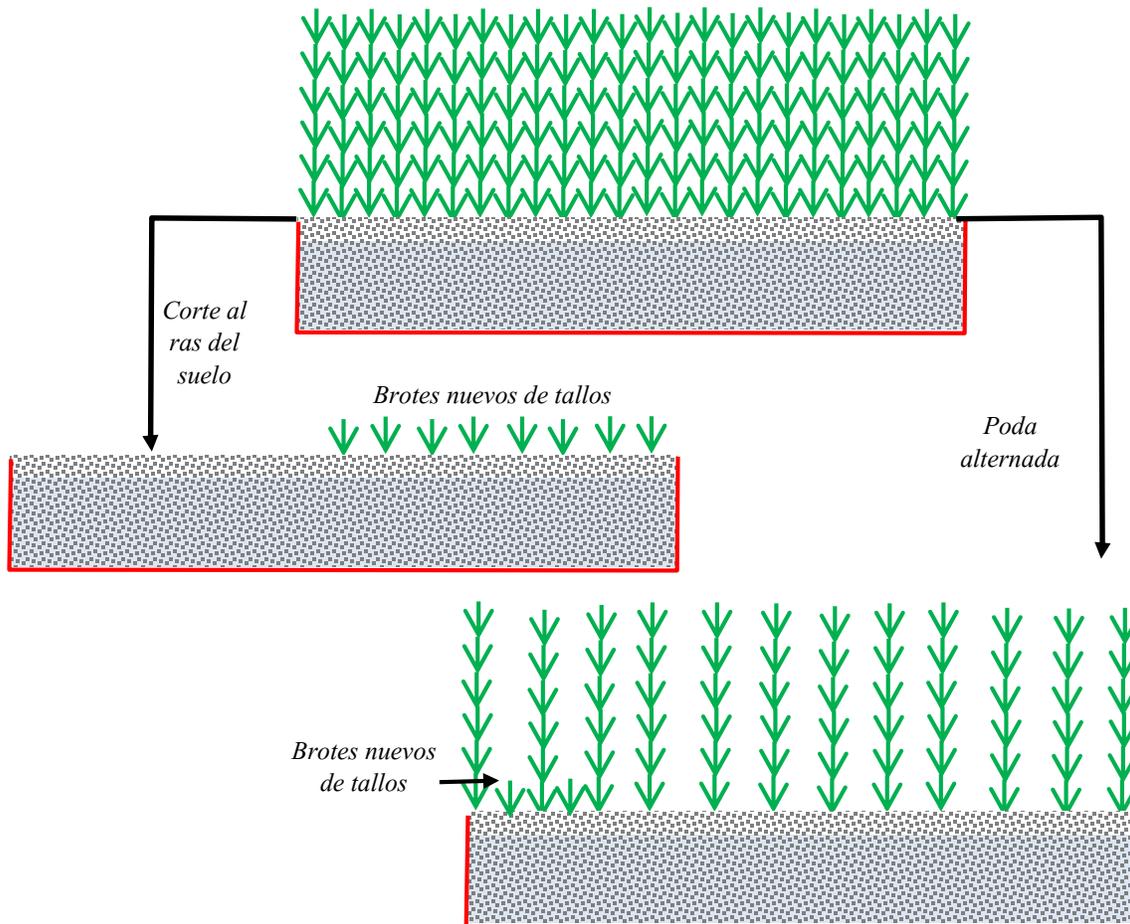


Figura A3.16: Esquema de los resultados obtenidos con los dos tipos de poda recomendados

Este tipo de poda garantiza mantener el color verde de la barrera, ya que los tallos de dos o más años de edad adquieren una coloración amarillenta debida a que las hojas secas que van recubriendo el tallo, manteniendo verde solo la parte superior del mismo.

Para climas templados y fríos se recomienda realizar una poda total al inicio de la temporada invernal. Para el caso de climas cálidos se recomienda una poda alternada de tal manera que en ningún momento quede desprovisto de vegetación.

11 REFERENCIAS

<p>Abad-Berjon M, Noguera-Murray P, Carrión-Benedito C. Los sustratos en los cultivos sin suelo. En: Urrestarazu-Gavilán. Cultivo sin suelo. Madrid: Mundi Prensa, 2004. 113-158.</p>
<p>Abud, Y. C., Trujillo, M. M., Gómez, M. S., & Castro, R. O. (2013). Efecto del cobre en el crecimiento y la arquitectura de la raíz de <i>Arabidopsis thaliana</i> L. <i>Biológicas Revista de la DES Ciencias Biológico Agropecuarias Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo</i>, 11(1), 122-131.</p>
<p>Aguilar-Dubose, Delgado Castillo, (2011) <i>Diseño y construcción sostenibles: realidad ineludible</i>. Universidad Iberoamericana. México</p>
<p>Agencia Internacional de Energía. <i>Energy Balances of OECD Countries</i>, International Energy Agency, Ed. 2011, Francia.</p>
<p>Ángeles V., (2002). <i>Diseño agronómico de sistemas de riego presurizado</i>, p. 64, México: Edit. Universidad Autónoma de Chapingo</p>
<p>Angelini LG, Ceccarini L, Nassi o Di Nasso N, Bonari E. 2009. Comparison of <i>Arundo donax</i> and <i>Miscanthus giganteus</i> in a long-term field experiment in Central Italy: Analysis of productive characteristics and energy balance. <i>Biomass Bioenerg</i> 33: 635–643</p>
<p>Arena, A. P. (2005). <i>Análisis de Ciclo de Vida y sustentabilidad ambiental de los edificios. Experiencias en Argentina. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda. Cricyt (Mendoza), Argentina.</i></p>
<p>Arenas, Jorge. P. <i>Diseño de Barreras Acústicas: Solución al Impacto del Ruido Generado por Carreteras</i>. http://www.socha.cl/wp-content/uploads/2013/06/05_JArenas_1996.pdf</p>
<p>Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., Álvaro, J. E., ... & Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. <i>Applied Acoustics</i>, 89, 46-56. http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010</p>
<p>Barbagallo, A. C. Barbera, G. L. Cirelli, M. Milani and A. Toscano (2014) Reuse of constructed wetland effluents for irrigation of energy crops <i>Water Science & Technology</i> 70.9 2014</p>
<p>Barreca (2012) Use of giant reed <i>Arundo Donax</i> L. in rural constructions September, <i>Agric Eng Int: CIGR Journal</i> Open access at http://www.cigrjournal.org Vol. 14, No.3 http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio_aparatos</p>
<p>Benavides A. (2003) <i>Fotosíntesis: Diferencias en las vías metabólicas C3, C4 y CAM</i>. http://www.exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Fotosintesis%20C3,C4%20y%20CAM.pdf.</p>
<p>Bernal, D. P., Cardona, D. A., Galvis, A., & Peña, M. (2003). <i>Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales. Seminario internacional de métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales</i>, 19-27.</p>
<p>Bernal F. Ibargüengoitia D. (2011) <i>Confort Ecológico. Diseño y construcción sostenibles</i>. Universidad Iberoamericana.</p>

<p>Black, C.C. 1986. <i>Effects of CO₂ Concentration on Photosynthesis and Respiration of C₄ and CAM Plants</i>. In: H.Z. Enoch and B.A. Kimball (Eds.). <i>Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops. Volume II. Physiology, Yield, and Economics</i>. CRC Press, Inc. Boca Raton, Fla. USA. pp. 29-40.</p>
<p>Burés S. <i>Sustratos</i>. Madrid: Ediciones Agrotécnicas, 1997. 342.</p>
<p>Cameron, R. W., Taylor, J. E., & Emmett, M. R. (2014). What's 'cool' in the world of green façades? How plant choice influences the cooling properties of green walls. <i>Building and Environment</i>, 73, 198-207.</p>
<p>Campillo, L. M. M., & Sena, R. D. T. (2013) <i>Las fachadas verdes como herramienta pasiva de ahorro energético en el bloque administrativo de la Universidad Pontificia Bolivariana, seccional Montería</i>. <i>dearq</i> 13. Diciembre de 2013. ISSN 2011-3188. Bogotá, pp. 140-149. http://dearq.uniandes.edu.co</p>
<p>CDHCU (2016). <i>Ley de Aguas Nacionales</i>. México DOF 24-03-2016 http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/16_240316.pdf</p>
<p>CDHCU (2012). <i>Ley General de Cambio climático</i>. México DOF 06-06-2012 http://www.inecc.gob.mx/descargas/2012_lgcc.pdf</p>
<p>CDHCU (2015). <i>Ley General Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente</i>. México.DOF: 09/01/2015 http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/148.pdf</p>
<p>CDHCU (2015). <i>Ley de Transición Energética</i>. México DOF 24-12-2015 http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/abro/lase/LASE_abro_24dic15.pdf</p>
<p>CDHCU (2017). <i>Reglamento de la ley de la Transición Energética</i>. México. DOF: 04/05/2017 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5481526&fecha=04/05/2017</p>
<p>CDHCU (2014). <i>Reglamento de la ley de aguas nacionales</i>. México. DOF: 25/08/2014 http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/reglev/Reg_LAN_250814.pdf</p>
<p>CDHCU (2014). <i>Reglamento de la ley general de cambio climático en materia del registro nacional de emisiones</i>. México. DOF: 28/10/2014 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5365828&fecha=28/10/2014</p>
<p>CDHCU (1982). <i>Reglamento para la Protección al Ambiente contra la Contaminación Originada por la Emisión de Ruido de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente</i>. México. DOF: 06/12/1982 http://centro.paot.org.mx/centro/reglamentos/fed/pdf/2014/RGTO_CONTAMINACION_RUIDO_08_12_1982.pdf</p>
<p>Ceotto E, Di Candilo M. 2010. Shoot cuttings propagation of giant reed (<i>Arundo donax</i> L.) in water and moist soil: The path forward? <i>Biomass Bioenerg</i> 34: 1614–1623.</p>
<p>Chang, J. J., Wu, S. Q., Dai, Y. R., Liang, W., & Wu, Z. B. (2012). Treatment performance of integrated vertical-flow constructed wetland plots for domestic wastewater. <i>Ecological engineering</i>, 44, 152-159.</p>
<p>Cheng, C. Y., Cheung, K. K., & Chu, L. M. (2010). Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. <i>Building and environment</i>, 45(8), 1779-1787. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.005</p>
<p>Chen, Q., Li, B., & Liu, X. (2013). An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. <i>Energy and Buildings</i>, 61, 298-307. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.030</p>

<p>Chiarawatchai, M. Heers and R. Otterpohl (2012) <i>Criteria for determining alternative plants to improve the resource recovery efficiency in constructed wetlands</i> <i>Water Science & Technology—WST</i> 58.8 2008</p>
<p>Coma, J., Pérez, G., de Gracia, A., Burés, S., Urrestarazu, M., & Cabeza, L. F. (2017). <i>Vertical greenery systems for energy savings in buildings: A comparative study between green walls and green facades</i>. <i>Building and Environment</i>, 111, 228-237. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.014</p>
<p>Conabio Canuto (<i>Arundo donax</i>) Enciclovida http://bios.conabio.gob.mx/especies/6038564</p>
<p>CONAGUA (2014). <i>Reporte del clima en México. Reporte anual 2014. Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional Gerencia de Meteorología y Climatología Subgerencia de Pronóstico a Mediano y Largo Plazo</i>. http://smn.cna.gob.mx/climatologia/analisis/reportes/Anual2014.pdf</p>
<p>Cruz-Crespo E*, Can-Chulim A, Sandoval-Villa M, Bugarín-Montoya R, Robles-Bermúdez A, Juárez-López P, <i>SUSTRATOS EN LA HORTICULTURA</i> Revista Bio Ciencias Enero 2013 ISSN 2007-3380 2 (2): 17-26</p>
<p>Cuce, E. (2016). <i>Thermal regulation impact of green walls: An experimental and numerical investigation</i>. <i>Applied Energy</i>. http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.079</p>
<p>Cundy, C. S., & Cox, P. A. (2005). <i>The hydrothermal synthesis of zeolites: Precursors, intermediates and reaction mechanism</i>. <i>Microporous and Mesoporous Materials</i>, 82(1), 1-78.</p>
<p>Daltrop, S., Hodgson, M., & Wakefield, C. (2012). <i>Field investigation of the effects of vegetation on the performance of roadside noise barriers</i>. <i>Noise Control Engineering Journal</i>, 60(2), 202-208. DOI: http://dx.doi.org/10.3397/1.3693109</p>
<p>d'Amico, F. C. (2014). <i>Arquitectura bioclimática, conceptos básicos y panorama actual</i>. <i>Boletín CF+ S</i>, (14).</p>
<p>De Garrido L. (2014) <i>Arquitectura Bioclimática Extrema</i>, Instituto Mosa de Ediciones ISBN 978-84-15829-55-3</p>
<p>Delgadillo, O. (2010). <i>Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales</i>. Nelson Antequera.</p>
<p>Deltoro Torró, V. Jiménez Ruiz, J & Villán Fragueiro X. M. (2012). <i>BASES PARA EL MANEJO Y CONTROL DE Arundo donax</i>. http://www.mapama.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/red-parques-nacionales/Bases_para_el_manejo_y_control_de_Arundo_donax_tcm7-326547.pdf</p>
<p>Dirección general de normas, Normas mexicanas. NMX-F-083-1986. Alimentos. <i>Determinación de humedad en productos alimenticios</i>. Foods. <i>Moisture in food products determination</i>. http://www.colpos.mx/bancodenormas/nmexicanas/NMX-F-428-1982.PDF</p>
<p>EPA - REGION 6 GUIA PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO CON FLUJOS SUBSUPERFICIALES http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey%3D40001CXS.TXT</p>
<p>FAO/LEAD. 2007. <i>Livestock's long shadow. Environmental issues and options</i>. Rome. Disponible en : http://www.fao.org/docrep/010/a0701e/a0701e00.HTM</p>
<p>Fernández, J. (2000) <i>Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitas en flotación</i>. Coordinada per Jesús Fernández González. Proyecto Life. <i>Amb disponibilitat en pdf a Internet</i>: http://www.macrophytes.info/documentacion/, 2000.</p>

<p>Fernández D. S., M. R. Martínez, M. L. Ramírez (2009) <i>PRÁCTICAS VEGETATIVAS Y AGRONÓMICAS COMPLEMENTARIAS AL PROYECTO INTEGRAL</i>, Colegio de Posgraduados SAGARPA, SUBSECRETARÍA DE DESARROLLO RURAL DIRECCIÓN GENERAL DE APOYOS PARA DESARROLLO RURAL, Texcoco, Estado de México. <i>Prácticas vegetativas y agronómicas.pdf</i></p>
<p>Flores J., Prado A, Domínguez A. L., Mendoza R., González A. (2008) <i>El CARRIZO GIGANTE, ESPECIE INVASORA DE ECOSISTEMAS RIPARIOS BIODIVERSITAS NÚM. 81 NOVIEMBRE-DICIEMBRE DE 2008</i> ISSN: 1870-1760</p>
<p>Fuentes Freixanet <i>Arquitectura pasiva Diseño y construcción sostenibles: realidad ineludible IBERO</i></p>
<p>Galeana-Pizaña, J., Benjamín Ordóñez-Díaz, J. A., & Corona-Romero, N. (2013). <i>Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. Madera Y Bosques, 19(1), 53-69.</i></p>
<p>Garrido L. (2014), <i>Arquitectura Bioclimática Extrema</i>, p.19, Barcelona: MONSA</p>
<p>GEM (2007). <i>Reglamento del Libro Segundo del Código de la Biodiversidad del Estado de México. México. Gaceta de Gobierno 22/05/2007.</i> http://legislacion.edomex.gob.mx/sites/legislacion.edomex.gob.mx/files/files/pdf/rgl/vig/rglvig109.pdf</p>
<p>Giani Alejandro (2013) <i>Acústica arquitectónica – Bogota, Ediciones de la U, pp 37</i></p>
<p>Gonzalez, N., Javier, F., Bedoya Frutos, C., Roman, A., Ana, C., Olivieri, F., & Barbero, M. (2008). <i>Las cubiertas ecológicas de tercera generación: un nuevo material constructivo-The ecological rooftfs of third generation: an new constructive material. Informes de la Construcción, 60(511), 15-24.</i></p>
<p>Haro Elba T. DE CUBIERTAS, C. D. D. T., & SUB-HÚMEDOS, C. Á. L. I. D. O. (2009). <i>Maestría en Arquitectura. http://digeset.ucol.mx/tesis_posgrado/Pdf/HARO_CARBAJAL_ELBA_TERESA.pdf</i></p>
<p>Haggag, M., Hassan, A., & Elmasry, S. (2014). <i>Experimental study on reduced heat gain through green facades in a high heat load climate. Energy and Buildings, 82, 668-674. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.087</i></p>
<p>Hoelscher, M. T., Nehls, T., Jänicke, B., & Wessolek, G. (2016). <i>Quantifying cooling effects of facade greening: shading, transpiration and insulation. Energy and Buildings, 114, 283-290. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.047</i></p>
<p>http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=P%C3%A9rez%2C+D.+F.%2C+Barbosa%2C+R.+G.%2C+Garc%C3%ADa%2C+J.+%C3%81.+F.%2C+Bouchot%2C+M.+E.%2C+%26+Cadena%2C+L.+E.+S.+Remoci%C3%B3n+de+nitr%C3%B3geno+y+f%C3%B3sforo+de+aguas+residuales+dom%C3%A9sticas+mediante+humedales+artificiales.+&btnG=&lr= fecha de consulta: 29/04/2014</p>
<p>http://www.ciencias-marinas.uvigo.es/bibliografia_ambiental/outros/Manual%20de%20fitodepuracion/Capitulos%201%20a%202.pdf</p>
<p>http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/typhaceae/typha-domingensis/fichas/ficha.ht, Heike Vibrans (ed.), Última modificación: 13 de agosto de 2009, <i>Malezas de México, ficha - Typha domingensis Pers.</i>, fecha de acceso 21/03/2014</p>
<p>http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/6153/2/estadisticas_indicadores_energia.pdf</p>
<p>http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/espacio_aparatos Secretaría de energía. Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE). <i>Aparatos y espacios que consumen más energía.</i>, fecha de acceso 02/04/2014</p>

http://www.mapama.gob.es/gl/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/arundo_donax_tcm10-21507.pdf
Huelsz, G., Ochoa, J. M., Elías-López, P., Gómez, A., & Figueroa, A. (2011). Uso de sistemas pasivos de climatización en cinco zonas de la República Mexicana. <i>Memorias de la XXXV Reunión Nacional de Energía Solar, ANES, Chihuahua, Chi</i> , 1-6.
Idris, S. M., Jones, P. L., Salzman, S. A., & Allinson, G. (2012). Performance of the giant reed (<i>Arundo donax</i>) in experimental wetlands receiving variable loads of industrial stormwater. <i>Water, Air, & Soil Pollution</i> , 223(2), 549-557.
INECC. 2009. Consumo energético por aire acondicionado http://vivienda.inecc.gob.mx/index.php/energia/los-usos-en-el-hogar/climatizacion-y-a-acondicionado
Ipcc (2007). Cuarto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
Jaramillo, A. M. (2007). <i>Acústica: la ciencia del sonido</i> . Instituto Tecnológico Metropolitano. Medellín Colombia pp. 28-29 https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=HMWtf1RT04kC&oi=fnd&pg=PA14&dq=decibeles+A&ots=MOHwzHAGaR&sig=wHLEg6S1v68pnlgl3CNEOllsIE#v=onepage&q=decibeles%20A&f=false
Jaramillo-Gallego, M. L., Agudelo-Cadavid, R. M., & Peñuela-Mesa, G. A. (2016). Optimización del tratamiento de aguas residuales de cultivos de flores usando humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. <i>Revista Facultad Nacional De Salud Pública</i> , 34(1), 20-29. doi:10.17533/udea.rfnsp.v34n1a03
Koc, C. B., Osmond, P., & Peters, A. (2016). Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods and typologies. <i>Urban Ecosystems</i> , 1-21. DOI: 10.1007/s11252-016-0578-5
Koyama, T., Yoshinaga, M., Maeda, K. I., & Yamauchi, A. (2014). Room temperature reductions in relation to growth traits of kudzu vine (<i>Pueraria lobata</i>): Experimental quantification. <i>Ecological Engineering</i> , 70, 217-226. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.05.026
Koyama, T., Yoshinaga, M., Maeda, K. I., & Yamauchi, A. (2015). Transpiration cooling effect of climber greenwall with an air gap on indoor thermal environment. DOI:10.1016/j.ecoleng.2015.06.015
Lara, J. A. (1999). <i>Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Trabajo final de maestría</i> . Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
Lewandowski I, Scurlock JMO, Lindvall E, Christou M. 2003. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. <i>Biomass Bioenergy</i> 25: 335–361.
López Alegría Pedro (1994) <i>Abastecimiento de agua potable y disposición y eliminación de excretas</i> . Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
Li, H. N., Chau, C. K., & Tang, S. K. (2010). Can surrounding greenery reduce noise annoyance at home?. <i>Science of the total environment</i> , 408(20), 4376-4384.
Mariani, R. Cabrini, A. Danin, P. Piffanelli, A. Fricano, S. Gomasasca, M. Dicandilo, F. Grassi & C. Soave (2010) Origin, diffusion and reproduction of the giant reed (<i>Arundo donax</i> L.): a promising weedy energy crop <i>Annals of Applied Biology</i> ISSN 0003-4746, 157 191–202

<p>Mavrogianopoulos, G.; Vogli, V.; Kyritsis, S. (2002) Use of wastewater as a nutrient solution in a closed gravel hydroponic culture of giant reed (<i>Arundo donax</i>). <i>Bioresource Technology</i>. Apr, Vol. 82 Issue 2, p103. 5p.</p>
<p>Miyara, F. (2000). Control de ruido. <i>Jornadas Internacionales Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica</i>". Editorial ASOLOFAL. Rosario, Argentina. pp. 7-12 http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/35194464/235127064-73414182-Control-de-Ruido-Federico-Miyara.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1490659261&Signature=BpBah9gvbSDLsb6yhzPErQVQRWo%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3D235127064-73414182-Control-de-Ruido-Fede.pdf</p>
<p>Molina, A. D. C. M. Proyecto: "EDIFICACIÓN SUSTENTABLE PARA LA CIUDAD DE MÉXICO. Eficiencia energética en los edificios para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero".</p>
<p>Norma ambiental para el distrito federal, NADF-005-AMBT-2013, que establece las condiciones de medición los límites máximos permisibles de emisiones sonoras, que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras ubicadas en el distrito federal</p>
<p>Nair, J. (2008). Wastewater garden—a system to treat wastewater with environmental benefits to community. <i>Water science and technology</i>, 58(2), 413-418.</p>
<p>Nsanganwimana, F., Marchand, L., Douay, F., & Mench, M. (2014). <i>Arundo donax L., a Candidate for Phytomanaging Water and Soils Contaminated by Trace Elements and Producing Plant-Based Feedstock. A Review. International Journal Of Phytoremediation</i>, 16(10), 982-1017. doi:10.1080/15226514.2013.810580</p>
<p>Ochoa de la Torre, J. M. (1999). <i>La vegetación como instrumento para el control microclimático. (Disertación Doctoral)</i>. Universitat Politècnica de Catalunya, España.</p>
<p>Odon de Buen. Eficiencia energética y energías renovables en la vivienda en México: Un Repaso Odón de Buen Junio de 2011 http://mexiko.ahk.de/fileadmin/ahk_mexiko/news_bilder/9_ENTE_Ing._Odon_de_Buen.pdf</p>
<p>Olalla, E. P. (1994). LAS PANTALLAS ANTIRRUIDO Y SUS PRESTACIONES. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1995/1995_enero_3339_05.pdf</p>
<p>Olivieri, F., Olivieri, L., & Neila, J. (2014). Experimental study of the thermal-energy performance of an insulated vegetal façade under summer conditions in a continental mediterranean climate. <i>Building and Environment</i>, 77, 61-76. doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.019</p>
<p>Otálora Rodríguez, A. P. (2011). <i>Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl/Evaluation system for domestic wastewater treatment by means of artificial wetlands of the high rate at the Caño Gandul oil location area (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia)</i>.</p>
<p>PAOT (2016) Reporte interactivo de la Procuraduría Ambiental y de ordenamiento Territorial dela Ciudad de México http://www.paot.org.mx/contenidos_graficas/delegaciones/reporte_completo.php</p>
<p>Pathak, V., Tripathi, B. D., & Mishra, V. K. (2008). Dynamics of traffic noise in a tropical city Varanasi and its abatement through vegetation. <i>Environmental monitoring and Assessment</i>, 146(1-3), 67-75. DOI: 10.1007/s10661-007-0060-1</p>
<p>Penichet Castillejo, M. (2011). <i>El potencial de la refrigeración evaporativa como estrategia bioclimática pasiva</i>.</p>

<p>Peña Varón, M. R., Van Ginneken, M., & Madera P., C. A. (2003). <i>Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. Ingeniería Y Competitividad, 5(1), 27-35</i></p>
<p>Pérez, G., Coma, J., Barreneche, C., de Gracia, A., Urrestarazu, M., Burés, S., & Cabez, L. F. (2016). <i>Acoustic insulation capacity of Vertical Greenery Systems for buildings. Applied Acoustics, 110218-226 DOI: 10.1016/j.apacoust.2016.03.040</i></p>
<p>Pérez, D. F., Barbosa, R. G., García, J. Á. F., Bouchot, M. E., & Cadena, L. E. S. <i>Remoción de nitrógeno y fósforo de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales. http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=P%C3%A9rez%2C+D.+F.%2C+Barbosa%2C+R.+G.%2C+Garc%C3%ADa%2C+J.+%C3%81.+F.%2C+Bouchot%2C+M.+E.%2C+%26+Cadena%2C+L.+E.+S.+Remoci%C3%B3n+de+nitr%C3%B3geno+y+f%C3%B3sforo+de+aguas+residuales+dom%C3%A9sticas+mediante+humedales+artificiales.+&btnG=&lr= fecha de consulta: 29/04/2014</i></p>
<p>Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., & Raiteri, R. (2013). <i>Vertical greening systems, a process tree for green façades and living walls. Urban Ecosystems, 16(2), 265-277. DOI:10.1007/s11252-012-0262-3</i></p>
<p>Posada, M.I., del Pilar Arroyave, M., & Fernández, C. (2009). <i>Influencia de la vegetación en los niveles de ruido urbano. Revista EIA, (12), 79-89</i></p>
<p>Quinn LD, Holt JS. 2008. <i>Ecological correlates of invasion by Arundo donax in three southern California riparian habitats. Biol Invasions 10: 591–601</i></p>
<p>Ramírez (2011) <i>Arquitectura y bioclimática. Diseño y construcción sostenibles: realidad ineludible IBERO</i></p>
<p>Reed, S.C. 1990. <i>Natural systems for Wastewater Treatment, Manual of Practice FD-16, Alexandria, USA: Water Pollution Control Federation</i></p>
<p>Rivas Hernández, A., Ramírez González, A., Balderas Castrejón, J., & García Maldonado, J. G. (2000). <i>Diseño y diagnóstico de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante humedales (wetlands). In Ciencia y conciencia compromiso nacional con el medio ambiente: memorias técnicas (pp. 1-21). FEMISCA.</i></p>
<p>Rodríguez Pérez de Agreda Celia. <i>Humedales construidos. Estado del arte. (II). (2003). Ingeniería Hidráulica y Ambiental, 24(3), 42-48.</i></p>
<p>Romero, M., Colín, A., Sánchez, E., Ortiz, M. (2009). <i>Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, 25, 3, pp. 157-167.</i></p>
<p>Ruiz Vázquez, Silvia González Huesca, (1999) <i>Geología aplicada a la ingeniería, LIMUSA NORIEGA EDITORES, pp 255, México 1999.</i></p>
<p>Sabeen, Qaisar Mahmood, Muhammad Irshad, Iftikhar Fareed, Afsar Khan, Farid Ullah, Jamshaid Hussain, Yousaf Hayat, and Sobia Tabassum (2013) <i>Cadmium Phytoremediation by Arundo donax L. from Contaminated Soil and Water Hindawi Publishing Corporation BioMed Research International Volume 2013, Article ID 324830, 9 pages http://dx.doi.org/10.1155/2013/324830</i></p>
<p>Samara, T., & Tsitsoni, T. (2011). <i>The effects of vegetation on reducing traffic noise from a city ring road. Noise Control Engineering Journal, 59(1), 68-74. DOI: http://dx.doi.org/10.3397/1.3528970</i></p>
<p>Sanz Elorza M., Dana Sánchez E.D. & Sobrino Vesperinas E., eds. 2004. <i>Atlas de las Plantas Alóctonas Invasoras en España. Dirección General para la Biodiversidad. Madrid, 384 pp.</i></p>

SCFI (1980). NMX-AA-003-1980. Aguas residuales.- muestreo. Dirección General de Normas. Norma mexicana. <http://www.anig.org.mx/pqta/pdf/NMX-AA-muestreo.pdf>

SE (2016). NMX-AA-170-SCFI-2014 Certificación de la operación de viveros forestales. Norma Mexicana. DOF: 07/12/2016 http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464460&fecha=07/12/2016

SEMARNAT (1996), NOM-001-SEMARNAT-1996 que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Norma oficial mexicana DOF: 06/01/1997 http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997

SEMARNAT (1996) NOM-002-SEMARNAT-1996: Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Norma oficial mexicana. DOF: 03/06/1998 http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4881304&fecha=03/06/1998

SEMARNAT (1995) NOM-081-SEMARNAT-1994 que establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas y su método de medición. Norma oficial mexicana. DOF: 13/01/1995 <http://www.economia-noms.gob.mx/normas/noms/1995/081-ecol.pdf>

SEMARNAT (2013) Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2010

SENER (2007). NOM-011-ENER-2006. Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo central, paquete o dividido. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Norma oficial mexicana. DOF: 22/06/2007 https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181652/NOM_011_ENER_2006.pdf

SENER (1997). NOM-018-ENER-1997 Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba. Norma oficial mexicana. DOF: 24/10/1997 http://diariooficial.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4898553&fecha=24/10/1997

SENER (2011), NOM-020-ENER-2011 Eficiencia energética en edificaciones.- Envoltente de edificios para uso habitacional. Norma oficial mexicana. DOF: 09/08/2011 http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011

SENER (2017), NOM-021-ENER/SCFI-2008, eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Norma oficial mexicana. DOF: 07/07/2017 <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/242715/NOM-021-ENER-SCFI-2017.pdf>

Sosa y Siem (2004), en el Manual de diseño para edificaciones energéticamente eficientes en el trópico

Stagno B. Cambio Cuántico y transferibilidad. Diseño y construcción sostenibles: realidad ineludible Universidad Iberoamericana. México 2011

Steinmann (2008) FAMILIA GRAMINEAE* SUBFAMILIA ARUNDINOIDEAE flora del bajío y de regiones adyacentes Fascículo 158 noviembre <http://www1.inecol.edu.mx/publicaciones/resumenes/FLOBA/Flora158.pdf>

Swanson, R. (1981). Sample Examination Manual. Tulsa, Oklahoma: AAPG Publication.

Tabassom Safikhani, Aminatuzuhariah Megat Abdullah, Dilshan Remaz Ossen, Mohammad Baharvand (2014) Thermal Impacts of Vertical Greenery Systems Environmental and Climate Technologies 10.1515/rtuect-2014-0007

<p>Tena, A., Liga, A., Pérez, A., & González, F. (2017). Propuesta de mejora de mezclas para producir piezas de mampostería de concreto empleando materiales comúnmente disponibles en el Valle de México. <i>Revista ALCONPAT</i>, 7(1), 36-56.</p>
<p>Toogood Alan (2003) <i>Enciclopedia de la propagación de las plantas</i>. Royal Horticultural Society. Edit. BLUME, Barcelona, Esp.</p>
<p>Maldonado Navia, R. A. (2011). <i>Diseño de obras hidráulicas para riego por gravedad localidad de Cuñapata-municipio de Chuma (Doctoral dissertation)</i>.</p>
<p>Torres Páez, R. J., & Hernández Hidalgo, H. M. (2004). <i>Diseño y construcción de un sonómetro integrador que trabaje con ponderaciones de frecuencia A y C (Doctoral dissertation, Quito: EPN, 2004.)</i>. http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/9212/3/T2365.pdf</p>
<p>Toscano, A., Marzo, A., Milani, M., Cirelli, G. L., & Barbagallo, S. (2015). Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species. <i>Ecological Engineering</i>, 75, 155-160.</p>
<p>Tudi wer, D., & Korjenic, A. (2017). The effect of living wall systems on the thermal resistance of the façade. <i>Energy and Buildings</i>, 135, 10-19. http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.11.023</p>
<p>Tuttolomondo, T., Licata, M., Leto, C., Leone, R., & La Bella, S. (2015). Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with <i>Arundo donax</i> L. and <i>Cyperus alternifolius</i> L. – Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy). <i>Ecological Engineering</i>, 7479-92. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.10.</p>
<p>Tzanakakis, N.V. Paranychianakis and A.N. Angelakis (2007) Performance of slow rate systems for treatment of domestic wastewater <i>Water Science & Technology</i>, Vol. 55 Issue 1/2, p139-147. 9p.</p>
<p>Ugarte. <i>GUIA DE ARQUITECTURA BIOCLIMATICA</i> http://www.arquitecturatropical.org/EDITORIAL/documents/GUIA%20BIOCLIMATICA%201.pdf</p>
<p>Tundrea, H., & Budescu, M. (2013). BIOCLIMATIC ARCHITECTURE, A SENSIBLE AND LOGICAL APPROACH TOWARDS THE FUTURE OF BUILDING DEVELOPMENT. <i>Bulletin Of The Polytechnic Institute Of Iasi - Construction & Architecture Section</i>, 63(6), 109-117.</p>
<p>Van Renterghem, T., Botteldooren, D., & Verheyen, K. (2012). Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth. <i>Journal of Sound and Vibration</i>, 331(10), 2404-2425. http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2012.01.006</p>
<p>Vicente, C. E. G. (2012). El papel de la reforestación en la protección y mejoramiento del ambiente de las zonas urbanas. <i>Revista Mexicana de Ciencias Forestales</i>, 6(32).</p>
<p>Vymazal, (2011) Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: a review <i>Hydrobiologia</i> 674:133–156 DOI 10.1007/s10750-011-0738-9</p>
<p>Williams, C. M. J., Biswas, T. K., Schrale, G., Virtue, J. G., & Heading, S. (2008). Use of saline land and wastewater for growing a potential biofuel crop (<i>Arundo donax</i> L.). In <i>Conference, Melbourne, Australia</i></p>
<p>Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Chen, Y., Sekar, K., Tan, P. Y., Chan, D., ... & Wong, N. C. (2010). Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. <i>Building and environment</i>, 45(3), 663-672. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.005</p>

Yin, H., Kong, F., Middel, A., Dronova, I., Xu, H., & James, P. (2017). Cooling effect of direct green façades during hot summer days: An observational study in Nanjing, China using TIR and 3DPC data. Building and Environment, 116, 195-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.020>

Yang, Hong Seok Kang, Jian Choi, Min Sung (2012) Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. Building & Environment. Apr, Vol. 50, p44-55. 12p.

Yocum, D. (2005). Manual de Diseño: Humedal construido para el tratamiento de las aguas grises por biofiltración. Bren School of Environmental Science and Management, University of California, Santa Barbara.