



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA VEGETAL
DURANTE EL ESTABLECIMIENTO DE UN HUMEDAL
CONSTRUIDO.

T E S I S
PARA OBTENER EL TÍTULO DE
BIÒLOGA
PRESENTA:

NADIA GUADALUPE ESPINOSA FLORES

DIRECTORA DE TESIS

BIÒL. MARICELA ARTEAGA MEJÍA

MÉXICO D.F.

2015





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

"ZARAGOZA"

DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
P R E S E N T E.

Comunico a usted que la alumna **ESPINOSA FLORES NADIA GUADALUPE**, con número de cuenta **408028462**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **14 de abril de 2015**, a las **16:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

- PRESIDENTE** Biól. ELVIA GARCÍA SANTOS
- VOCAL** Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA
- SECRETARIO** M. en C. GERMAN CALVA VÁSQUEZ
- SUPLENTE** Dr. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS
- SUPLENTE** I.C.E. CARLOS ALBERTO SANTANA MARTÍNEZ



El título de la tesis que presenta es: **Crecimiento y producción de biomasa vegetal durante el establecimiento de un humedal construido.**

Opción de titulación: Tesis.

Agradeceré por anticipado su aceptación y hago propia la ocasión para saludarle.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
México, D. F., a 11 de febrero de 2015.

DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
DIRECTOR
ZARAGOZA
DIRECCION

RECIBÍ
OFICINA DE EXÁMENES
PROFESIONALES Y DE GRADO

VO. BO.
M. en C. ARMANDO CERVANTES SANDOVAL
JEFE DE CARRERA

DEDICADO A

Mis papas por estar a mi lado,
creer en mí y apoyarme.

Ma. De la Luz Flores López
por su amor, apapachos, cuidados,
y confianza.

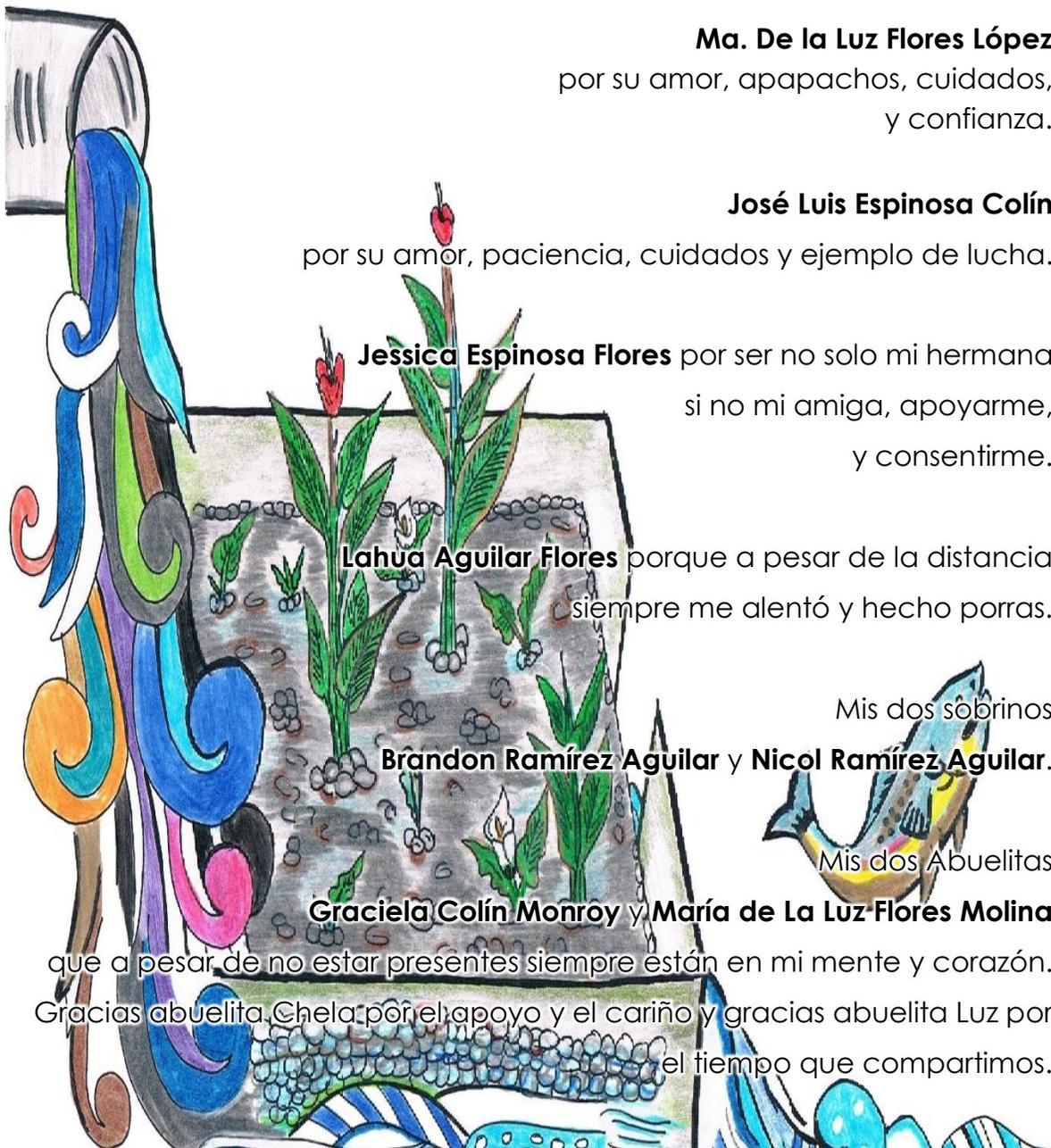
José Luis Espinosa Colín
por su amor, paciencia, cuidados y ejemplo de lucha.

Jessica Espinosa Flores por ser no solo mi hermana
si no mi amiga, apoyarme,
y consentirme.

Lahua Aguilar Flores porque a pesar de la distancia
siempre me alentó y hecho porras.

Brandon Ramírez Aguilar y Nicol Ramírez Aguilar.

Graciela Colín Monroy y María de La Luz Flores Molina
que a pesar de no estar presentes siempre están en mi mente y corazón.
Gracias abuelita Chela por el apoyo y el cariño y gracias abuelita Luz por
el tiempo que compartimos.



Aquellos estudiantes que se tomen el tiempo de leer este trabajo ya sea en su totalidad o parte, esperando que les ayude como a mí a concluir sus estudios.



AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma De México** y a la **Facultad de Estudios Superiores Zaragoza** por darme la oportunidad de formar parte de esta gran institución y así cumplir este sueño.

A los **profesores** de las FES Zaragoza por sus enseñanzas.

Al programa de becas **PRONABES**.

Al personal del campamento Arcoíris por la ayuda y el espacio aportado para llevar a cabo este trabajo.

A mi directora de tesis **Biól. Maricela Arteaga Mejía** por la orientación, tiempo, espacio y apoyo.

A mis sinodales **Biól. Elvia García Santos, M. en C. German Calva Vásquez, Dr. Justo Salvador Hernández Avilés y I.C.E. Carlos Alberto Santana Martínez** por las aportaciones y tiempo brindado al trabajo.

A mi pequeña pero gran **familia** por la confianza y paciencia.

A mis hermanitas **Maricela Bustamante Cruz, Laura Beatriz Pisil Cuenca, Ibeth Fernández Martínez y Angélica Gasca Tolentino**, por los momentos divertidos y aventuras que tuvimos y tendremos.

A mi gran amiga **Areli Sarahi Serrato Gallardo** por acompañarme estos cuatro años, escucharme y por los momentos que pasamos juntas.



A las más ñoñas y amigas de mi generación por orden de ñoñez: **Mayra Castro Luna, Lourdes Rodríguez Campos, María del Pilar Ortiz Ramos y María del Jesús Martínez Juárez**, por incluirme en su clan y contagiarme de su dedicación.

A mis compañeras de laboratorio y también amigas **Leticia Hernández Terrón, María del Rosario López Valentín y Juana Carolina Ramírez Soto** por acompañarme y brindarme su ayuda durante la realización del proyecto.

Finalmente a todas aquellas personas que se preocuparon por mí y aportaron un granito para lograr esta meta.



CONTENIDO

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. ANTECEDENTES.....	17
3. MARCO TEÓRICO.....	20
3.1. Humedales Naturales.....	20
3.2. Humedales Construidos.....	21
3.2.1. Sistemas de flujo superficial.....	22
3.2.2. Sistemas de flujo subsuperficial.....	22
3.2.3. Híbridos.....	23
3.3. Elementos de un humedal construido.....	23
3.3.1. Sustrato y sedimento.....	23
3.3.2. Microorganismo.....	24
3.3.3. Vegetación.....	24
3.4. Ventajas y desventajas de los humedales de flujo subsuperficial.....	24
3.5. Criterios para la elección de la vegetación.....	25
3.6. Establecimiento vegetal.....	26
3.7. Biomasa vegetal.....	27
3.7.1. Métodos de medición de biomasa vegetal.....	28
3.7.2. Análisis de crecimiento vegetal.....	28



3.8. La absorción de nutrientes por las plantas.....	29
3.8.1. Absorción de nitrógeno.....	30
3.8.2. Absorción de fósforo.....	31
3.9. <i>Canna indica</i>.....	34
3.10. <i>Zantedeschia aethiopica</i>.....	35
3.11. Temperatura.....	35
4. Planteamiento del problema.....	37
5. Justificación.....	38
6. Hipótesis.....	39
7. Objetivos.....	39
8. Zona de estudio.....	40
8.1. Arcoiris sport fishing.....	41
8.2. Medio físico-biótico.....	41
8.3. Clima.....	42
8.4. Suelos.....	42
8.5. Hidrología.....	42
8.6. Vegetación.....	42
9. Método.....	43
9.1. Campo.....	43
9.2. Laboratorio.....	44
9.3. Gabinete.....	46
9.3.1. Porcentaje de supervivencia.....	46



9.3.2. Cobertura.....	46
9.3.3. Tasa de crecimiento relativo (TCR).....	47
9.3.4. Análisis estadístico.....	47
9.3.5. Estimación de biomasa vegetal.....	47
9.3.6. Agua.....	48
10. Resultados y discusión.....	49
10.1. Supervivencia.....	49
10.2. Altura de las especies.....	51
10.2.1. Altura de <i>Canna Indica</i> (platanillo).....	51
10.2.2. Altura de <i>Zantedeschia aethiopica</i> (alcatraz).....	52
10.2.3. Altura total.....	53
10.3. Cobertura.....	55
10.4. Tasa de crecimiento relativo (TCR).....	56
10.4.1. TCR de <i>Canna indica</i>	56
10.4.2. TCR de <i>Zantedeschia aethiopica</i>	57
10.4.3. TCR total.....	58
10.5. Discusión sobre el crecimiento de <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia aethiopica</i>	60
10.6. Biomasa vegetal.....	66
10.7. Agua.....	67
10.7.1. Temperatura.....	67
10.7.2. Potencial de hidrógeno (pH).....	68



10.7.3.	Oxígeno Disuelto.....	69
10.7.4.	Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO).....	70
10.7.5.	Demanda Química de Oxígeno (DQO).....	71
10.7.6.	Nitrógeno.....	72
10.7.7.	Fósforo.....	76
10.7.8.	Sólidos.....	79
11.	Conclusiones.....	82
12.	Anexos.....	84
13.	Literatura citada.....	13
14.	Mediografía.....	102



ÍNDICE DE FIGURAS

1) Tipos de humedales construidos.....	22
2) Platanillo (<i>Canna Indica</i>).....	34
3) Alcatraz (<i>Zantedeschia aethiopica</i>).....	34
4) Ubicación del municipio de Santa Rita Tlahuapan.....	40
5) Mapa del sistema de humedales construidos.....	41
6) Ubicación de módulo 1 y módulo 2.....	43
7) Mapa del sistema de humedales y puntos de muestreo.....	44
8) Medidas estructurales requeridas para el cálculo del biovolumen.....	48
9) Porcentaje de supervivencia.....	49
10) Condiciones del módulo 2.....	49
11) Porcentaje de supervivencia de <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	50
12) Altura promedio de <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	51
13) Diferencia de medias de la altura de <i>Canna Indica</i> en módulo 1 y 2	52
14) Diferencia de medias de la altura de <i>Zantedeschia aethiopica</i> en módulo 1 y 2.....	53
15) Diferencia de medias entre el total de individuos de módulo 1 y 2	54



16)Comparación entre <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	54
17)Cobertura promedio de <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	55
18)Daños por granizada en platanillo.....	55
19)Tasa de crecimiento promedio de <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	56
20)Diferencia de medias de TCR para <i>Canna indica</i> en módulo 1 y 2	57
21)Diferencia de medias de TCR de alcatraz en módulo 1 y 2	58
22)Diferencia de medias de TCR del total de individuos en módulo 1 y 2	59
23)Diferencia de medias de TCR entre <i>Canna indica</i> y <i>Zantedeschia</i> <i>aethiopica</i>	59
24)Daños ocasionados por el frío en <i>Canna indica</i>	61
25)Daños ocasionados por el frío en <i>Zantedeschia aethiopica</i>	62
26)Inundación del módulo 2 durante el mes de Abril.....	62
27)Desarrollo de platanillo y alcatraz de módulo 1.....	63
28)Desarrollo de platanillo y alcatraz en módulo 2.....	64
29)Desarrollo de alcatraz en módulo 2.....	65
30)Temperatura del agua.....	67



31)Potencial de Hidrogeno (pH).....	68
32)Oxígeno Disuelto en módulo 1 y módulo 2.....	69
33)Demanda Bioquímica de Oxigeno (DBO) en módulo 1 y 2.....	70
34)Demanda Química de Oxigeno (DQO) en módulo 1 y 2.....	71
35)Especiación del Nitrógeno Amoniacal, Orgánico, Nitratos y Nitritos en módulo 1 y 2.....	73
36)Fósforo Total en módulo 1 y 2.....	76
37)Fósforo Ortosoluble del agua en módulo 1 y 2.....	76
38)Fósforo Hidrolizable en módulo 1 y 2.....	77
39)Sólidos en módulo 1 y 2.....	80



ÍNDICE DE TABLAS

1) Ecuaciones para el cálculo de los valores de los índices de crecimiento.....	29
2) Condiciones óptimas para la sobrevivencia de diferentes microorganismos.....	33
3) Parámetros de Medición de Contaminantes.....	45

ÍNDICE ANEXOS

[Anexo 1] Análisis estadístico para <i>Canna Indica</i>	84
[Anexo 2] Análisis estadístico para <i>Zantedeschia aethiopica</i>	85
[Anexo 3] Análisis estadístico de la TCR del total de individuos entre módulo 1 y 2.....	86
[Anexo 4] Análisis estadístico de la TCR entre especies.....	87
[Anexo 5] Análisis estadístico de la altura entre módulos de <i>Zantedeschia aethiopica</i>	88
[Anexo 6] Análisis estadístico de la altura entre módulos de <i>Canna indica</i>	89
[Anexo 7] Análisis estadístico de la altura del total de individuos entre módulos.....	90
[Anexo 8] Análisis estadístico de la altura entre especies.....	91
[Anexo 9] Modelos de estimación de biomasa vegetal.....	92



RESUMEN

Este trabajo reporta el análisis de crecimiento y generación de biomasa vegetal de *Canna indica* (platanillo) y *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz) durante el establecimiento de dos módulos como parte de un sistema de humedal construido en un clima semifrío en el centro de pesca deportiva Arcoíris Puebla. Para efectuar este estudio se registró de manera mensual la supervivencia, cobertura y altura de ambas especies y se analizó el porcentaje de supervivencia, la altura y la tasa de crecimiento relativo (TCR) aplicando las pruebas de t de student y U de Mann-Whitney para muestras independientes. El muestreo y análisis de agua se realizó de acuerdo a las normas mexicanas. Los resultados obtenidos durante el monitoreo arrojaron que a pesar de que las plantas fueron previamente aclimatadas el estrés del trasplante afectó en la supervivencia de platanillo con el 58 %, mientras que alcatraz confirma con un 100 % de supervivencia que las plantas previamente aclimatadas tiene mayor resistencia a temperaturas bajas. La estructura de los módulos también afectó la supervivencia ya que módulo 1 (M1) obtuvo una mayor supervivencia que módulo 2 (M2) debido a la cubierta que protegió a los individuos al estrés. En cuanto al crecimiento de ambas especies, estas alcanzaron su crecimiento máximo en octubre y noviembre con una TCR de $0.0092 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ (alcatraz) y $0.0068 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ (platanillo). Al analizar el crecimiento de las plantas en los módulos se encontró que estadísticamente no existieron diferencias. En cuanto al agua tratada por humedal construido los porcentajes máximos de remoción obtenidos módulo 1 fueron: 46 % DBO, 81% DQO, 50% N orgánico, 50% N amoniacal, 10 % nitratos, 27 % nitritos, 35.4% P Total y 48% P ortosoluble. Módulo 2 en la remoción fue: 90% DBO, 70% DQO, 50 % N orgánico, 20% N amoniacal, 44% nitratos, 52% nitritos, 41% P Total y 62% P ortosoluble. Finalmente, se logró establecer ambas especies y se concluyó que el periodo de establecimiento de plantas (*Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*) previamente habitúas a un clima semifrío es más corto (9 meses).



1. INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales están definidos como sistemas especialmente diseñados y contruidos para que los mecanismos físicos, químicos y biológicos de depuración de contaminantes que se llevan a cabo en humedales naturales ocurran de manera más controlada y eficiente (Rosado, 2010). Estos sistemas están conformados por sustrato, vegetación y microorganismos que forman una biopelícula. Diversas ventajas en el tratamiento de aguas residuales se pueden obtener a partir del uso de estos sistemas, entre ellos se encuentra la eliminación de la materia orgánica, el uso mínimo de energía y la obtención de biomasa vegetal.

El papel de la vegetación dentro de los humedales es primordial, ya que contribuye al mejoramiento de la calidad del agua mediante efectos físicos. Las plantas estabilizan la superficie, hacen lento el flujo de agua y por lo tanto ayudan en los procesos de sedimentación. Por otra parte proporcionan una superficie adecuada para la formación de películas bacterianas y permiten la transferencia de oxígeno a la columna de agua. También juegan un papel vital en la eliminación y la retención de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y ayudan en la prevención de la eutrofización de los humedales (Sim, 2003). Además de que la vegetación ayuda a mejorar la calidad del agua, la productividad de las plantas es uno de los valores añadidos, ya que la biomasa obtenida puede utilizarse como alimentos, medicinas, papel, combustible biológico, ornamento, ente otros (Perbangkhem & Polprasert, 2010).

La temperatura es un factor determinante para el crecimiento de las plantas, afecta cada uno de los procesos, si la temperatura aumenta, también lo hace la velocidad de crecimiento, por lo contrario, si esta baja, se reduce todas las etapas del ciclo de vida de la planta (Squeo & Cardemil, 2006). Debido a la importancia de la vegetación, las especies que se pretendan establecer dentro de un humedal construido deben cumplir con ciertas características como adaptarse a las condiciones climáticas, establecerse con facilidad, tener una alta capacidad de eliminación de contaminantes y generar gran cantidad de biomasa.



El campamento Arcoíris localizado en el estado de Puebla cuenta con un sistema de humedales construidos, conformado por cinco módulos pero, debido al clima que presenta la zona (frio subhúmedo) con temperaturas que oscilan entre 3 a 22°C, el establecimiento de la vegetación ha sido lento y no ha concluido, además el impacto térmico sobre el sustrato eliminó la biopelícula (López, 2013).

Una alternativa para el establecimiento vegetal, es el trasplante de plantas maduras que previamente hayan estado bajo las mismas condiciones climáticas y calidad de agua y de esta manera tener un mayor éxito en el establecimiento de la vegetación (Wong, 1999).



2. ANTECEDENTES

Los estudios de humedales construidos para tratar de aguas residuales iniciaron en la década de los 50s en el instituto Max Plank en Alemania-USA. Esta tecnología comenzó a ser implementada en los años 70s y 80s (Llagas & Guadalupe, 2006). En 1973 Kikuth, profesor de la Universidad de Kassel en Alemania, diseñó el primer humedal para tratamiento de desagües, fue utilizado con excelentes resultados en todo el mundo en efluentes domésticos e industriales (Villaroel, 2005).

Durante los años 90s se observó un incremento en el número de estos sistemas ya que su aplicación se expandió para el tratamiento no solo del agua residual municipal sino también para agua de lluvia, industrial y residuos orgánicos (Llagas & Guadalupe, 2006).

A partir del año 2000, esta tecnología se ha empleado con mayor frecuencia en países como: Inglaterra, Estados Unidos y Australia, debido a la mayor cantidad de recursos económicos que en estos países se destinan a la investigación científica en general o a la investigación relacionada con el tratamiento de aguas residuales en particular (Villaroel, 2005). Un ejemplo de la detonación de estos sistemas lo tiene Estados Unidos donde su número incremento a más de 1800 en los últimos 7 años. En México actualmente se estima que operan 50 sistemas de humedales, considerando los de propiedad privada y los operados por los municipios (Rivas, 2003).

Entre los múltiples beneficios que aportan los humedales construidos además del tratamiento del agua residual es la gran producción de la biomasa vegetal es por ello que se han realizado diversos trabajos sobre el tema. A continuación se presenta una breve descripción de algunos de ellos:

- Healy *et al.* (2007) evaluó la variación estacional de la biomasa, el nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT) contenido de *Phragmites australis* en un humedal artificial (FWS) en el oeste de Irlanda, para investigar los efectos de la cosecha de biomasa y el contenido de nutrientes. El humedal se dividió en dos módulos, el primer módulo de 80 m² se cosechó en junio del 2005 y el control permaneció sin cosechar durante el estudio. En el módulo control; la biomasa vegetal, el contenido de NT y PT llegó a su máximo en agosto. En el módulo cosechado en junio la biomasa aérea, nitrógeno total y el contenido

total de fósforo alcanzó su punto máximo en septiembre. La tasa media de la producción de materia seca, alcanzó tasas máximas de $12.8 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ y $4.2 \text{ g m}^{-2}\text{d}^{-1}$ para el control y el módulo cosechado en junio respectivamente. Lo que indicó que la cosecha anual de vegetación emergente puede no tener ningún efecto beneficioso en la producción de biomasa o el contenido de nutrientes en condiciones climáticas de Irlanda.

- Barbera *et al.* (2009) Observó el crecimiento y producción de biomasa analizando en humedales construidos la eficacia fitoremedora de *Phragmites australis* y especies de plantas espontáneas (SPS) en dos sistemas de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (H-SSF) y vertical (V-SSF). *P. australis* mostró un crecimiento de biomasa más alto que SPS, cubriendo el 100% de la superficie de la cama de sustrato. El sistema H-SSF fue el más adecuado para mejorar el crecimiento de la biomasa de *P. australis* (4701 gm^{-2} , en comparación con 3.088 gm^{-2} que se detectó en V-SSF), mientras que en V-SSF con SPS (1700 gm^{-2} y 100% del total cubierto, en comparación con 240 gm^{-2} y 40 % de cobertura total observada en H-SSF). SPS, incluye las especies que pertenecen a diferentes familias botánicas en relación con el sistema adoptado, algunas de estas especies (es decir *Phalaris spp.* y *Chrysanthemum segetum*) fueron dominantes en la composición floral sobre el suelo. Camas de sustrato con SPS mostraron la misma eficacia de remoción que *Phragmites* de SST, DQO y la eliminación de patógenos. *Phragmites* fue más eficaz que SPS en la eliminación de DBO_5 (H-SSF), fósforo total y nitratos. V-SSF fue más eficaz que H-SSF en la eliminación de nitrógeno total. La presencia SPS no disminuyó la eficiencia.
- Perbangkhem y Polprasert (2010), investigaron la eficiencia energética de captura y productividad de la planta papiro en un humedal. La carga orgánica de agua residual correspondió a 10, 16, 31, y $63 \text{ kg DBO ha} \cdot \text{día}^{-1}$. Con abundante sol en la zona tropical, el papiro convierte la radiación solar a biomasa de alrededor de $2200\text{-}3100 \text{ g Peso m}^{-2}$ seco durante el período del experimento (dos meses). Además, el contenido de energía de papiro son 16,2, 17.2, y 16.8



MJ•kg⁻¹ de tallos, umbelas y total sobre el suelo, respectivamente. A partir de la productividad de la planta y el contenido de energía del papiro obtenido de este estudio, las eficiencias de captura de energía se pueden estimar entre 4.4 a 6.0%, que son relativamente altas, en comparación con los de otras plantas.

- Wang *et al.* (2011) Investigaron las variaciones estacionales de la biomasa aérea de un humedal entre marzo 2007 a marzo 2008. La biomasa total fue de 16.74 kg y el carbono total contenido fue de 6185 kg durante la acumulación máxima de biomasa aérea para el sistema de macrófitos emergentes en septiembre del 2007. A pesar de la inundación que causo el Tifón Korsa, se observó una recuperación significativa de los macrófitos emergentes sin intervención humana. *Ludwigia sp.* se recuperó mucho más rápido, en comparación con *Typha*. La capacidad de autorecuperación de la comunidad de macrófitos tras el tifón validó la viabilidad de la cosecha de biomasa. La incineración del 80% de la biomasa cosechada área experimental en una planta incineradora cercana podría producir 11.85k Wh durante un mes.
- De la Orta & Muñoz (2011) evaluaron la fenología y la calidad del agua residual generada en el CBTA No 176 en Apaxtla de Castrejón, Guerrero, en el cual el agua fue tratada por medio un humedal construido de flujo subsuperficial. En este trabajo se obtuvieron porcentajes de remoción para DBO de 74%, DQO de 53%, fosforo total con 63%, nitrógeno total de 54%, nitrógeno amoniacal de 56%, nitritos de 87% y coliformes fecales de 91%. En cuanto a las especies vegetales ornamentales que se introdujeron en este sistema, la que presentó mejores resultados en cuanto a biomasa y talla fue el platanillo (*Canna indica*) con un peso de 262.45 kg y altura máxima de 271 cm.



3. MARCO TEÓRICO

3.1. HUMEDALES NATURALES

De acuerdo con el INE (2008) los humedales naturales son ambientes de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos incluyendo los ambientes costeros, con una biodiversidad característica y valiosa. Son terrenos inundados con profundidades de agua normalmente inferiores a 0.6 m con plantas emergentes. En estos sistemas el agua fluye continuamente y la superficie libre permanece al nivel del suelo o por encima del mismo. La importancia de los humedales es que figuran entre los ecosistemas más productivos de la tierra. Sus características se pueden agrupar en componentes, funciones y propiedades. Los componentes del sistema son los rasgos bióticos y no bióticos y abarcan el suelo, el agua, las plantas y los animales (Barbier, Acreman, & Knowler, 1997). Las interacciones de estos componentes se expresan en funciones, como por ejemplo:

- Almacenamiento de agua.
- Protección contra tormentas y mitigación de crecidas.
- Estabilización de costas y control de la erosión.
- Recarga de acuíferos (movimiento descendente de agua del humedal al acuífero subterráneo).
- Descarga de acuíferos (movimiento ascendente de aguas que se convierten en aguas superficiales en un humedal).
- Depuración de aguas: retención de nutriente, sedimento y contaminantes.
- Estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente lluvia y temperatura (Ramsar, 2006).

Entre las propiedades de los humedales se encuentra la elevada diversidad de especies (Barbier *et al.* 1997).

Debido al gran potencial depurador de los humedales se han diseñado sistemas capaces de reproducir las características de los humedales naturales para el tratamiento de aguas residuales.



3.2. HUMEDALES CONSTRUIDOS

Los humedales construidos se definen como aquellos ambientes diseñados con el solo propósito de tratar aguas residuales. Son sistemas de fitodepuración y su objetivo es la eliminación de contaminantes por medio de procesos como la sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización (Delgadillo, 2010).

Los humedales tienen tres funciones básicas:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por medio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento (Lara, 1999).

Los componentes de un humedal construido son las plantas, el sustrato y la población microbiana. Las plantas pueden ser de diferentes especies y hábitos de enraizamiento entre sus funciones principales se encuentra la absorción de nutrimentos, la relación simbiótica que se establece con los microorganismos, el suministro de oxígeno y la filtración de partículas. El sustrato es el soporte para las plantas y un medio de fijación para los microorganismos en el sistema y funciona como conductor hidráulico. Por otra parte los microorganismos son parte fundamental del funcionamiento de los humedales construidos ya que de ellos dependerá la eficiencia en la remoción de los contaminantes (Romero *et al.* 2009).

Existen tres tipos de humedales construidos que han sido desarrollados para el tratamiento de agua residual: sistemas de flujo superficial, sistemas de flujo sub-superficial y sistemas híbridos que conjunta los dos tipos de humedales anteriores (figura 1).

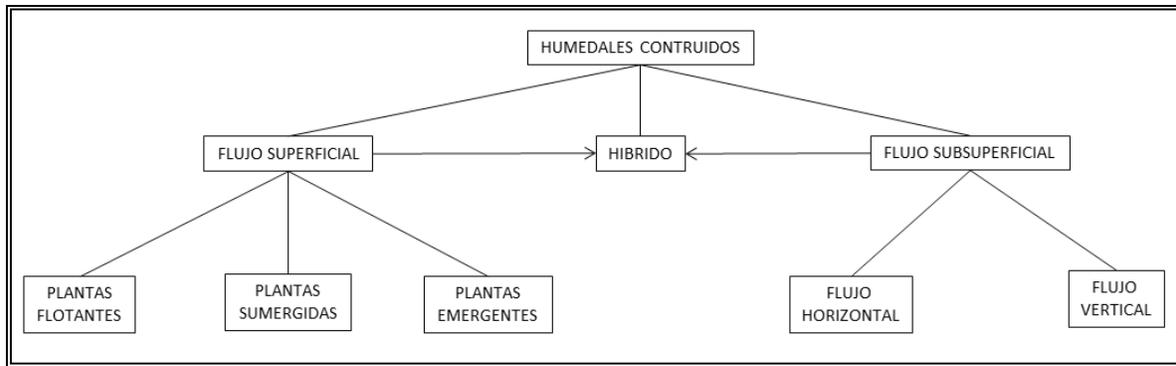


Figura 1. Tipos de humedales contruidos para el tratamiento de aguas residuales de acuerdo a Kadlec & Wallace (2009).

3.2.1. Sistemas de Flujo Superficial

En estos sistemas, el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta la descarga. Consisten típicamente en una cuenca o canales con algún tipo de barrera para prevenir la filtración, soportar las raíces de la vegetación emergente, y el agua a poca profundidad. La superficie del agua está expuesta a la atmósfera, y el camino del flujo de agua es destinado a través de un sistema horizontal (EPA, 1993). En cuanto a la remoción de contaminantes es confiable tanto para DBO, DQO y los SST. También pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos. Además de ser utilizados para tratamiento de aguas domésticas, son usados para el drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos, avícolas y lixiviados de rellenos sanitarios y para efectos de mitigación (Zambrano, 2004).

3.2.2. Sistema de Flujo Subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (FSS), se caracterizan por que la circulación del agua es a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en el medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Pueden ser de dos tipos de acuerdo con la dirección de flujo: horizontal o vertical (Delgadiilo, 2010). Debido a que el agua no está expuesta durante el proceso de tratamiento, el riesgo asociado con



humanos o la exposición a la fauna silvestre con organismos patógenos se reduce al mínimo. Además que no ofrecen un adecuado hábitat para los mosquitos. Estos sistemas también son capaces de funcionar en condiciones de frío debido a la capacidad de aislar la parte superior (Kadlec & Wallace, 2009). Por las limitaciones hidráulicas impuestas por el sustrato, este tipo de diseño se adapta mejor a las aguas residuales con una concentración de sólidos relativamente bajos y condiciones de flujo uniforme (EPA, 1998).

3.2.3. Híbridos

Varios tipos de humedales construidos se pueden combinar con el fin de lograr un mayor efecto en el tratamiento. Este tipo sistema se les conoce como híbrido o combinado ya que conjunta las ventajas de diferentes tipos humedales construidos (Gitiri, 2009). Esta combinación dependerá principalmente de los objetivos del tratamiento, de las condiciones de operación y de la disponibilidad económica. Para mejorar aún más la calidad de agua o cuando se requieren obtener resultados de calidad específicos y hacer lo sistemas más efectivos, también es posible implementar un proceso de recirculación del agua tratada en diferentes puntos del sistema (Arias, 2003).

3.3. ELEMENTOS DE UN HUMEDAL CONSTRUIDO

3.3.1. Sustrato y sedimento

El sustrato es un medio de soporte para las plantas; permiten la proliferación de los microorganismos depuradores, favorecen la formación de la biopelícula, promueve la retención de partículas sólidas suspendidas y facilita la remoción de metales pesados, nitrógeno y fósforo a través de mecanismos de adsorción, absorción y precipitación (Ramírez, 1998). Este material debe contar con una permeabilidad y una conductividad hidráulica que posibilite el paso del agua residual a lo largo del sistema y que a su vez retenga el líquido necesario que establezca el contacto con las bacterias adheridas a la superficie para favorecer una mayor depuración de los contaminantes. La superficie de contacto debe ser suficiente para fomentar el transporte de oxígeno a lo largo de la columna y así permitir la formación de la biopelícula (Rosado, 2010).



3.3.2. Microorganismos

Los microorganismos regulan las funciones de un humedal, debido a la formación de una película microbiana que se adhiere al soporte y raíces de las plantas, estos llevan a cabo la mayor parte de la degradación de la materia orgánica e incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios (Burciaga, 2008). Esta biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y está involucrada en el reciclaje de muchos nutrientes. Transforman un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles. Algunas transformaciones son aeróbicas, mientras otras son anaeróbicas (Gutierrez, 2008).

3.3.3. Vegetación

La vegetación tiene un papel importante dentro de un humedal ya que actúan como filtros biológicos que descomponen los contaminantes y estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo y agua al fijarlos en sus raíces y tallos, o metabolizándolos para finalmente convertirlos en dióxido de carbono, agua y sales minerales que son compuestos menos peligrosos (Arias, 2010). También proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, ayuda a la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz (Ruiz, 2010). Otra función es que disminuyen la velocidad del agua y aísla la superficie contra heladas (Brisson & Chazarenc, 2008).

3.4. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

En virtud de sus características, los humedales construidos están siendo utilizados alrededor del mundo para mejorar la calidad del agua ya que ofrece diversas **ventajas** que a continuación se presentan:

- Relativamente económicos para construir y operar.
- Fáciles de mantener.
- Relativamente tolerantes a los cambios en la carga hidráulica y biológica.
- Proporciona beneficios ecológicos.



- Reconocidos como una buena alternativa de tratamiento por muchos reguladores y grupos ambientales (Gamonal, 2002).
- No producen biosólidos, ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición final.
- Efectivos en la remoción de la DBO, DQO, SST, metales y algunos compuestos orgánicos encontrados en aguas residuales.
- La remoción de DBO, DQO y nitrógeno es un proceso continuo y renovable.
- Los mosquitos y otros insectos no son un problema (EPA, 2000).

Algunas **desventajas** de los humedales construidos incluyen:

- Áreas relativamente grandes.
- Criterios de diseño y operación imprecisos.
- Complejidad biológica e hidrológica.
- Diferencias en funcionamiento con el cambio de las estaciones climáticas (Gamonal, 2002).
- El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH_3 y NO_3^- .
- No logran una remoción completa de compuestos orgánicos, SST, nitrógeno o bacterias coliformes (EPA, 2000).

3.5. CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN

A causa de las funciones que representa la vegetación de un humedal es recomendable buscar aquellas plantas que posean características idóneas para el establecimiento y mejor aprovechamiento del sistema, es por ello que se deben considerar las siguientes recomendaciones:

- Debe ser capaz de crecer en o bajo el agua.
- Estar bien adaptada a las condiciones climáticas, plagas, enfermedades y contaminantes.

- Asimismo, debe presentar una alta capacidad de eliminación de contaminantes, ya sea a través asimilación directa y almacenamiento, o indirectamente por mejora de las transformaciones microbianas tales como nitrificación (a través de la liberación de oxígeno en la zona radicular) y desnitrificación (a través de la producción de carbono) (Barbera *et al.*, 2009).
- Debe tener un rápido establecimiento, por lo general por propagación. Además de una tasa de crecimiento rápido.
- Generación de gran cantidad de biomasa (Brisson & Chazarenc, 2008).
- Capaz de soportar cargas de choque, así como cortos periodos de sequía.
- Las plantas no deben exigir la inundación permanente, pero debe hacer frente a inundaciones temporales y los suelos encharcados.
- Buen desarrollo de órganos subterráneos (rizoma) (Hoffmann, 2011).

3.6. ESTABLECIMIENTO VEGETAL

Existen varios métodos para establecer la vegetación en los humedales como; la siembra directa de las plántulas, trasplante de material cosechado y trasplante a partir de bancos de semillas. La estrategia recomendada para vegetar un humedal es utilizar un vivero donde crecen plántulas para la siembra de grandes áreas. La siembra directa y trasplante de productos cosechados se puede utilizar cuando se presenta la oportunidad y las condiciones adecuadas del lugar. La densidad de siembra debe ser de aproximadamente 80% de cobertura vegetal. Esto reduce el riesgo de invasión de malezas.

- Vivero: proporciona grandes cantidades de plantas de la misma edad. Dependiendo de la especie, el tiempo de propagación varía de 6 a 18 meses, por lo que si se debe comenzar de manera temprana durante la fase de diseño del humedal.
- Siembra directa: Se trata de una manera relativamente rápida y poco costosa de vegetar grandes áreas. Para obtener los mejores resultados, es necesario tener conocimientos sobre las características de germinación de la especie que se requiere. Si no es controlado la

propagación, germinación y establecimiento de la semilla, existe el riesgo de fracasar debido a las inundaciones, desecación, depredación de semillas y el ataque de hongos. La siembra directa puede ser vulnerable a la invasión de malezas en la capa superficial del suelo si no ha sido bien preparado.

- Trasplante de productos cosechados: Es un método rentable, pero se requiere mucha mano de obra y es el más adecuado para el establecimiento de áreas pequeñas. Las especies que cuentan con rizoma, su establecimiento es más exitoso. Una ventaja de esta técnica es que el material trasplantado es maduro, y puede ser colocado directamente en el humedal. Con este método, el ajuste del nivel de agua para ayudar a establecer las plantas es menos crítico, aunque muchas especies se establecen con mayor éxito en condiciones de aguas bajas (Wong, 1999).

3.7. BIOMASA VEGETAL

El término biomasa se define como la cantidad de todos los tejidos vivos en unidad de superficie durante un momento dado. Se divide comúnmente en subterránea (raíces, rizomas, tubérculos, etc.) y aérea (todas las partes vegetativas y reproductivas por encima del nivel del suelo) El cultivo en pie es un término que incluye las partes vivas y muertas que estén conectadas a la planta. El conjunto de partes muertas y la planta muerta en pie, se les denomina pie muerto. La cosecha pico en pie, se define como el valor más grande del crecimiento de material vegetal presente durante un año (Kadlec & Wallace, 2009). Otra terminología ha sido descrita por Mueleman *et al.* (2003), que sugiere a la fitomasa que se compone de materia viva (biomasa) y muerta (necromasa).

El término de biomasa a menudo es confundido con productividad debido principalmente a que la biomasa se utiliza para valorarla. La producción o productividad primaria bruta se define como la asimilación de la materia orgánica por una comunidad vegetal durante un periodo determinado, incluyendo el monto dado por la respiración de las plantas. La producción primaria neta es todo el carbono asimilado después de haber descontado los gastos de mantenimiento foliar es decir la respiración. Por



otra parte, la biomasa es la parte de la producción primaria neta que la planta destina a la producción de estructuras, es decir que se acumula (Salas & Infante, 2006). La biomasa se expresa por lo general en gramos sobre peso seco por metro cuadrado o en kilogramos por hectárea (Fournier, 1993).

3.7.1. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE BIOMASA VEGETAL

Existen dos métodos frecuentemente usados para estimar la biomasa: el método directo y el indirecto. El directo es un método destructivo, que consiste en cortar la planta y determinar la biomasa pesando directamente cada componente. Mientras que el método indirecto consiste en la suma de los volúmenes de tallo, se toman muestras de esta y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco. El proceso de la cuantificación de la biomasa de un órgano, requiere el aislamiento de ese órgano del resto de la planta y su desecación en una estufa a una temperatura alrededor de 70 °C hasta deshidratación completa y adquiere peso constante. Este proceso es destructivo y el material que es evaluado ya no puede continuar su crecimiento, razón por la cual en estudios del desarrollo se hacen evaluaciones secuenciadas en plantas diferentes que tienen cierta homogeneidad (Espinoza & Raya 2011).

3.7.2. ANÁLISIS DE CRECIMIENTO VEGETAL

El crecimiento vegetal se define como un aumento irreversible en volumen. El principal componente de crecimiento es la expansión celular dirigida por la presión de turgencia, durante este proceso, las células aumentan en volumen varias veces y llegan a estar vacuolizadas (Taiz & Zeiger, 2006). El crecimiento de una planta o de cualquiera de sus órganos, pasa por varios estadios, que se representan con una curva sigmoidea. Presenta tres fases: **fase exponencial o logarítmica**, donde el crecimiento aumenta exponencialmente con el tiempo; **fase lineal**, donde el crecimiento ocurre a un ritmo constante con respecto al tiempo y responde a la ecuación de una recta: $y = a + bx$; y la tercera fase de **senescencia**, que se caracteriza por una disminución gradual del crecimiento con respecto al tiempo, hasta hacerse cero. Esta última caracteriza la madurez

de la planta (Víctor, 2001). El concepto central del análisis del crecimiento, es la tasa de crecimiento relativo que se define como la ganancia de biomasa, por unidad de biomasa y tiempo (Valladares, 2004). Otros índices que se utilizan para el análisis de crecimiento se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de los valores de los índices de crecimiento. AF=Área Foliar, P₁=Peso inicial, P₂=Peso Final, t₁=Tiempo inicial, t₂=Tiempo final, Af₁=Área Foliar inicial, Af₂=Área foliar final, AS=Área del suelo, AFT=Área foliar total, MST=Peso seco total de la planta (Cuélla & Herrera, 2010).

Índice de Crecimiento	Descripción	Ecuación	Unidades
Área Foliar Específica (AFE)	Mide el grosor de la hoja y representa la superficie foliar por gramo de hoja.	$1/(Af) \cdot [(P_2 - P_1)/(t_2 - t_1)]$	$g \cdot m^2 \cdot día^{-1}$
Tasa de Asimilación Neta (TAN)	Es un estimador de la eficiencia fotosintética de la planta.	$[(P_2 - P_1)/(t_2 - t_1)] \cdot [(\ln Af_2 - \ln Af_1)/(Af_2 - Af_1)]$	$g \cdot cm^2 \cdot día^{-1}$
Tasa Relativa de Crecimiento (TCR)	Expresa el crecimiento en materia seca a partir de un gramo de materia seca de la planta en un intervalo de tiempo, con relación a un tiempo inicial.	$(\ln P_2 - \ln P_1)/(t_2 - t_1)$	$g \cdot g^{-1} \cdot día^{-1}$
Índice de Área Foliar (IAF)	Es el área foliar por unidad de superficie de suelo.	$[(Af_2 - Af_1)/2] \cdot (1/AS)$	Sin unidades
Relación de Área Foliar (RAF)	Estima la magnitud del aparato fotosintético de la planta y, es la relación entre el área foliar y el peso seco total de la planta.	AFT/MST	$cm^2 \cdot g^{-1}$

3.8. LA ABSORCIÓN DE NUTRIENTES POR LAS PLANTAS

Las plantas de los humedales requieren nutrientes para el crecimiento y reproducción, los macrófitos aclimatados toman los nutrientes a través de sus sistemas de raíces. La absorción se produce también a través de los tallos y hojas sumergidos en el agua. Como las plantas de los humedales son muy productivas, cantidades considerables de nutrientes se pueden enlazar en la biomasa. La capacidad de absorción de los macrófitos emergentes, y por lo tanto la cantidad que se puede quitar si la biomasa se cosecha, es más o menos en el rango de 30 a 150 kg P ha⁻¹ año⁻¹ y 200 hasta 2500 kg N ha⁻¹ año⁻¹. Si los humedales no se cosechan, la gran mayoría de los nutrientes que se han incorporado en el tejido de la planta será devuelto al agua por



procesos de descomposición (Brix, 2003). El potencial de la tasa de absorción y el almacenamiento de nutrientes de una planta depende esencialmente de tres parámetros:

- La productividad de la planta (tasa de crecimiento): Afecta a la capacidad de absorción.
- La acumulación de biomasa (cultivo en pie: rendimiento de biomasa por unidad de superficie): Afecta a la capacidad de almacenamiento.
- El contenido de nutrientes en tejidos vegetales: Afecta a la capacidad de absorción y el almacenamiento.

Altas tasas de crecimiento, los rendimientos altos de biomasa y también un alto contenido de nutrientes del tejido afectan a la asimilación y almacenamiento de nutrientes de manera positiva. En general, la productividad (tasa de crecimiento) de las plantas en humedales aumenta con una creciente disponibilidad de nutrientes. Reddy & De Busk (1987) encontraron una relación directa entre el suministro de nutrientes, la producción de biomasa, y la acumulación de nutrientes: las concentraciones de nutrientes incrementaron como resultado de los altos rendimientos de biomasa y, como consecuencia aumento la tasa de acumulación de nutrientes. La capacidad de absorción de nutrientes de los macrófitos emergentes depende de muchos parámetros como la especie de la planta, la composición de las aguas residuales, la tasa de carga, las prácticas de gestión, tales como la recolección y el clima, entre otras (Heers, 2006).

3.8.1. ABSORCIÓN DE NITRÓGENO

El proceso de extracción del nitrógeno por las plantas consiste en la asimilación de formas inorgánicas del nitrógeno para formar compuestos orgánicos nitrogenados estructurales. El nitrógeno es un macronutriente indispensable para las plantas; cuanto mayor es la tasa de crecimiento de la planta mayor es la extracción de nitrógeno. Se estima que la vegetación de los humedales extrae entre 0.5 y 3.3 g de N/m²/año; entre las especies emergentes las menos exigentes son los juncos y las más exigentes son las eneas. Las plantas acumulan el nitrógeno principalmente, en sus órganos vegetativos verdes (hojas y tallos). Para eliminar ese nitrógeno del sistema



hay que retirar periódicamente del humedal la biomasa producida; de otro modo el nitrógeno se recicla en el sistema debido a la incorporación de los restos vegetales en el humedal. (González *et al.*, 2005).

Solamente el 10 y 15 % del nitrógeno eliminado se retira del sistema usando la poda de plantas (Lara, 1999), es por ello que la principal ruta de remoción y transformación de los compuestos nitrogenados dentro de los humedales construidos es por medio de los microorganismos y para que estos desarrollen su mejor capacidad depuradora se debe garantizar que las condiciones del sistemas como pH, la temperatura, concentración de oxígeno disuelto, la concentración de carbono orgánico y la concentración de los compuestos inhibidores de la actividad metabólica de los microorganismo estén en los valores más adecuados para su bienestar, como se muestra en la tabla 2 (Rosado, 2010).

4.8.2. ABSORCIÓN DE FÓSFORO

El fósforo generalmente se encuentra en aguas naturales, subterráneas y residuales tratadas, como diversos fosfatos, especialmente como orto fosfato PO_4^{3-} , en las aguas naturales el fósforo aparece en tres formas: ortofosfato inorgánico disuelto, compuestos orgánicos de fósforo disuelto y fósforo en partículas (ligado a la biomasa o depositado en partículas) (Delgadillo, 2010)

Los mecanismos principales para la remoción de fósforo son: la adsorción, la formación de complejos, la precipitación, y la toma por las plantas. La remoción de fósforo inorgánico a través de la toma por la planta es una vía rápida, sin embargo, es necesario la poda de las plantas para evitar que el fósforo ya asimilado retorne al sistema. La adsorción del fósforo a las partículas del suelo depende de la presencia de hierro, aluminio o calcio en el suelo, así como de la presencia de minerales de arcilla o materia orgánica (Osnaya, 2012).

El fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico en partículas y fósforo insoluble no están disponibles para las plantas, a menos que sean transformados en fósforo inorgánico soluble. En el humedal estas transformaciones pueden ocurrir por la intervención de microorganismos que se hayan suspendidos en la biopelícula sobre las superficies de plantas



emergentes y en los sedimentos. Una vez solubilizado, puede ser asimilado por plantas y otros organismos (bacterias y algas) y por tanto, ser temporalmente retirado del agua. Se estima que la cantidad neta de fósforo que extraen las plantas emergentes oscila entre 1.8 y 18 g P/m²/año; esta extracción sucede durante el crecimiento de las plantas. Después, si no se retira la biomasa vegetal (otoño), el fósforo volvería al efluente debido a la senescencia y muerte de los tejidos vegetales, que se incorporan al agua. Sin embargo, también parte del fósforo que devuelven los restos vegetales al sistema puede pasar a formar deposiciones en los sedimentos, dando lugar a su inmovilización (González *et al.*, 2005).



Tabla 2. Condiciones óptimas para la sobrevivencia de diferentes microorganismos (Rosado, 2010).

Reacción	Microorganismo	Tipo de Organismo	Géneros	Ambiente	Temp. Óptima (°C)	pH	Fuente de carbono	Inhibidores
Amonificación	Protobacterias oxidantes de amonio	Quimiolitótrofo	<i>N. Europacea</i> , <i>Nitrosolobus</i> <i>Multiformis</i>	Aerobio	40-60	6.5-8.5	CO ₂	Acetileno
Nitrificación	Bacterias oxidantes de amonio	Quimiolitótrofo	<i>Nitrospira</i> <i>Nitrosolvibrio</i> <i>Nitrosolobus</i>	Aerobio	30-40	6.7-8.3	CO ₂	Temperaturas menores a 4°C, algunos compuesto orgánicos de carbono, en condiciones aerobias son inhibidas por acetileno
	Oxidantes aerobios de nitrito	Quimiolitótrofo	<i>Nitrobacter</i> , <i>Nitrospira</i> , <i>Nitrococcus</i>	Facultativo		6.6-8.0	CO ₂	Hidroxilamina Amonio
Amonificación del nitrato	Bacterias amonificantes de nitrato. Bacterias fermentativas	Quimioheterótrofos o facultativo	<i>Bacillus</i> <i>Citrobacter</i> , <i>Aeromonas</i>	Facultativo anaerobio		pH>7	Carbono orgánico	N gaseoso
Desnitrificación	Bacterias desnitrificantes	Quimioheterótrofos o facultativo	<i>Bacillus</i> <i>Micrococcus</i> <i>Pseudomonas</i>	Facultativo anaerobio	60-60	6.0-8.0	Carbono orgánico	Temperaturas menores a 4°C
Fijación del nitrógeno	Actinomicetos Bacterias heterótrofas, cianobacterias	Quimioheterótrofos y quimioautótrofos facultativos	<i>Bacillus</i> <i>Klebsiella</i> <i>Clostridium</i>	Anaerobio		5.0-8.0	Carbono orgánico	Altas concentraciones de oxígeno, baja intensidad de luz
Anammox	Oxidantes anaerobios de amonio	Quimioheterótrofos	<i>Candidatus</i> <i>Brocadia</i> <i>Anammoxidans</i>	Anaerobio			CO ₂	Concentración de nitrito >70 mgNL ⁻¹ y de fosfatos > 60 mgPL ⁻¹



Figura 2. Platanillo (*Canna Indica*) establecida en el campamento Arcoíris Puebla.



Figura 3. Alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) ubicada en el campamento Arcoíris Puebla.

3.9. *Canna indica*

Planta Perenne con reproducción vegetativa y generativa con una tasa de crecimiento rápido, cuenta con un sistema de rizomas gruesos y ramificados (Heers, 2006). Su altura varía de 0.5 a 3.5 m y crece sobre todo en lugares húmedos, generalmente en terrenos cenagosos perturbados, cercanos a corrientes de agua. Se encuentra frecuentemente en las zanjas que acompañan a carreteras, o en las orillas de canales de riego. Es originaria de México, Centroamérica, Sudamérica y las Antillas (región neotropical). En México se distribuye de acuerdo con Villaseñor y Espinosa (1998) en Aguascalientes, Campeche, Chiapas, Colima, Distrito Federal, Durango, Hidalgo, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro, Quintana Roo, San Luís Potosí, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz y Yucatán. Rzedowski (1998) además la reporta en Nuevo León y Tlaxcala. Se ha reportado de los 250 a los 1950 m s.n.m. Se utiliza como ornamental; las hojas ocasionalmente se usan para envolver tamales, etc.; hay formas con



rizomas harinosos comestibles que se cultivan. Las semillas duras y grandes se utilizan en sonajas y para collares (figura, 2) (Conabio, 2009).

3.10. *Zantedeschia aethiopica*.

El alcatraz (figura, 3) es originario de las zonas templadas frías ubicadas al sureste de África. Su hábitat se encuentra en canales de riego, zanjas de desagüe, orillas de cuerpos de aguas, potreros en regiones húmedas. Florece de diciembre a abril y su uso es principalmente ornamental (Conabio, 2009b). La planta de alcatraz presenta una raíz modificada que es conocida como bulbo o rizoma, donde se almacenan los nutrientes necesarios para la emergencia de la yema apical. Esta planta llega a medir hasta 1 m. Su estatus dentro del país es como planta exótica, se ha encontrado asilvestrada en bosques mesófilos y de pino-encino. La planta de alcatraz se desarrolla de forma ideal en clima de los bosques mesofilo de montaña, en donde todo el año se presenta condiciones de constante humedad, suelos profundos y abundante materia orgánica. La altitud ideal es de 600 a 2600 m s.n.m., temperaturas promedio de 12 a 23 °C y precipitación media anual de 1500 a 3000 mm (Hernández, 2013).

3.11. Temperatura

Una condición básica para la vida es que se disponga de calor suficiente y proporcionado. Cada proceso vital está determinado a unos límites de temperatura y una temperatura óptima de funcionamiento, de modo que si sobrepasa disminuye su rendimiento.

El crecimiento de las plantas es notablemente sensible a la temperatura a veces un cambio de pocos grados da lugar a un cambio significativo en la tasa de crecimiento, cada especie o variedad posee en cualquier etapa de su ciclo de vida y para cualquier conjunto de condiciones de estudio, una temperatura mínima por debajo de la cual no crece, una temperatura óptima (rangos de temperatura) a la cual crece a máxima velocidad y una temperatura máxima por encima de la cual la planta no crece e incluso puede morir (Salisbury & Ross, 2000).

El grado de daño que las plantas sufren por las temperaturas bajas depende de:



- a) El grado y duración de la temperatura mínima
- b) La brusquedad del cambio
- c) El acondicionamiento fisiológico producido por el enfriamiento, el nivel de nutrición mineral, el contacto de humedad de los tejidos y la duración del día y de las adaptaciones estructurales (Daubenmire, 1979).

En los humedales la temperatura es un factor muy influyente, ya que el rendimiento del proceso de tratamiento es muy sensible a este factor, además de que los principales mecanismos de tratamiento son biológicos, por lo que el aumento de temperatura generalmente aumenta la eficiencia del tratamiento (Huang, *et al.* 2013). En condiciones óptimas favorece a la biodegradación de los compuestos orgánicos e inorgánicos o materia contenida en el agua residual, además influye en la tasa de crecimiento biológico, las reacciones químicas y solubilidad de los nutrientes (López, 2013). Los procesos biológicos como el desarrollo bacteriano se aceleran cuando la temperatura incrementa y desaceleran cuando disminuye. El rango óptimo de actividad bacteriana se da de 25-35 °C. Cuando la temperatura se acerca a 50 °C provocan que los procesos de digestión aerobia y la nitrificación bacteriana se detenga, de igual manera, cuando la temperatura es menor a 5°C la actividad microbiana se inhibe (García & Mora, 2013).



4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las plantas son parte fundamental de un humedal construido, una de sus funciones principales es su efecto amortiguador de las temperaturas extremas y otros fenómenos atmosféricos, ya que aísla la superficie del agua, intercepta lluvia y nieve, y reduce las pérdidas de calor que eventualmente se producen por el viento (Vymazal & Kropfelova, 2005). Diversas reacciones biológicas como la remoción de DBO, nitrificación y desnitrificación dependen de la temperatura. Las pérdidas por convección debidas a la acción de viento sobre las superficies abiertas, pueden ser significativas, pero este no es el caso de muchos de los humedales que cuentan con una buena densidad de vegetación y una capa de restos de esta (De La Orta & Muñoz, 2011).

Por otra parte las plantas en condiciones climáticas adecuadas pueden crecer rápidamente durante todo el año y por lo tanto, ser altamente productivas. Las bajas temperaturas limitan el crecimiento (Miller, 2007), por lo que la producción de biomasa es menor comparada con climas cálidos, algunos criterios de selección de la vegetación es que deben establecerse a las condiciones climáticas locales, para crecer con facilidad y generar gran cantidad de biomasa.

En el campamento de pesca Arcoíris ubicado en el municipio de Sta. Rita Tlahuapan Edo. de Puebla se presentan temperaturas que fluctúan entre de 3 a 22 °C (Zariñana, 2011), aunque se ha reportado en el sitio temperaturas por debajo de 0°C debido a ello se ha complicado el establecimiento vegetal dentro del humedal, ya que ha ocasionado el lento crecimiento y la muerte de los individuos.

En un trabajo previo se plantaron tres especies en este sitio donde *Canna indica* tuvo el mayor porcentaje de sobrevivencia, además de presentar mayor generación de biomasa (López, 2013). Debido a que esta planta ha sido aclimatada previamente se puede trasplantar a otros módulos del humedal esperando que el tiempo de establecimiento sea más corto, la sobrevivencia mayor, el crecimiento más rápido y por lo tanto mayor generación de biomasa vegetal.



5. JUSTIFICACIÓN

Las plantas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos. Entre estas propiedades tenemos los efectos físicos como la estabilización y la prevención de obstrucción del sistema. Además proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano. Otra función es el transporte de oxígeno del tallo a la raíz incrementando los valores de oxígeno disuelto dentro del sistema (Rosado, 2010). Dentro del humedal construido las plantas forman parte de los procesos de tratamientos del agua debido a su alta capacidad de eliminación de contaminantes a través de la asimilación y almacenamiento directo, o indirectamente mejorando las transformaciones microbianas tales como la nitrificación (a través de la liberación de oxígeno a la zona de la raíz) y desnitrificación (a través de la producción de sustratos de carbono) (Tanner, 1996). Se ha demostrado que la eliminación de contaminantes es mayor cuando el humedal construido presenta vegetación (Baskar *et al.* 2009). Los contaminantes son aprovechados como nutrientes que se incorporan a las plantas contribuyendo al incremento de la biomasa vegetal. Esta biomasa puede ser aprovechable para diversos fines.

También tener plantas dentro del humedal proporciona beneficios adicionales como la producción de biomasa vegetal que se puede obtener productos a través de su cosecha. Debido al clima que se presenta en la zona de estudio es necesario evaluar el desarrollo de las plantas trasplantadas y conocer el impacto que tiene la temperatura en el crecimiento además de comprobar si las plantas platanillo y alcatraz tienen más posibilidades de sobrevivencia si estas son aclimatadas previamente.



6. HIPÓTESIS

Si se realiza el trasplante de plantas previamente aclimatadas al sitio de estudio a un humedal construido de flujo subsuperficial con temperaturas entre 3 °C a 22 °C, el periodo de establecimiento será más corto y por lo tanto habrá un rápido crecimiento y generación de biomasa.

7. OBJETIVOS

General

Medir la sobrevivencia, el crecimiento y generación de biomasa vegetal de dos módulos de un humedal de flujo sub-superficial de las plantas *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*, en donde la temperatura fluctúa entre 3 a 22 °C, así como el comportamiento del contenido de nitrógeno y fósforo en los caudales de entrada y salida del sistema de tratamiento.

Específicos:

- Establecer la vegetación en dos módulos del humedal construido por medio del trasplante de productos cosechados.
- Registrar las medidas estructurales de las plantas: altura y cobertura de manera mensual.
- Obtener el peso húmedo y seco de la parte aérea de las dos plantas.
- Desarrollar un modelo de estimación indirecta de biomasa para *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*.
- Calcular la tasa de crecimiento relativo de las dos especies.
- Evaluar la sobrevivencia de las especies previamente aclimatadas.
- Comparar el crecimiento de las plantas entre los módulos del humedal construido y entre especies.
- Valorar el contenido de nitrógeno y fósforo en el caudal de entrada y salida para analizar el comportamiento de concentración de dichos elementos.
- Obtener el porcentaje de remoción de acuerdo al caudal de entrada y salida de nitrógeno total, nitritos, nitratos, fósforo (Ortosoluble, hidrolizable y total), sólidos totales, sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sólidos totales volátiles.

8. ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Santa Rita Tlahuapan se ubica al noreste de la región del Valle Central de Puebla, colindando con el municipio de San Salvador el Verde, al este con los municipios de San Matías Tlalancaleca y el estado de Tlaxcala y al oeste con el estado de México, en las coordenadas $19^{\circ} 22' 18.08''$ latitud Norte y $98^{\circ} 37' 26.94''$ longitud Oeste a 2,640 m s.n.m. El municipio cuenta con una extensión territorial de 30,933 hectáreas y su población oscila en 31 mil 665 habitantes teniendo una densidad de 106 hab/km² integrada por 26 comunidades rurales y 6 urbanas. Por otra parte el grado de marginación es medio. Tlahuapan cuenta con servicios de

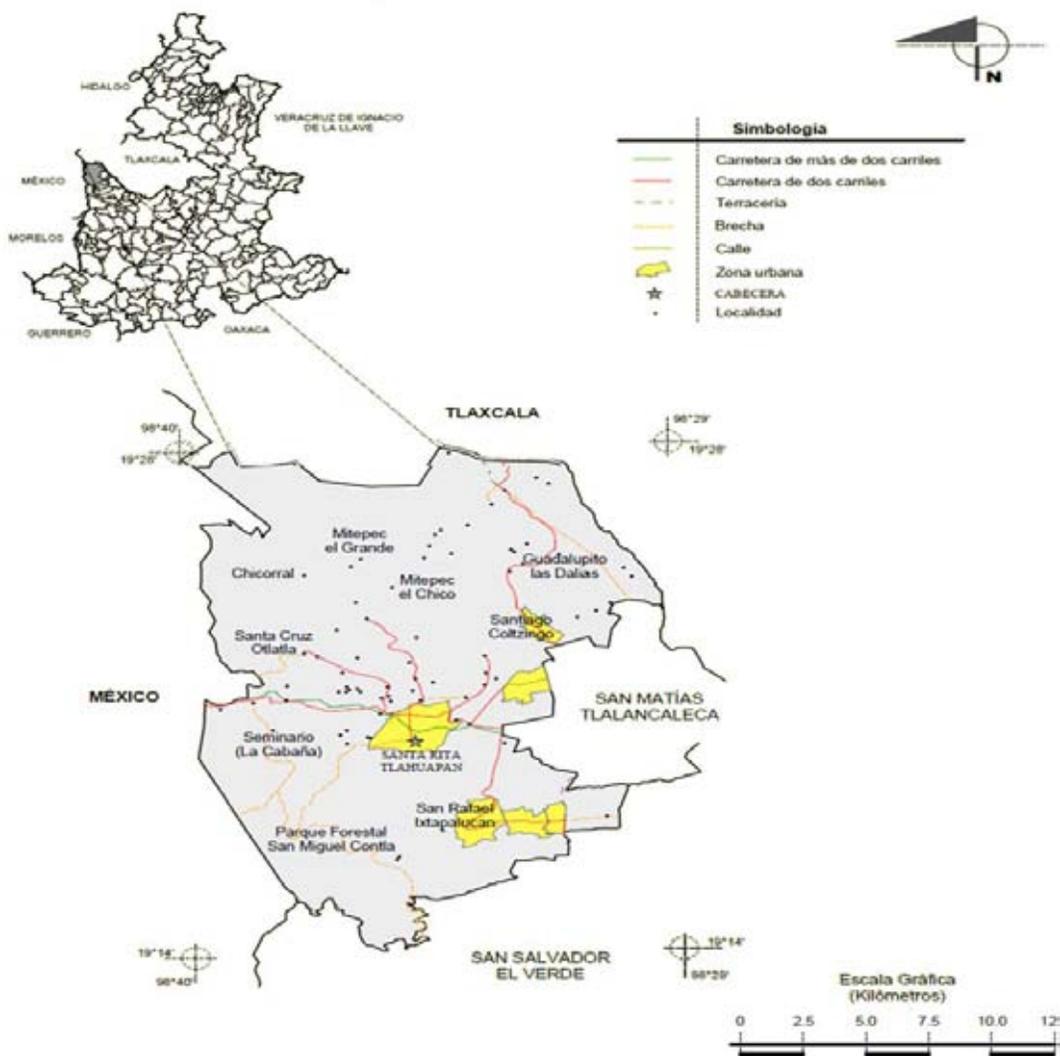


Figura 4. Ubicación del municipio de Santa Rita Tlahuapan del estado de Puebla (INEGI, 2009).

electricidad (94.8%), aguas entubadas (89.5%) y drenaje (64.7 %) (H. Ayuntamiento de Tlahuapan, 2012).

8.1. Arcoíris Sport Fishing

Arcoíris Sport Fishing es un centro de recreación donde se llevan a cabo actividades de pesca deportiva. El agua que se recibe para la crianza de los peces proviene del río Otlata. Dentro de este centro se puede encontrar para el tratamiento del agua, un sistema de humedales construidos que está conformado por cuatro humedales de flujo sub-superficial (figura 5).

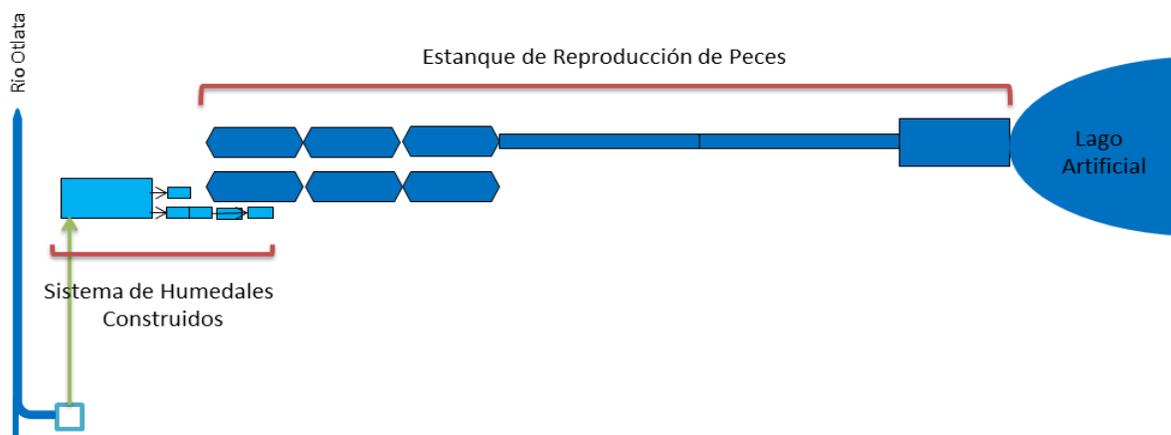


Figura 5. Mapa del sistema de humedales construidos, estanques de reproducción de peces y lago artificial dentro de centro recreativo Arcoíris.

8.2. Medio físico-biótico

El municipio de Santa Rita Tlahuapan pertenece al macizo montañoso de la Sierra Nevada, la cual es parte del eje Neo-volcánico Transversal. Esta sierra es parte de las aguas donde derivan cuencas y subcuencas que abastecen tanto el océano Atlántico como océano Pacífico. Tlahuapan se encuentra en la región hidrológica número 18 (Ríos Balsas) en él, se inserta la zona madre de la subcuenca de río Atoyac-Zahuapan, la cual se conforma por varios arroyos y manantiales, provenientes del deshielo del volcán Iztaccíhuatl y de la precipitación de la zona. La recarga de acuíferos de estas zonas abastece a la parte de la ciudad de México y al valle de Puebla y Tlaxcala (Lara, 2010).



8.3. Clima

Existen tres tipos de clima en el municipio de acuerdo con la altitud en el rango de los 2500 a los 4500 msnm estos son: el clima semifrío húmedo, el templado subhúmedo con verano fresco largo y templado sub húmedo con régimen de lluvias en verano. La precipitación se encuentra en el rango de 700 a 1500 mm en el periodo de junio a septiembre, además la zona se ve impactada por fenómenos de heladas, ciclones tropicales, frentes fríos, así como sequías y granizadas (Lara, 2010).

8.4. Suelos

Los suelos en su mayor parte se conforma por cambisoles y andosoles, son los que más abundan en el municipio y en ellos se establece vegetación como pino, oyamel y encino. Los regosoles también están presentes pero en menor proporción ubicándose en límite inferior del bosque y en zonas medias, inferior y submontano en donde se lleva a cabo actividades agrícolas (Lara, 2010).

8.5. Hidrología

La subcuenca Atoyac se extiende principalmente sobre el estado de Puebla en torno del río Atoyac que escurre de poniente a oriente, el cual nace en Puebla por los deshielos y escurrimientos de la Sierra Nevada con dirección sureste. Por otra parte, la subcuenca Zahuapan, donde corre el río del mismo nombre de norte a sur, se dibuja en su totalidad sobre municipios del estado de Tlaxcala. Estas dos corrientes principales componen el Sistema Atoyac-Zahuapan, confluyendo ambos a la altura de Xilotzingo en el estado de Tlaxcala, continuando a través del estado de Puebla hacia el sur de su ciudad capital (Soto, 2009).

8.6. Vegetación

Los principales tipos de vegetación en la zona son bosque de pino-encino, bosque de pino, pastizales y matorral secundario. Existen entre los pinos ejemplares de *Pinus leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. ayacahuite* y en menos cantidad *P. patula*. También hay otros árboles como son: encinos, ilite, sabino, madroño, cedro blanco, capulín y tepozán entre

los principales. El estrato herbáceo se compone de gramíneas como Acaxaca, zacatón rastrero y zacatón de raíz, además compuestas como son: escola de monte, senecio, hierba de borrego y perilla entre otras (Lara, 2010).

9. MÉTODO

9.1. Campo

Durante la fase de campo se tomaron dos módulos del humedal construido donde aún no se había establecido la vegetación (figura, 7). En cada módulo se estableció la vegetación por medio del trasplante de plantas previamente aclimatadas a las condiciones de sitio (platanillo y alcatraz). Posteriormente se realizó la medición mensual de cada planta introducida, adquiriendo las medidas estructurales (cobertura y altura). De igual forma se efectuó el mantenimiento de cada módulo, donde por medio del aclareo y poda se obtuvo el material vegetal que se pesó por medio de una balanza portátil para cuantificar el peso húmedo. También se realizó un registro mensual del número de individuos vivos.



Figura 6. Módulo 1 y módulo 2 ubicados en los sistemas de humedales en campamento Arcoíris Puebla.

En los dos puntos indicados en la figura 7 se colectaron cuatro muestras correspondientes al afluente y efluente de cada módulo. De acuerdo con las NOM's (tabla 3), las muestras fueron colectadas en recipientes de polietileno de 1 L y botellas de DBO de vidrio. Además, se midió el pH con un pH-metro (0 a 14) y la temperatura *in situ* con un termómetro de inmersión parcial (-10 a 120 °C).

Posteriormente el material vegetal y las muestras de agua fueron transportados al laboratorio de Proyectos Ambientales ubicado en FES Zaragoza para su análisis.

Mapa del sistema de humedales Contruidos y puntos de Muestreo

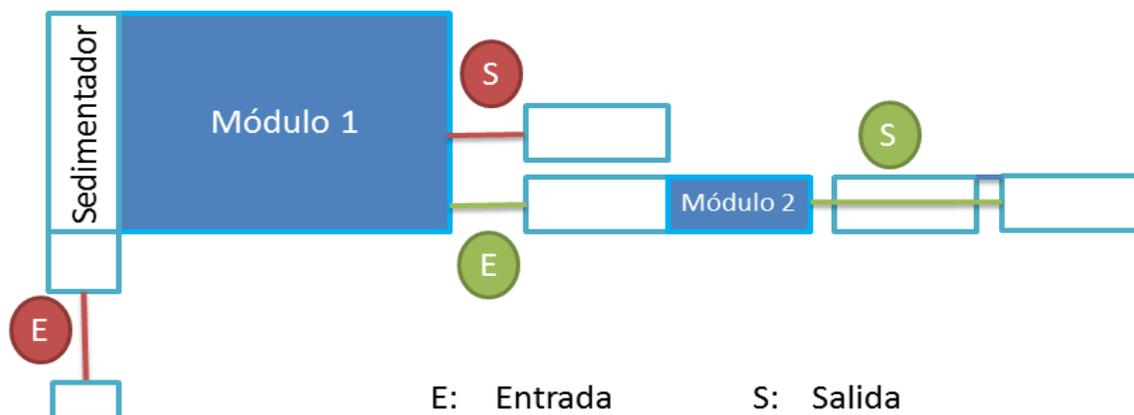


Figura 7. Mapa del sistema de humedales y puntos de muestreo. Los óvalos rojos indican los puntos de muestreo para el módulo 1 y los óvalos verdes indican los puntos de muestreo para el módulo 2.

9.2. Laboratorio

El material vegetal colectado en campo, se pesó en una balanza granataria (2,610 g), consecutivamente se colocó el material en bolsas de papel y se introdujeron las muestras en un horno de secado por 24 a 72 horas a temperatura de 60°C y al finalizar el secado, se pesó nuevamente para así obtener el peso seco (Cronk & Stobhsn, 2001).

Por otra parte, las muestras de agua se trabajaron conforme a las técnicas de las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Españolas indicadas en la tabla 3. Todos los datos obtenidos de cada muestreo mensual fueron registrados en una base de datos para su análisis.



Tabla 3. Parámetros de Medición de Contaminantes: Muestreo, Recolección, Preservación, Transporte y almacenamiento basado en las Normas Oficiales Mexicanas y Normas Españolas (DOF, 2000; DOF, 2001; DOF, 2001a; DOF, 2001b; DOF, 2006; DOF 2006b; DOF, 2008; DOF, 2011; Gómez *et al.*, 2014; AENOR, 1998; AENOR, 1994; APHA, 1992).

Norma	Parámetro	Recolección	Preservación	Transporte	Almacena- miento
NMX-AA-003-1980	Muestreo	Envases de polietileno o vidrio	De acuerdo al análisis	4 °C	De acuerdo al análisis
NMX-AA-007-SCFI-2000	Temperatura	Envase de polietileno 1L	Sin conservador	X	X
NMX-AA-008-SCFI-2000	pH	Envase de polietileno 1L	S/C	X	X
NMX-AA-034-SCFI-2001	Sólidos	500 mL Envases de polietileno	S/C	4 °C	7 días
UNE-EN 25813 1994	Oxígeno disuelto	150-300 mL Frasco Winkler	MnSO _{4(ac)} 2,25 M	4 °C	1 día
APHA 5220-D	DQO	Envase de polietileno 1L	H ₂ SO ₄ pH ≤ 2,0	4 °C	28 días
NMX-AA-026-SCFI-2001	Nitrógeno total	2,0 L Envase de polietileno	H ₂ SO ₄ pH ≤ 2,0	4 °C	7 días
Manual LIB IV FESZ	Nitratos	2,0 L Envase de polietileno	H ₂ SO ₄ pH ≤ 2,0	4 °C	7 días
NMX-AA-099-SCFI-2006	Nitritos	2,0 L Envase polietileno	H ₂ SO ₄ pH ≤ 2,0	4 °C	1 día
PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008	Fósforo	Envase de polietileno 1L	H ₂ SO ₄ pH ≤ 2,0	4 °C	28 días
UNE-EN 1899-2 1998	DBO ₅	150-300 mL Frasco Winkler o similar	MnSO _{4(ac)} 2,25 M	4 °C	1 día

9.3. Gabinete

Se realizó la búsqueda bibliográfica acerca de los siguientes temas.

- Humedales naturales
- Humedales construidos y su clasificación.
- Criterios para elección de vegetación.
- Establecimiento vegetal y producción de biomasa.
- Índices de crecimiento
- Características biofísicas del estado de Puebla y zona de estudio.

Al culminar el trabajo de campo todos los datos obtenidos se registraron en una base de datos en Excel 2013 para su análisis y generación de gráficos.

9.3.1. Porcentaje de supervivencia

Este parámetro se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Porcentaje de Supervivencia} = \frac{\text{Número de individuos finales}}{\text{Número de Individuos Iniciales}} \times 100$$

(Rodríguez, 2013).

9.3.2. Cobertura

Con el registro del diámetro de norte a sur y este a oeste de las plantas se obtuvo la cobertura de cada ejemplar aplicando la fórmula propuesta por Enríquez, (2008) que define la cobertura como el área ocupada por cada especie la cual es calculada a partir de la medición de dos diámetros perpendiculares de las copas utilizando la siguiente fórmula:

$$C = [(d_1 + d_2)/4]^2 \pi$$

Dónde: C = Cobertura

d₁= Primer diámetro de cobertura de la copa

d₂= Segundo diámetro de cobertura de la copa que cruza en forma perpendicular a d₁.

9.3.3. Tasa de Crecimiento Relativo (TCR)

La TCR se obtuvo a partir del registro de la altura por mes de cada planta empleando la fórmula propuesta por Leopold & Kriedemann (1975) citado por Aristizábal (2008):

$$TCR = \frac{\ln A_2 - \ln A_1}{T_1 - T_2}$$

Ln: logaritmo natural

A_1 y A_2 = alturas de las plantas en lecturas sucesivas

T_1 y T_2 = Tiempos de lecturas

9.3.4. Análisis Estadístico

Para el análisis estadístico del crecimiento vegetal se creó una base de datos con la altura y tasa de crecimiento relativo (TCR) en el programa estadístico IBM SPSS Statistics 22. Para conocer el tipo de análisis estadístico que se le aplicarían a las muestras se empleó la prueba de normalidad Shapiro-Wilk. En base a esta prueba se decidió aplicar t de student para las muestras que siguieron una distribución normal y la prueba U de Mann-Whitney para aquellas muestras que no siguieron una distribución normal. La comparación estadística se realizó entre módulos y especies y para tener una representación, se generaron graficas de caja y bigote con muesca por cada comparación.

9.3.5. Estimación de la biomasa vegetal

Se empleó un modelo que consiste en relacionar la biomasa de la especie con alguna medida estructural (cobertura, altura o biovolumen) y así generar una ecuación predictiva que relacione estas medidas con la biomasa (figura, 8). Para ello, se graficaron las medidas derivadas de la siguiente forma:

- Altura vs biomasa seca.
- Diámetro vs biomasa seca.
- Biovolumen vs biomasa seca

Posterior se buscó un modelo (lineal, exponencial, logarítmico, potencial o polinómico) que arrojara un coeficiente R^2 más cercano a 1. El biovolumen aparente se obtuvo como el producto entre la cobertura y la altura de la vegetación ajustando la forma de la planta a la de un cilindro ($a \cdot h$) (Espinoza & Raya, 2011; Castro *et al.* 1996).

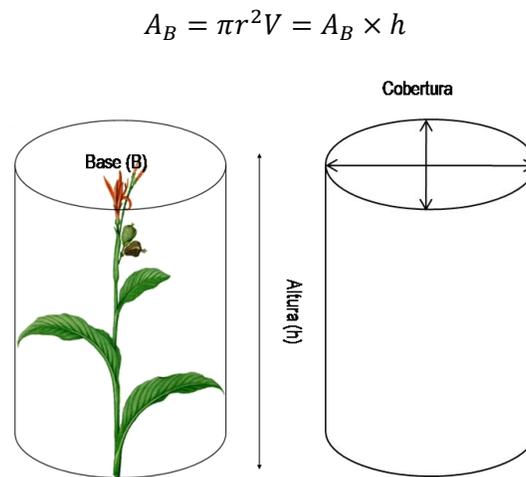


Figura 8. Medidas estructurales requeridas para el cálculo del biovolumen ajustado para un cilindro. V = Volumen, A_B = Área basal, h = altura (Espinoza & Raya, 2011).

9.3.6. Agua

Después de haber procesado las muestras de agua, los datos obtenidos fueron registrados en una base de datos en Excel 2013 donde se les aplicó las fórmulas indicadas en las NOM's (tabla 3). Con los datos obtenidos se generaron gráficos.

También se obtuvo el porcentaje de remoción de acuerdo con la fórmula propuesta por la asociación internacional del agua:

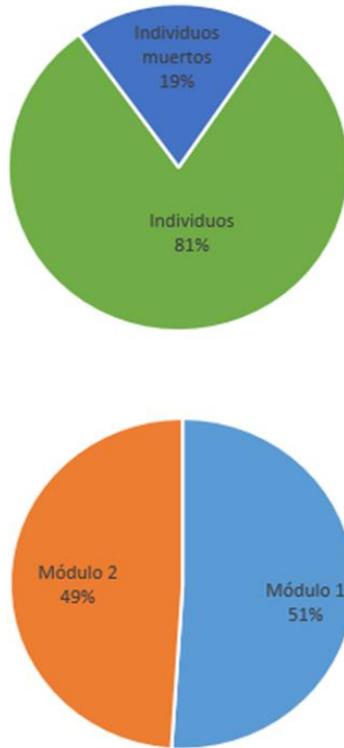
$$E = \frac{C_i - C_o}{C_i} * 100$$

E = Eficiencia (%)

C_i = concentración de entrada (mg / L)

C_o = concentración de salida (mg / L) (Barbera *et al.*, 2009).

% de supervivencia total de individuos



	Individuos iniciales	Individuos finales	%de supervivencia
Módulo 1	57	47	82.46
Módulo 2	67	53	79.10
Total de Individuos	124	100	80.65

Figura 9. Porcentaje de supervivencia del total de plantas instaladas en el campamento Arcoiris.



Figura 10. Módulo 2 se observa que este módulo no presenta protección.

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Los resultados obtenidos para las plantas ornamentales *Canna indica* y *Zantedeschia aethiópica* en los módulos 1 y 2 son los siguientes:

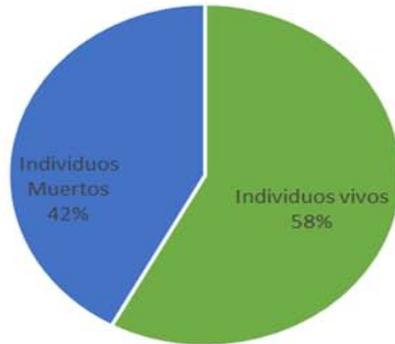
10.1. Supervivencia

De las 124 plantas situadas en los módulos 1 y 2, el porcentaje de supervivencia fue de 81 (figura 9).

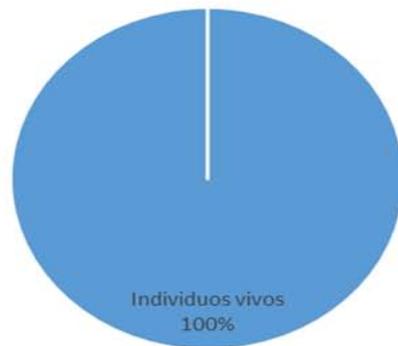
El módulo 1 registró 51 % de supervivencia, mayor al del módulo 2. Las condiciones del módulo 1 como protección al viento, lluvia y heladas influyeron para que las plantas registraran menor estrés, por lo que tuvieron un periodo de aclimatación más exitoso. La exposición directa de las plantas a granizadas y heladas registradas en los meses de julio a octubre influyeron en el porcentaje de supervivencia en el módulo 2 ya que no contaba con un techo o cubierta (figura 10).

En la Figura 11 se observa que *Zantedeschia aethiópica* registró 100 % de supervivencia, debido al tiempo de aclimatación, ya que fue colocada desde el año 2010 en la zona de estudio (García & Mora, 2013).

% de supervivencia de *Canna Indica*



% de supervivencia de *Zantedeschia aethiopica*



<i>Canna Indica</i>	Individuos iniciales	Individuos finales	% de supervivencia
Módulo 1	31	21	67.74
Módulo 2	26	12	46.15
Total de Individuos	57	33	57.89

<i>Zantedeschia aethiopica.</i>	Individuos iniciales	Individuos finales	% de supervivencia
Módulo 1	26	26	100
Módulo 2	41	41	100
Total de Individuos	67	67	100

Figura 11. Porcentaje de supervivencia de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*.

Mientras que *Canna indica* presentó 58 % de supervivencia debido al estrés por trasplante que se realizó durante la temporada fría en noviembre del 2012, en consecuencia, se registraron 12 muertes, cabe señalar que *Canna indica* se reporta como sensible a heladas y vulnerable a bajas temperaturas (Lei *et al.*, 2004).

El mayor porcentaje de muerte lo exhibieron los individuos del módulo 2, donde, de 26 plantas iniciales solo sobrevivieron 12. Entre los factores principales que influyeron en los decesos, se encuentran la temperatura y el periodo de trasplante, ya que se registraron heladas desde -8 °C, y *Canna indica* resiste temperaturas de -5 °C (PFAF, 2004). Por otra parte, la temporada ideal para trasplantar los rizomas es a finales del período frío o a principio de la época seca y en este estudio el trasplante se realizó en el mes de noviembre.

Otro factor importante que influye en la supervivencia, es la protección de los módulos del sistema, ya que este factor favorece a las plantas en una zona donde existe clima extremo, esto se aprecia en el trabajo de López (2013) que registró una supervivencia del 91

favorece a las plantas en una zona donde existe clima extremo, esto se aprecia en el trabajo de López (2013) que registró una supervivencia del 91

‰ para *Canna indica* en la zona de estudio, ya que el módulo tenía protección al viento y a heladas. A pesar de que las plantas utilizadas en este trabajo, estaban previamente aclimatadas, la exposición al clima extremo, período y el estrés del trasplante influyeron significativamente en la supervivencia de esta especie.

10.2. Altura de las especies

10.2.1. Altura de *Canna indica* (platanillo).

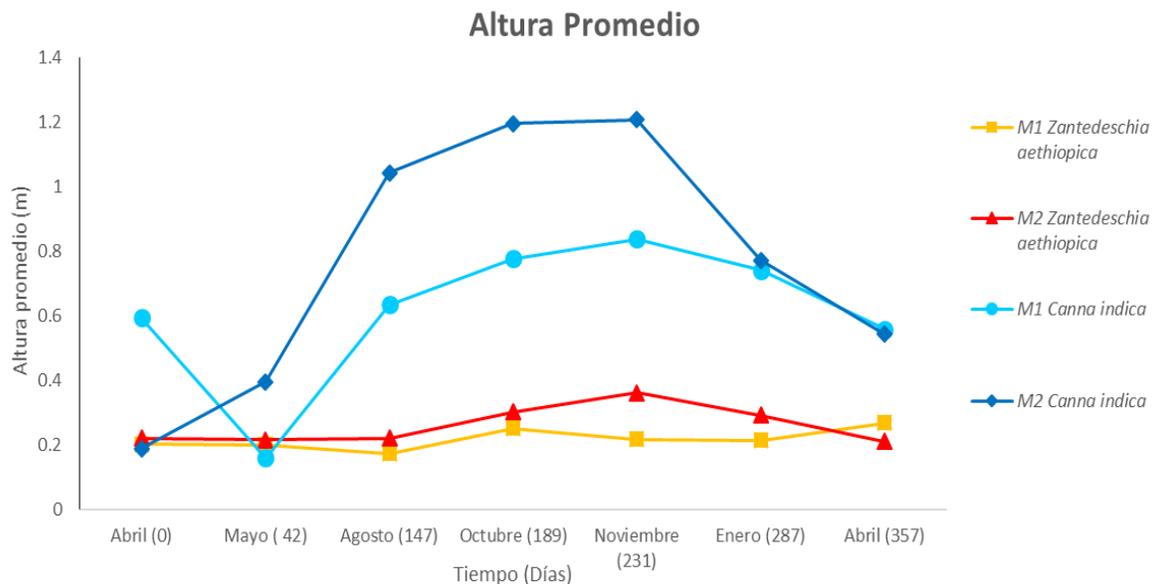


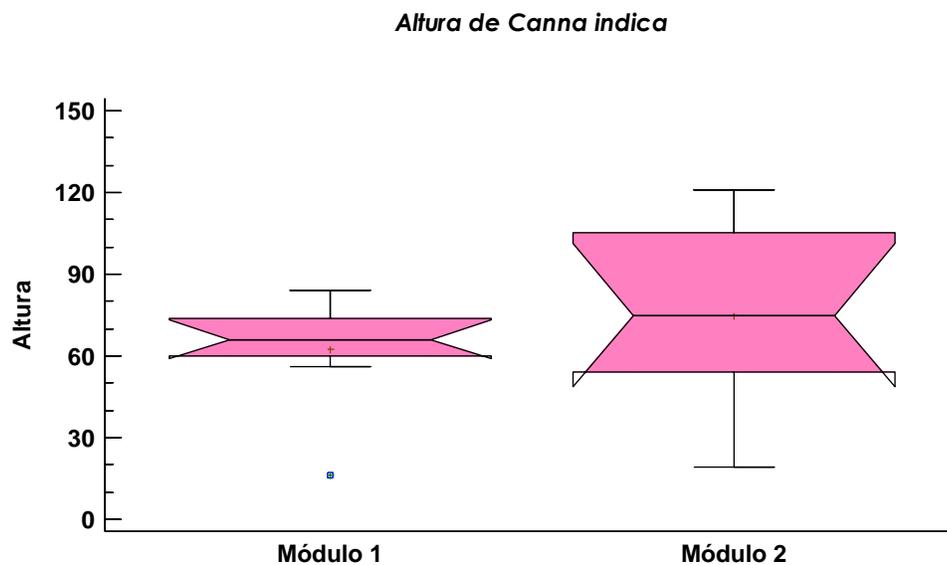
Figura 12. Altura promedio de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*.

La altura máxima para *Canna indica* se obtuvo durante los meses de agosto a noviembre logrando un promedio máximo de 1.20 m en módulo 2 y 0.83 m para módulo 1.

En la figura 12 se observa que las alturas menores se presentaron al inicio del estudio, en enero y abril del 2014 que pertenecen a la temporada fría. También se aprecia que *Canna indica* mostró una mayor altura en M2, esta diferencia se atribuye a la ubicación de los módulos, donde M2 es una superficie con sombra, por lo que no está expuesto al sol directamente, que de acuerdo con Ludwing & Müller (1964) en condiciones de sombra las células de las plantas se alargan, por otro lado, si las plantas están expuestas

al sol y la intensidad de luz es alta estas tienden a reducir la velocidad de crecimiento lo que ocurre en M1.

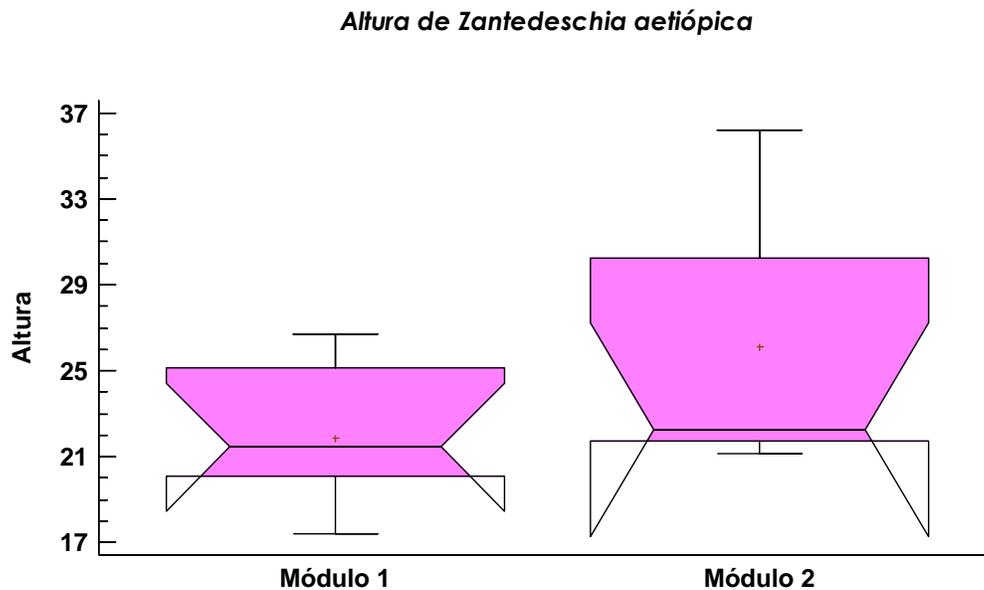
Para comprobar la existencia de diferencias en el crecimiento de *Canna indica*, entre módulo 1 y 2 observadas en la figura 12, se aplicó la prueba estadística U de Mann-Whitney para muestras independientes (anexo 6). La prueba mostró un nivel de significancia de $P=0.605$ por lo no existen diferencias en la altura obtenida de los individuos colocados en módulo 1 y 2. En cuanto a la figura 13, se observa que la mediana del módulo 2 es mayor al módulo 1. También se aprecia un caso atípico para M1 durante el mes de mayo 2013 (caso 3) con una altura promedio de 16 cm, siendo esta la altura mínima registrada durante el monitoreo. Este caso atípico se debe a que las plantas no resistieron el estrés del trasplante que se realizó en la época fría.



10.2.3. Altura de *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz)

Alcatraz alcanzó una altura máxima promedio de 36 cm para módulo 2 en noviembre y de 26 cm para módulo 1 en abril. Se registraron individuos de hasta 43 cm en M1 y 75 cm en M2, en el cual los meses que favorecieron el crecimiento de los organismos fueron de octubre a enero del 2014 y para M1 de octubre a abril.

En la figura 14 se muestra que la mediana de M2 es ligeramente mayor que M1, lo que indica que alcatraz tuvo una altura promedio mayor en M2. A pesar de esta diferencia se encontró una $t=-1.704$ con un nivel de significancia $P=0.122$, por tanto se asume que las medias son iguales y no existen diferencias en la altura obtenida en M1 y M2 (anexo 5)



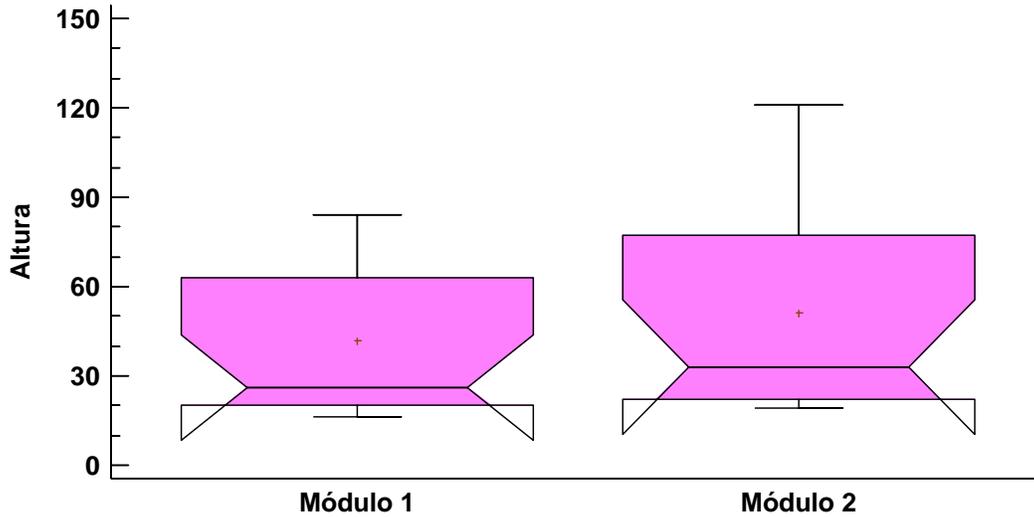
10.2.3. Altura total

Ambas especies se vieron favorecidas en los meses de agosto a enero. *Canna indica* alcanzó una altura mayor que *Zantedeschia aethiópica* durante el monitoreo. En cuanto al total de individuos por módulo se muestra en la figura 15 que la mediana de M2 es mayor que M1, por tanto, la altura del módulo 2 es ligeramente mayor. En cuanto a la igualdad de medias, en vista que el nivel de significancia fue de $P=0.401$ en la prueba de U de Mann-Whitney se asume que no hay diferencias significativas entre la altura de las plantas en ambos módulos (anexo 7).

Por otra parte, se encontró que existe una diferencia significativa entre el platanillo y alcatraz con una $t=-5.151$ y $P=0$ (anexo 8), esta diferencia de alturas de debe al tipo de crecimiento que presenta cada especie, ya que de acuerdo con lo reportado por Conabio (2009) *Canna indica* y *Zantedeschia aethiópica* alcanzan una altura máxima de 3.5 m y 1 m

respectivamente (figura 16). En la figura 16, platanillo presentó una distribución simétrica con una mediana entre los 60 cm. alcatraz por otro lado

Altura total entre módulos



TCR total entre especies



10.3. Cobertura

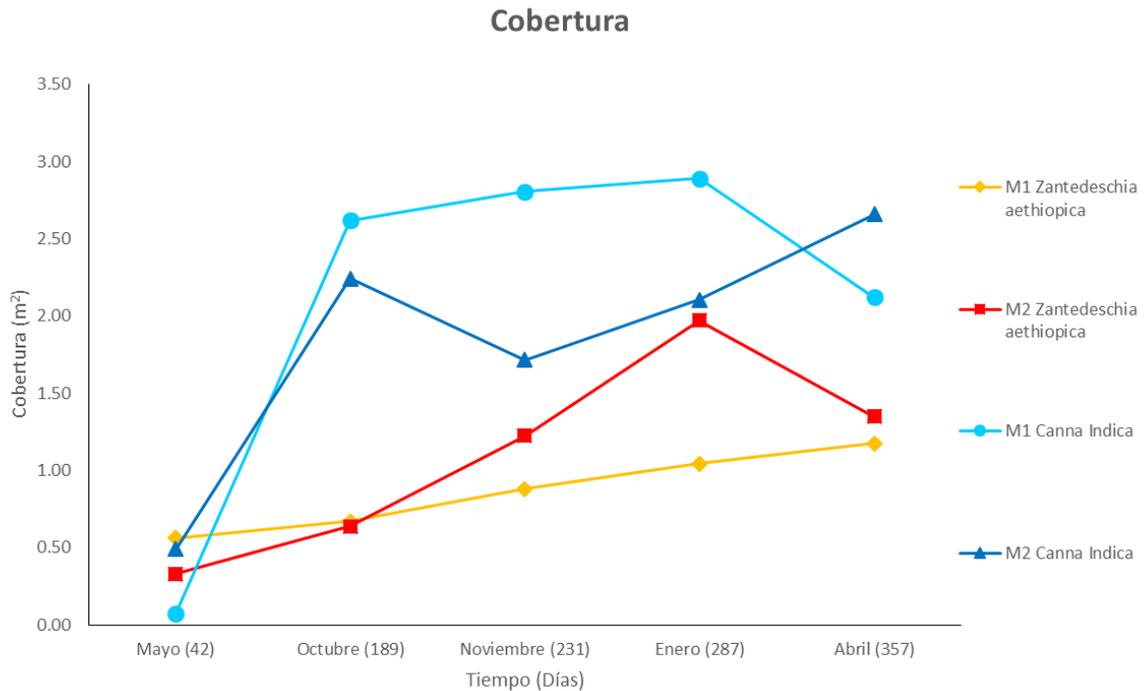


Figura 17. Cobertura promedio de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica* en metros.

Canna indica presentó mayor cobertura que *Zantedeschia aethiopica*. En módulo 1 platanillo alcanzó su cobertura máxima en el mes de enero con 2.89 m² y módulo 2 en el mes de abril con 2.66 m². Para alcatraz la cobertura máxima en M1 fue en abril con 1.18 m², mostrando un incremento gradual en este módulo, ya que su cobertura inicial fue de 0.56 m² y no se registró una disminución en otros meses. Para M2 alcatraz obtuvo su cobertura máxima en enero con 1.97 m² (figura 17).

En cuando a los módulos, M1 logró una cobertura de 3.93 m² (de 63 m²) con el 6.25 %, mientras tanto M2 obtuvo de



Figura 18. Módulo 2 platanillo muestra hojas rasgadas por granizada en octubre.

cobertura 4.01 m^2 (de 18 m^2) que corresponde al 22.6 %. Para ambas especies la cobertura mínima se obtuvo en el mes de mayo (alcatraz: 0.33 m^2 en M2 y platanillo: 0.07 m^2 en M1) debido al estrés por las bajas temperaturas en la temporada fría. Por otro lado, platanillo en noviembre tuvo una disminución importante de cobertura donde se obtuvo 1.72 m^2 , esta disminución se debe a que se presentó una granizada en octubre, lo que ocasionó que las hojas se dañaran (figura 18).

10.4. Tasa de crecimiento Relativo (TCR)

10.4.1. TCR de *Canna Indica*

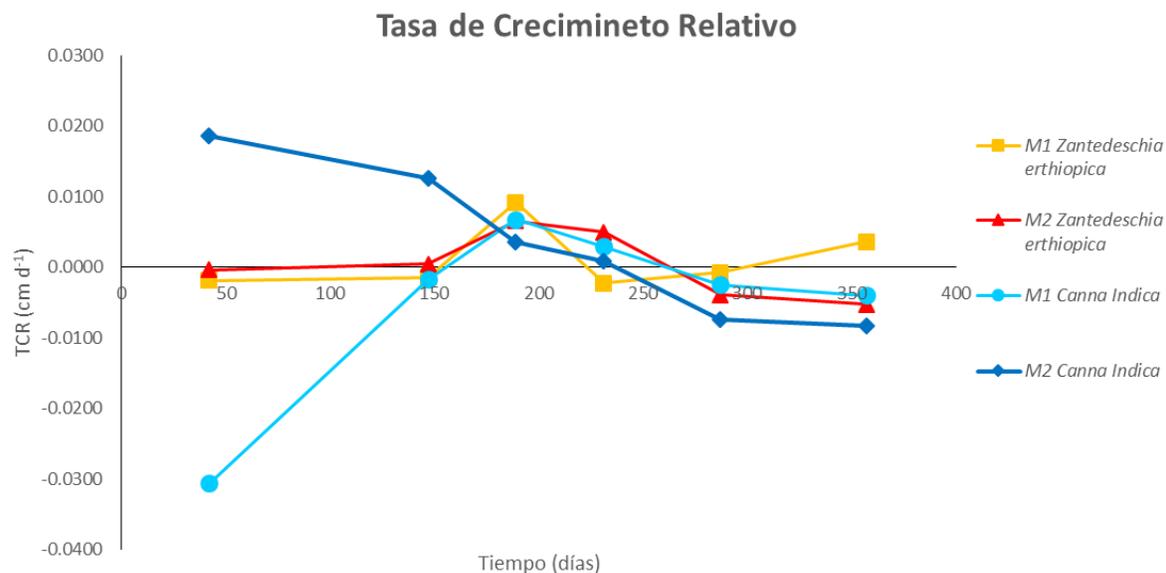
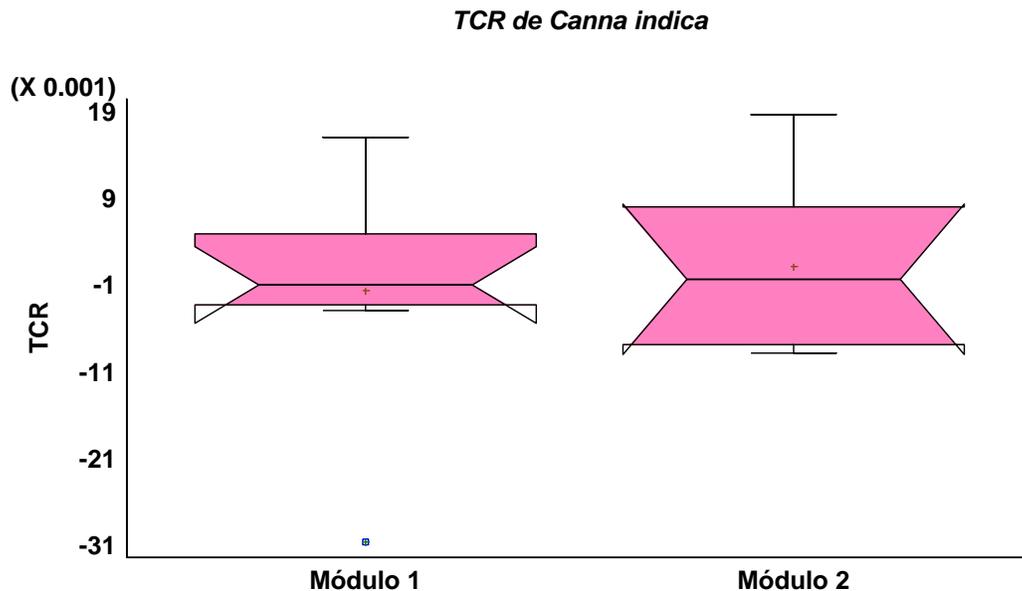


Figura 19. Tasa de crecimiento promedio de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica* en metros para M1 y M2. Mayo (42), agosto (147), octubre (189), noviembre (231), Enero (287) y abril (357).

Canna indica en M1 tuvo una TCR positiva en los meses de octubre y noviembre. La TCR máxima fue de $0.0068 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ en el mes de noviembre y mínima de $-0.0306 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ en mayo. Para módulo 2 la TCR fue positiva durante los meses de mayo a noviembre siendo mayo el que presentó una mayor TCR de $0.0186 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ y la mínima de $-0.0083 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ en abril (figura 19).

Como se presenta en la figura 20 la mediana de M1 fue ligeramente mayor que M2, por consiguiente, M1 presentó una mayor TCR, sin embargo se comprobó que no existen diferencias entre M1 y M2 (anexo 1), ya que se

obtuvo una $t=-0.475$ y un nivel de significancia de $P=0.642$. En cuanto al caso extremo (caso 2) que se muestra en el módulo 1, hace referencia a que en el mes de mayo se obtuvo la TCR promedio mínima de platanillo de $-0.0306 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ correspondiente a lo obtenido anteriormente en la altura promedio



10.4.2. TCR de *Zantedeschia aethiopica*.

En lo que respecta a alcatraz en M1 la TCR máxima se alcanzó en octubre con $0.0092 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ y la mínima en noviembre con $-0.0023 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$. En M2 se registró el punto máximo en noviembre con $0.0065 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ y mínimo en el mes de abril con $-0.0053 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$. Sin embargo, M2 presentó de agosto a noviembre una TCR positiva y M1 solo en octubre y abril. En cuanto a la figura 21, se observa que la mediana de módulo 2 es mayor que módulo 1, sin embargo, no existen diferencias significativas entre módulos ya que el nivel de significancia es de $P=1$ (U de Mann-Whitney) (anexo 2).

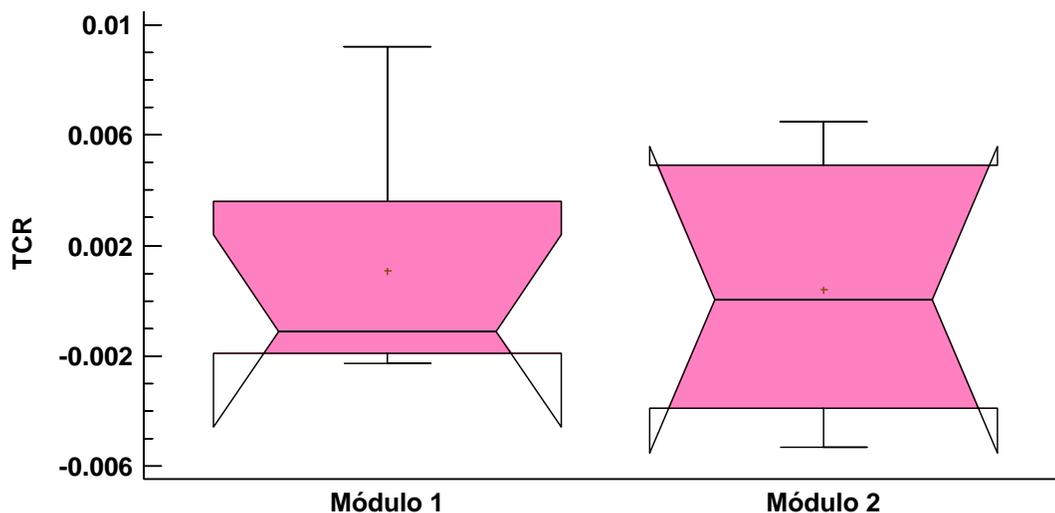
TCR de *Zantedeschia aetiópica*

Figura 21. TCR de alcatraz en módulo 1 y módulo 2.

10.4.3. TCR total

Las plantas de módulo 2 obtuvieron una TCR ($0.00183 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$) mayor que módulo 1 ($-0.00189 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$) como se muestra en la figura 22 donde la mediana de M2 es mayor que M1, sin embargo, al aplicar la prueba U de Mann-Whitney (anexo 3), no existen diferencias significativas entre los módulos con una $P=0.590$. En lo que respecta al caso extremo que mostró M1 en mayo 2013, la TCR obtenida fue de $-0.0306 \text{ cm día}^{-1}$.

Acerca de la TCR obtenida por especie, alcatraz mostró un promedio de $0.007 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ mayor al de platanillo que obtuvo una TCR negativa de $-0.008 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$. Con relación a la figura 23, *Canna indica* mostró un caso atípico (caso 13) a principios del proyecto donde su TCR fue de $-0.0306 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ que corresponde igualmente en lo mostrado en las figura 13 y 20. A pesar de que la mediana fue mayor en M2, estadísticamente no existen diferencias significativas en la TCR entre especies con una $t=0.401$ y $P=0.692$ (anexo 4).

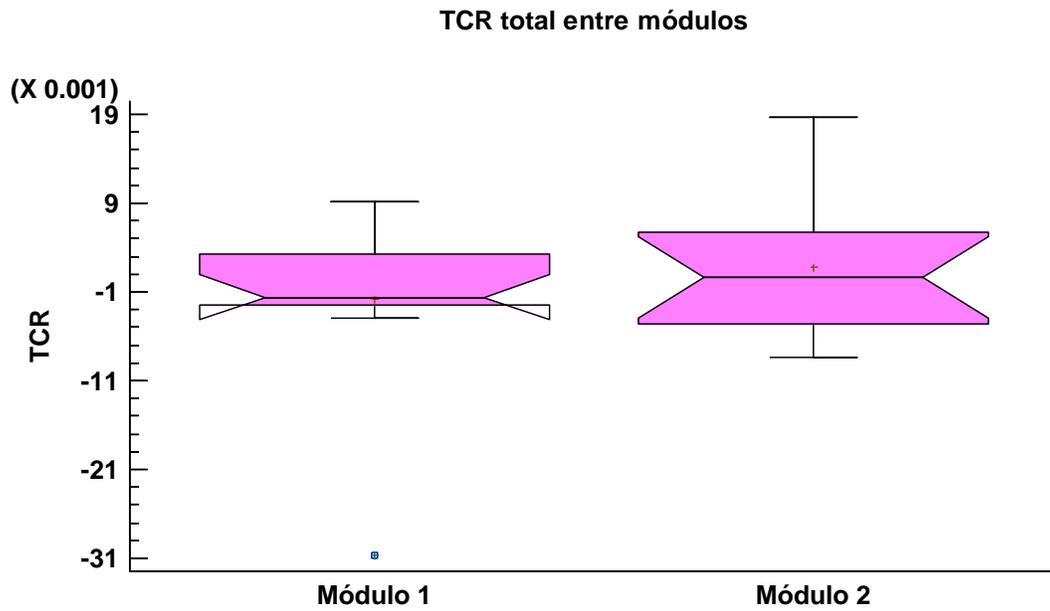


Figura 22. TCR promedio del total de individuos de M1 y M2. Caso extremo (*13).

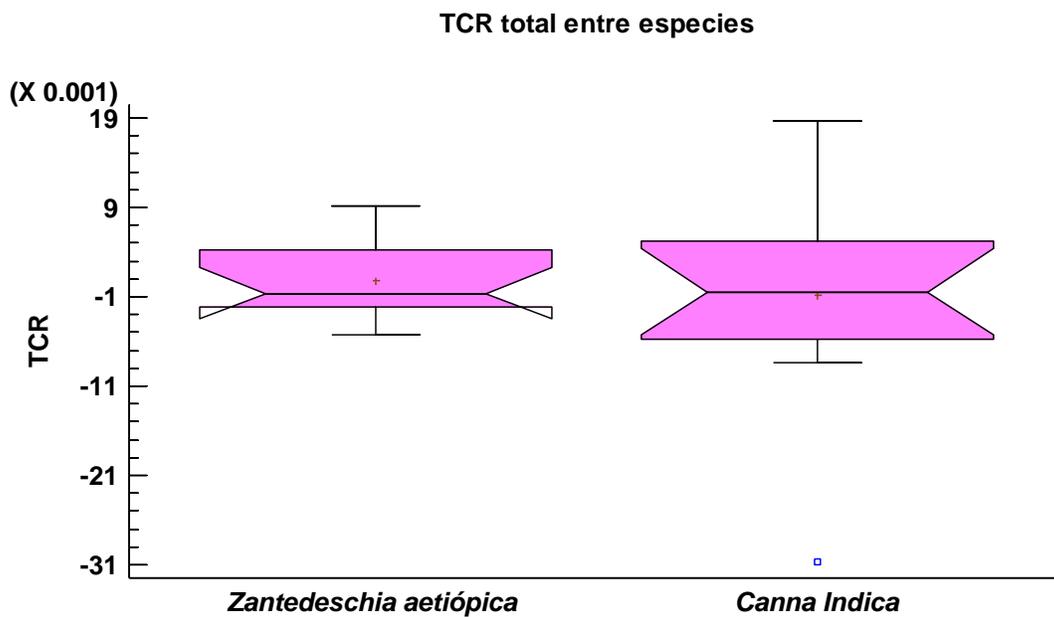


Figura 23. TCR promedio del total entre *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*. Caso Atípico (°13).



10.5. Discusión sobre el crecimiento de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica*.

Aunque platanillo y alcatraz son plantas tropicales, fueron exitosas en su aclimatación a las temperaturas que se presentan en Arcoíris (- 8 a 12 °C) esta característica se debe a su adaptación genética a temperaturas más frías que al asociarse a latitudes elevadas mejora la resistencia al frío por lo que pueden desarrollarse favorablemente (Taiz & Zeinger, 2006).

Como se observa en la figura 12 y 19 ambas especies y módulos muestran una disminución en la altura y TCR durante los meses de noviembre a abril correspondientes a la época fría donde la temperatura disminuye y las plantas pueden presentar estrés por enfriamiento y como consecuencia tener crecimiento lento (Taiz & Zeinger, 2006). Mientras que en los meses de mayo a octubre presentaron un incremento en su altura y TCR. Durante este estudio platanillo presentó una mayor altura sin embargo, alcatraz mostró una TCR positiva mayor. La diferencia entre las alturas de las especies es debido a su genética ya que *Canna indica* puede alcanzar hasta tres metros y *Zantedeschia aethiopica* un metro en condiciones óptimas.

Por otra parte, es importante destacar que a pesar de tener como limitante la temperatura se ha observado que ambas especies alcanzan su altura máxima en el sitio ya que se han encontrado individuos de hasta más de 2.50 m (platanillo) y 1 m (alcatraz).

Un factor determinante para el lento crecimiento de *Canna indica* fue el trasplante, ya que a pesar de que estas plantas se obtuvieron de la misma zona de estudio y por tanto están aclimatadas a las bajas temperaturas, al extraer la planta y exponer el rizoma al aire es un factor estresante que interfiere en su crecimiento, esto se confirma ya que la TCR también es una medida de estrés y esta disminuye drásticamente tras el trasplante y comienza recuperar su valor cuando se regenera el sistema radicular y el estrés se ha reducido como se muestra en la figura 18 (Watson, 1987).

Por otro lado, se encontraron individuos de hasta 2.15 m (M2) y 1.50 m (M1), en contraste con lo obtenido por López (2013) que registró para el sitio una altura máxima de 1.50 m en el mes de noviembre del 2012, por lo que

existen una diferencia de 0.65 m, cabe señalar que estas plantas se utilizaron para el trasplante de M1 y M2.



Figura 24. Daños ocasionados por el frio en *Canna indica*.

Mientras tanto en temperaturas más favorables de 22 a 30 °C en el trabajo realizado por De la Orta & Muñoz (2011) el crecimiento promedio de platanillo fue de 0.06 a 0.20 m por mes y se registró una altura máxima de 2.71 m, en cambio, en Arcoíris el aumento promedio de la altura en los meses más favorables de agosto a noviembre fueron de 0.13 m para M1 y 0.085 m para M2.

Para alcatraz su crecimiento fue lento, ya que la planta se desarrolla idealmente a temperaturas de 12 a 25 °C (Zurita, *et al.* 2009) y en la zona de estudio se reporta una temperatura de entre -8 a 12 °C. Debido a que las condiciones ambientales no son controladas y las plantas mostraron un estrés por bajas temperaturas, se obtuvo en los meses más favorables de agosto a noviembre un aumento promedio de altura de 0.074 m para

M1 y 0.18 m en M2 en contraste con Belmont & Metcalfe, (2003) que registro un crecimiento de 0.35 m para alcatraz en 60 días a una temperatura 14-20°C. Por otro parte es importante destacar que alcatraz tiene una aclimatación más efectiva a temperaturas bajas ya que en el trabajo De la Orta & Muñoz (2011) alcatraz no resistió a las condiciones de estrés por temperaturas más elevadas (22 a 30 °C) y condiciones hídricas.



Figura 25. Daños ocasionados por el frio en *Zantedeschia aethiopica*.

Otro factor de estrés para alcatraz es la inundación del módulo 2 durante el mes de abril, ya que hubo una disminución de la altura de 0.15 m a partir de mes de noviembre y su TCR disminuyó de $0.0049 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ (noviembre) a $-0.0053 \text{ cm}\cdot\text{día}^{-1}$ (abril).



Figura 26. Inundación del módulo 2 durante el mes de Abril.



Figura 27. Recopilación fotográfica del desarrollo de platanillo y alcatraz de módulo 1.



Octubre 2012



Enero 2013



Abril 2013



Mayo 2013



Junio 2013



Julio 2013



Agosto 2013



Septiembre 2013

Figura 28. Recopilación fotográfica del desarrollo de platanillo y alcatraz en módulo 2.



Abril 2013



Mayo 2013



Junio 2013



Septiembre 2013



Marzo 2014

Figura 29. Recopilación fotográfica del desarrollo de alcatraz en módulo 2.

10.6. Biomasa vegetal.

Tabla 4. Coeficientes de determinación (R^2) de las funciones calculadas para *Canna Indica* y *Zantedeschia aethiopica* ($p > 0.05$) (Anexo 9).

Especies	Parámetros	Coeficiente de determinación (R^2)				
		Lineal	Exponencial	Logarítmico	Potencial	Polinómico
<i>Canna indica</i>	Cobertura	2×10^{-7}	0.0011	0.0146	0.0054	0.3887
	Altura	0.1452	0.1357	0.1427	0.1453	0.1230
	Biovolumen	0.0117	0.007	0.0721	0.0489	0.4212
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Cobertura	0.0767	0.0156	0.1151	0.1970	0.0036
	Altura	0.0049	0.0784	0.0795	0.0820	0.0043
	Biovolumen	0.0316	0.0560	0.1169	0.0135	0.0024

Se obtuvieron modelos de estimación de biomasa vegetal (lineal, exponencial, logarítmico, potencial y polinómico) de acuerdo con Espinosa & Raya (2011), sin embargo, los modelos que se desarrollaron no se aplicaron, debido a que los coeficientes de determinación obtenidos son bajos y no se aproximaron a 1 (tabla, 4). Estos resultados no se tomaron en cuenta ya que se puede sobreestimar la biomasa. Los coeficientes bajos derivados de los modelos, se atribuyen principalmente a que el tamaño de la muestra puede ser insuficientes (10 y 15 individuos) y poco representativos de las diferentes tallas. Los modelos de estimación de biomasa requieren de un número suficiente de individuos para asegurar la precisión.

Por otro lado, los resultados de biomasa obtenida fueron las siguientes: el peso seco de alcatraz fue de 0.3651 kg y húmedo de 2.4329 kg de 15 individuos; por otra parte platanillo de 10 individuos se obtuvo un peso seco de 0.7614 kg y húmedo de 7.7083 kg. También para platanillo a finales de mayo 2013 se realizó un acláreo donde el peso seco fue de 0.773 kg y húmedo de 2.8077 kg.

El primer resultado obtenido por platanillo de peso húmedo de 7.7083 kg es mayor al alcanzado por López (2013) que fue de 5.4 kg lo que coincide con los resultados de altura que de igual forma son mayores.

10.7. AGUA.

10.7.1. Temperatura.

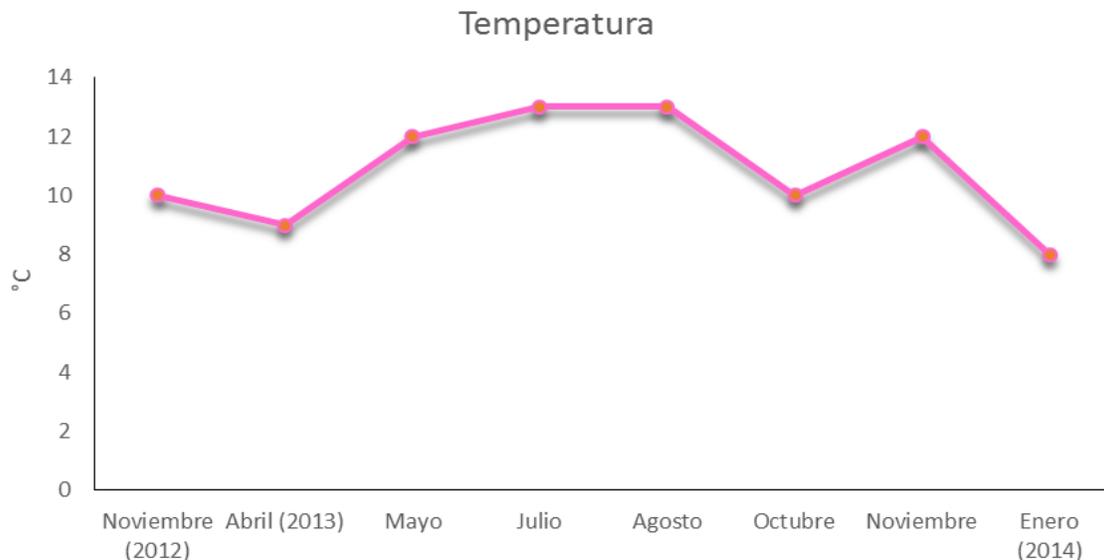


Figura 30. Temperatura del agua del sistema de humedales.

La temperatura del agua se mantuvo entre 8 °C a 13 °C (11:00 – 13:00 hrs) estas temperaturas son características de la zona de estudio cuyos registros indican que van de 5 a 12 °C (García & Mora, 20013).

En verano se obtuvieron las temperaturas más altas de mayo a agosto de 12 a 13 °C. La temporada más fría fue de noviembre a abril con 9 a 10 °C, sin embargo, los trabajadores del campamento Arcoíris registraron una temperatura de – 8°C.

Las temperaturas de día en arcoíris de acuerdo con Crites & Tchobanoglous, (2000) citado por López (2010) no inhiben el crecimiento y desarrollo bacteriano, los procesos de digestión anaerobia y nitrificación bacteriana dentro del sistema ya que la temperatura promedio es de 10.9 °C por lo que esta temperatura es aceptable, no obstante, en la noche y época fría se inhiben debido a que alcanzan temperaturas de hasta -8 °C y la actividad microbiana se detiene a menos de 5 °C.

A pesar de las bajas temperaturas la biomasa vegetal ayudó a proteger el sistema de las bajas temperaturas y durante el periodo frío no se pudo la vegetación para que la hojarasca ayudara como aislante.

10.7.2. Potencial de Hidrógeno (pH).

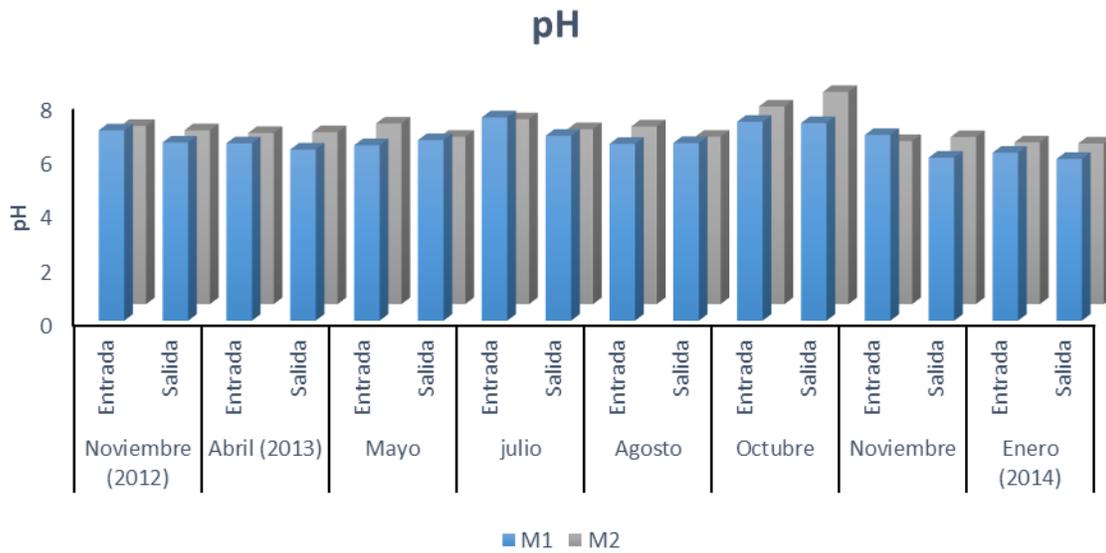


Figura 31. Potencial de hidrogeno (pH) correspondiente al módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

El pH en los dos módulos se mantuvo en un promedio de 6.6. El pH más bajo se obtuvo de noviembre 2013 a enero 2014 que oscilaron entre 6.8 a 5.9, los pH más elevados se alcanzaron en octubre de 7.32 a 7.86. Estos resultados concuerdan con lo obtenido anteriormente en la zona de estudio donde los pH varían entre 6.5 a 7.25 (López, 2013; García & Mora, 2012). Los pH por debajo de 7 unidades logradas durante el monitoreo son resultado de las descargas de aguas domésticas en la barranca Panacuale por parte de la población de Santa Rita Tlahuapan (García & Mora, 2012).

En el mes de octubre el pH fue óptimo en ambos módulos para que los procesos de transformación del nitrógeno se llevaran a cabo, debido a que registró entre 7 y 8.5 unidades, (Sedlak, 1991).

10.7.3 Oxígeno disuelto

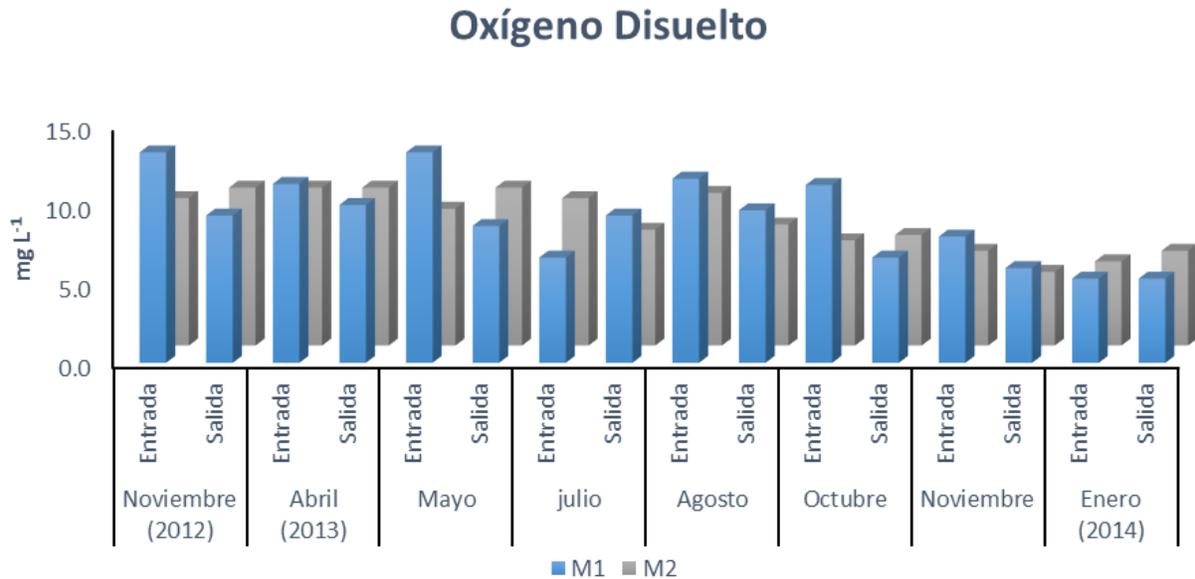


Figura 32. Oxígeno disuelto en módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

Al iniciar el monitoreo el oxígeno en noviembre ingresó con una concentración de 13.3 mgL⁻¹ en módulo 1 y en módulo 2 fue de 9.3 mgL⁻¹. De noviembre (2012) a mayo (2013) se mantuvo entre 13 a 11 mgL⁻¹ para M1 y en M2 de 8.6 a 10 mgL⁻¹ de noviembre (2012) a agosto (2013).

La concentración mínima de oxígeno al iniciar la época fría de noviembre (2013) a enero (2014) fue de 5.33 a 8 mgL⁻¹ en M1 y de 5.33 a 6 mgL⁻¹ en M2.

García & Mora (2013) reportan valores en Arcoíris de entre 12.3 y 15 mgL⁻¹, al igual que López (2013) que logró de 8 a 11 mgL⁻¹, estos resultados son similares a lo alcanzado. Sin embargo, hay que destacar la baja cantidad de oxígeno de octubre a enero con un mínimo de 5.3 mgL⁻¹, este resultado se considera suficiente para la supervivencia de los organismos ya que estuvo por encima de los 3 mgL⁻¹ que menor a esta cantidad se considera letal (López, 2013). En M1 el oxígeno en el caudal de salida aumentó un 28.5 % en mayo en los meses sobrantes no se detectó aumento de oxígeno en la salida del sistema. Por otro lado, en M2 se encontró un aumento en noviembre 2012 (6.6 %), mayo (13.3 %), octubre (4.7 %) y enero (11.1 %), en abril, julio, agosto y noviembre (2013) no se registró aumento. El incremento registrado es

debido al suministro de oxígeno por las plantas y microorganismos ya que este es un subproducto de la fotosíntesis y cuando la fotosíntesis tiene lugar debajo de la superficie del agua, se añade oxígeno al agua (Kadlec & Wallace, 2009).

10.7.4. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

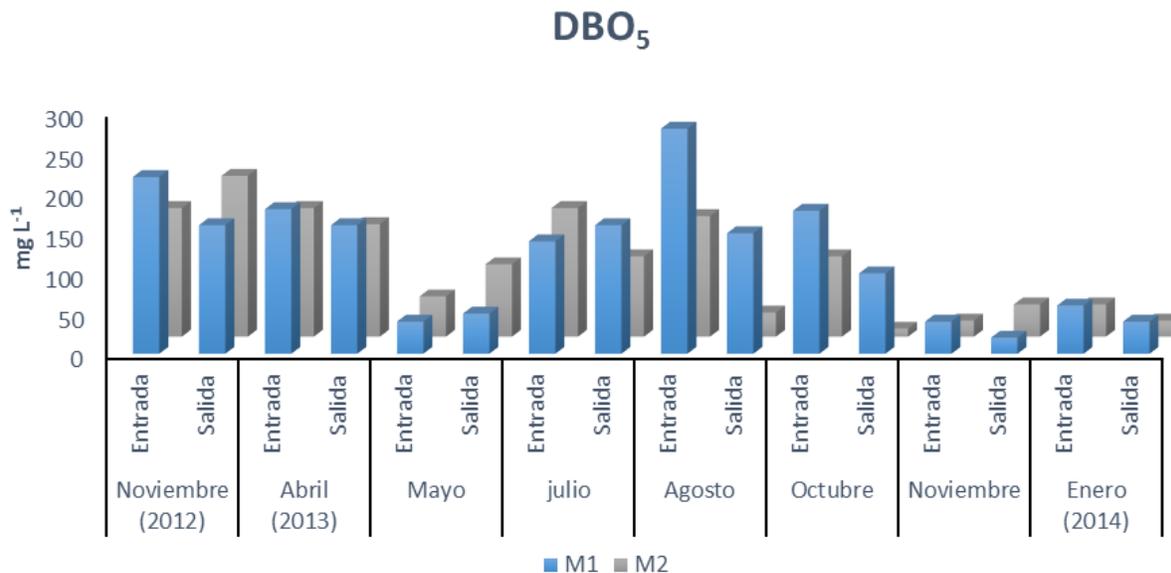


Figura 33. Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅) en módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

Durante el monitoreo, en M1 ocurrió remoción de DBO en noviembre (2012), abril (2013) y de agosto a enero (2014), los meses donde presentó una mayor eliminación fue en octubre y agosto con 46 y 43 % de una concentración de entrada de 280 y 178 mgL⁻¹, los meses en que no existió remoción fueron mayo y julio.

M2 mostró remoción en abril, mayo, octubre, noviembre (2013) y enero, la máxima eficiencia se logró en agosto y octubre con un 80 y 90 % de 150 y 100 mgL⁻¹ de concentración en el caudal de entrada respectivamente. Los meses que no mostraron remoción en el sistema fueron noviembre (2012 y 2013) y abril.

Mientras tanto en condiciones más favorables de temperatura (22 a 30 °C), en el trabajo De la Orta y Muñoz (2011) la máxima remoción se logró en septiembre con el 50 % y López (2013) registró una remoción del 70 y 80 %

para Arcoíris. Las remociones obtenidas son excelentes ya que la DBO nunca podrá tener el 100 % de eliminación, porque existe una producción de DBO₅ constante, debido a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal (Ochoa, 2007). Un factor que interfirió en la eliminación de la DBO₅ es la hojarasca proveniente de los árboles que están dentro del campamento por la descomposición de las hojas ya que el sistema no cuenta con una cubierta que reduzca la influencia de este factor. Las bajas temperaturas del ambiente en la zona (0 a -8° °C) también afectaron la remoción ya que ocasionaron que fuese más lenta.

10.7.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO)

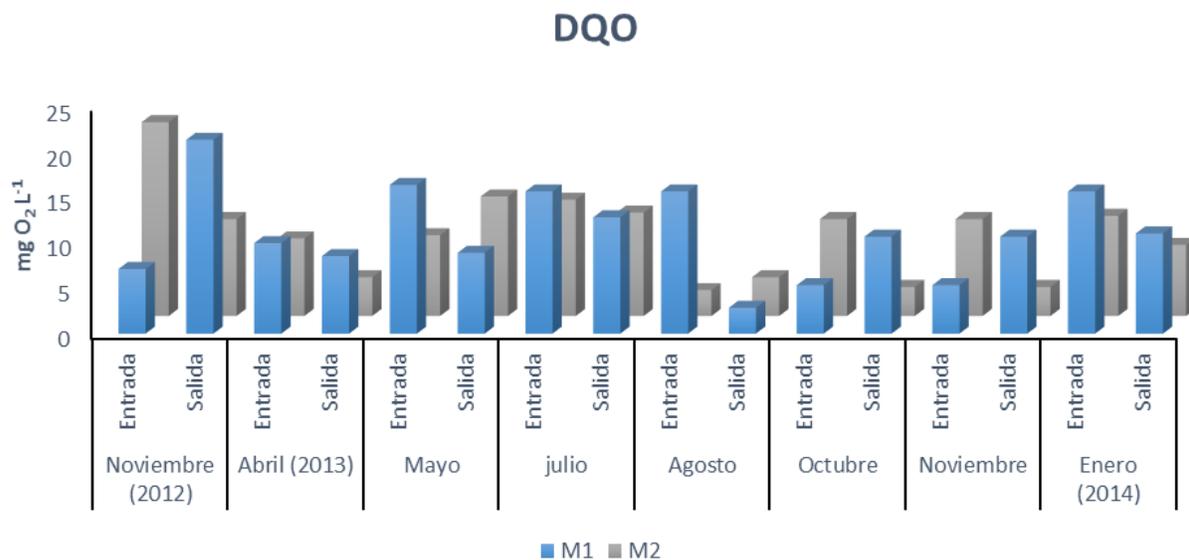


Figura 34. Demanda Química de Oxígeno (DQO) de módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

La demanda química de oxígeno (DQO) se define como la cantidad de oxidante químico, generalmente dicromato de potasio, requerido para oxidar la materia orgánica. Las concentraciones de DQO en los dos módulos de acuerdo con Metcalf y Eddy (1999) se catalogan como bajas a medias ya que el caudal de entrada varió de entre 160 a 640 mgL⁻¹ (Heers, 2006).

En M1 ocurrió remoción de abril a agosto (14 % a 81 %) y enero (29.5 %). La máxima remoción se obtuvo en agosto con el 81.8 % con un caudal de entrada de 469.3 mgL⁻¹. Los meses en los que no se consiguió remoción fueron noviembre (2012 y 2013) y octubre.



Por otro lado, en M2, noviembre (2012 y 2013) (50 %), abril (50 %), octubre (70 %) y enero (29 %) hubo remoción. La remoción máxima fue del 70 % en octubre y noviembre (2013), donde la concentración inicial fue de 320 mgL^{-1} para ambos meses. Finalmente, en M2 no existió remoción en mayo y agosto. Las remociones registradas fueron mayores a lo obtenido por De la Orta & Muñoz (2011) que registro un 47 % y similares a lo logrado por López (2013) con el 71.1 % y de 61.6 %.

10.7.6. Nitrógeno

Las formas más importantes del Nitrógeno en los humedales son el Amoníaco (NH_3), Nitritos (NO_2^-), Nitratos (NO_3^-), Óxido Nitroso (N_2O) y el Nitrógeno Total; pero también están presente en diversas formas orgánicas como los aminoácidos, aminas, purinas, pirimidinas y por supuesto la urea (CNH_4O), formada por mecanismos fisiológicos de los animales.

En M1 la especiación de la entrada fue de aproximadamente 36.6 % de nitrógeno orgánico, 54 % de N. amoniacal, 9.3 % de nitrato y 0.0015 % de nitrito. En M2 el 41.8 % fue N. orgánico, 44.3 % N. amoniacal, 13.8 % de nitrato y 0.0009 % de nitritos.

El **nitrógeno orgánico** en M1 se removió en enero (2013) y noviembre (2013), la máxima remoción se logró en enero (2013) con un 50 % de una concentración inicial de 1.12 mgL^{-1} . En cuanto al M2 en abril y julio fue de 33 y 50 % respectivamente, donde el caudal de entrada se encontró en 3.36 y 5.6 mgL^{-1} . El porcentaje de remoción coincide con los registros de López (2013) que reportó una remoción del 50 % correspondiente con la remoción obtenida en presente trabajo.

Con respecto al **nitrógeno amoniacal** en M1 tuvo remoción de agosto a enero, mientras que de noviembre (2012) a julio no existió remoción. La eficiencia máxima se obtuvo en enero (2014) con el 50 % de una concentración inicial de 4.48 mgL^{-1} . Por otro parte M2 ocurrió remoción en julio con el 20 %, con un caudal de entrada de 5.6 mgL^{-1} . La remoción alcanzada por De la Orta y Muñoz (2011) fue de 44 % en clima cálido, mientras que la remoción obtenida por López (2012) fue de 48 y 49 % en clima semifrío.

Nitrógeno

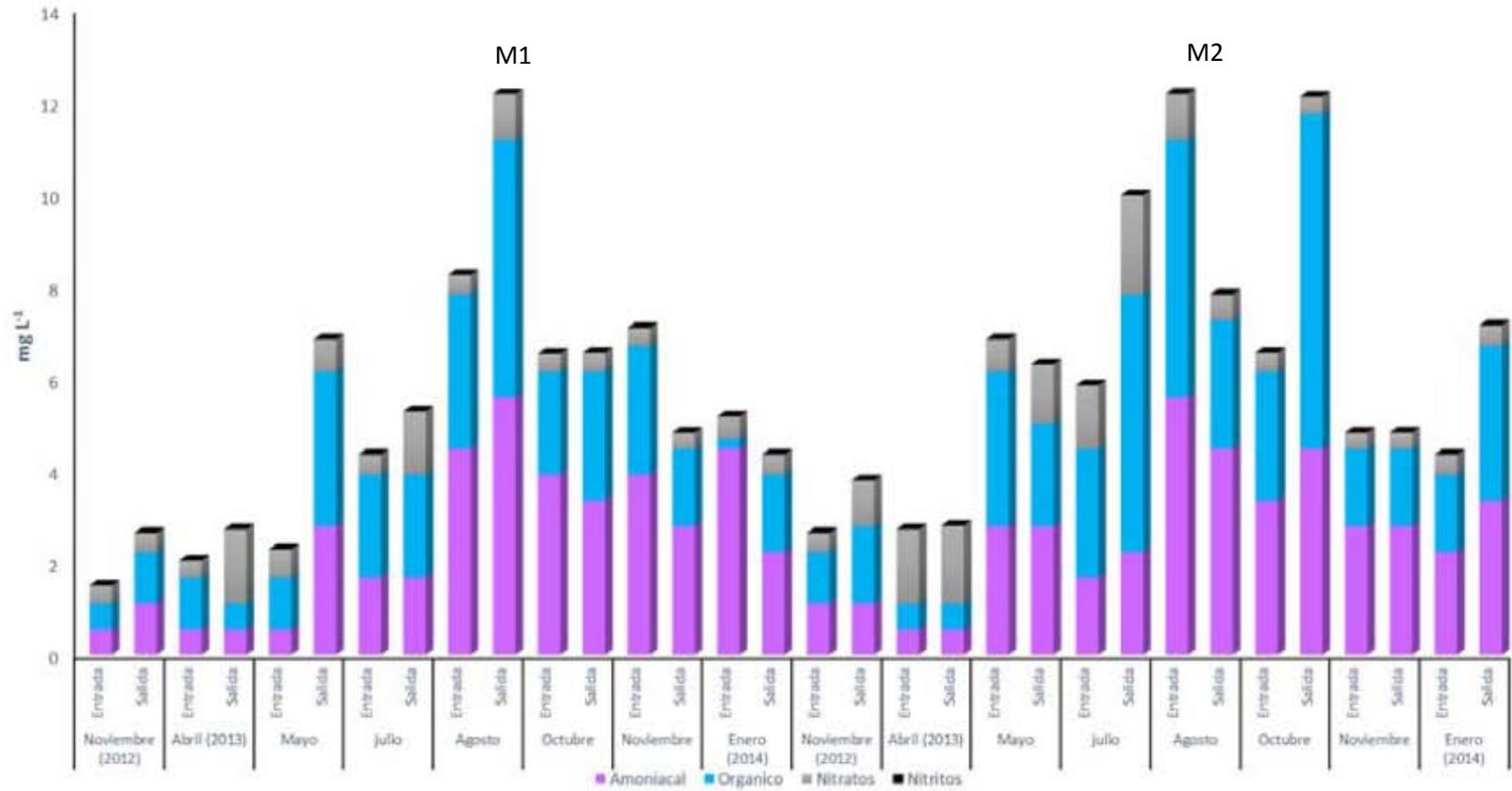


Figura 35. Especiación del nitrógeno amónicoal, orgánico, nitratos y nitritos para módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).



La variación en el comportamiento de remoción de nitrógeno amoniacal se puede deber a que el mecanismo que permite la eliminación es la nitrificación y para que esta se lleve a cabo, es necesario una concentración mínima de oxígeno, lo que hace suponer que en algunas ocasiones no hubo suficiente oxígeno en los módulos para que se llevara a cabo una mejor nitrificación (Ochoa 2007). La relación teórica indica que son necesarios 4.6 g de oxígeno para oxidar 1 g de nitrógeno amoniacal. (Estrada 2010). Faulwetter *et al.* (2009) citado por Rosado (2010) menciona que a partir de concentraciones de oxígeno por debajo de los 2.5 mgL⁻¹ el proceso de nitrificación se inhibe causado por la acumulación de amonio en el sistema. De acuerdo con lo obtenido en este trabajo la cantidad de 5.3 a 10 mgL⁻¹ de oxígeno disuelto fue suficiente para que no se inhibiera la nitrificación, no obstante, otras transformaciones como la remoción de DBO requiere de oxígeno y para que exista la nitrificación se requiere una remoción previa de la DBO de hasta 20 mgL⁻¹ o menos. La nitrificación se favorece cuando se ha removido la DBO ya que los organismos pueden competir con los organismos heterótrofos por el oxígeno disponible (Lara, 1999).

De acuerdo con Kadlec & Wallace (2009) en el humedal predominó el ion amonio debido a que los dos módulos tuvieron temperatura y pH por debajo de los 25 °C y pH de 7. El ion amonio (NH₄) solo representa el 0.6 % de amoníaco del total presente en los humedales.

En **nitratos** el M1 tuvo remoción en noviembre (2013) y enero (2014) con 10.6 y 8.6 % con un caudal de entrada de 0.38 y 0.47 mgL⁻¹ respectivamente. En M2 la remoción de nitratos fue en julio y agosto con el 44 % y 7.6 % de una concentración inicial de 0.41 y 0.38 mgL⁻¹. Las concentraciones obtenidas durante el monitoreo son aceptables debido a que no sobrepasó los 10 mgL⁻¹, ya que esta cantidad es considerada tóxica para la población infantil (García, *et al.*, 2002). En cuanto a la remoción de nitratos (NO₃) que se da vía desnitrificación, es importante considerar que este proceso requiere de condiciones anóxicas, una adecuada fuente de carbono y condiciones adecuadas de temperatura. La presencia de condiciones anóxicas está garantizada por el sistema, sin embargo, la temperatura depende del clima, que en el caso de Arcoíris mostró temperaturas de entre -8 a 10 °C la cual afectó a que el proceso fuera más lento y durante las noches se inhibiera, lo



que afectó notablemente la remoción de nitratos. Finalmente, la disponibilidad de una fuente adecuada de carbono es un factor limitante en la desnitrificación ya que este proceso depende de los organismos presentes y estos requieren de carbono como fuente de energía, anteriormente se mencionó que para la nitrificación se requiere que se elimine previamente mucha de la DBO, o sea que puede que la disponibilidad original de carbono orgánico ya no exista en el momento de la desnitrificación. Se estima que entre 5 y 9 g de DBO se requieren para desnitrificar 1 g de NO_3^- (Estrada, 2010).

En **nitritos** M1 ocurrió remoción de mayo a enero del 2014. La máxima eficiencia se logró en noviembre con el 27.5 % (0.0001 mgL^{-1}). No existió remoción de noviembre a abril (2013). En M2 la remoción sucedió de noviembre (2012) a mayo y de agosto a enero (2014). La eficiencia máxima se logró en el mes de agosto con el 52.7 % ($5.2 \times 10^{-5} \text{ mgL}^{-1}$). No ocurrió remoción en julio. Las bajas cantidades de nitritos que van de 2.2×10^{-5} a $9.7 \times 10^{-5} \text{ mgL}^{-1}$ se deben a que el nitrito no es químicamente estable en la mayoría de los humedales por lo que suele encontrarse en concentraciones muy bajas (Kadlec, & Wallace, 2009). Sin embargo, también los nitritos deben de ser bajos debido a que altas concentraciones son tóxicas para las plantas (García & Mora, 2013). Para la nitrificación se requiere un pH entre 6.5 a 7.5 (Ochoa, 2007) y en el mes de noviembre y enero se mantuvieron por debajo de 6.5, hecho que se reflejó en M1 ya que en estos meses no hubo remoción. Por otro lado, Ramírez (2014) comenta que el proceso de desnitrificación es más lento en condiciones ácidas entre 5 a 6 unidades. Otro factor importante que interfiere en que se lleve a cabo las transformaciones es la temperatura ya que la óptima es de 28 y 36 °C (Rosado, 2010), y la mínima que se requiere es de 8° C a 10°C. (López, 2013).

10.7.7. Fósforo.

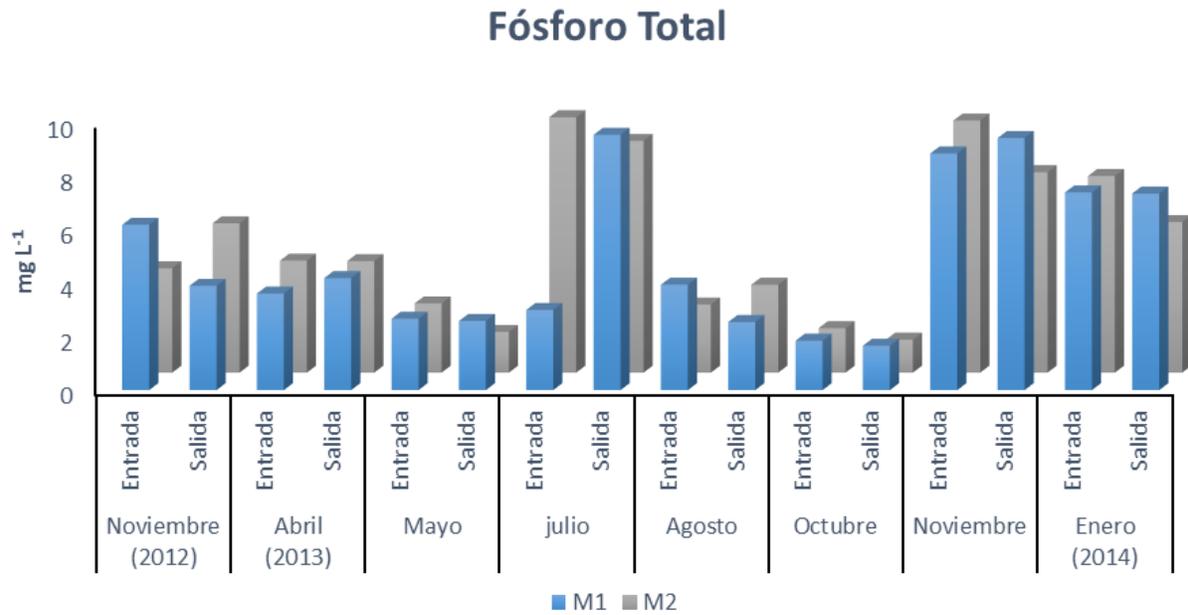


Figura 36. Fósforo total del agua en módulo 1 y módulo 2.

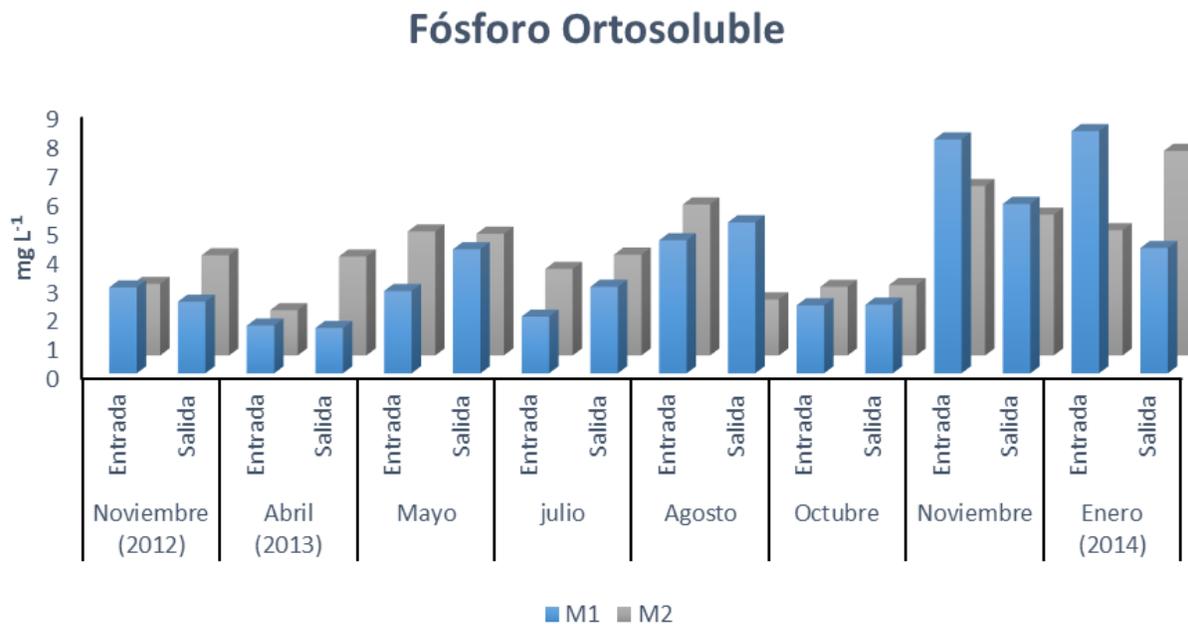


Figura 37. Fósforo Ortosoluble del agua en módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

Fósforo Hidrolizable

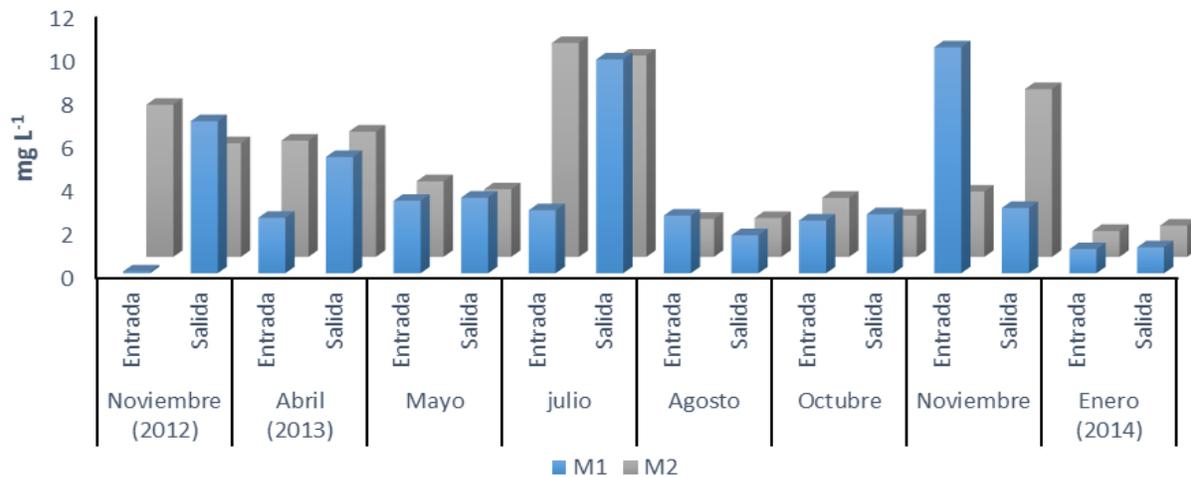


Figura 38. Fósforo hidrolizable del agua en módulo 1 (M1) y módulo 2 (M2).

En las aguas naturales el **fósforo** surge en tres formas: ortofosfato inorgánico disuelto, compuestos orgánicos de fósforo disuelto y fósforo en partículas. La suma de los tres tipos de fósforo es considerada como el contenido total de fósforo (Delgadillo, 2010).

Durante el monitoreo en M1 existió remoción de **fósforo total** (figura 36) en noviembre (2012), mayo, agosto, octubre y enero (2014). La máxima remoción se logró en noviembre (2012) y agosto con el 36.8 y 35.5 % con una concentración de entrada de 6.19 y 3.95 mgL⁻¹. Durante los meses de abril, julio y noviembre (2013) no existió remoción. Por otro lado, en M2 se logró la remoción de abril a agosto y de octubre a enero (2014). No existió remoción en los meses de noviembre (2012) y agosto. El porcentaje máximo de remoción se obtuvo en mayo con el 41 % de 2.6 mgL⁻¹ en el caudal de entrada.

Estos resultados contrastan con lo obtenido por De la Orta y Muñoz (2011) que reportan una remoción del 61 % para clima semiárido subhúmedo, sin embargo, en la zona de estudio García & Mora (2013) reportan una remoción del 28 %, mientras que Zariñana (2011) reportó hasta 63 %. A pesar de los resultados obtenidos, las remociones son aceptables debido a que el fósforo total disminuyó su concentración en la mayoría de los meses ya que



este es removido parcialmente por las plantas que incorporan cantidades pequeñas a su metabolismo (0.2 mgL^{-1}) otra fracción es arrastrada por el agua y el resto se acumula en el sustrato (Sánchez, 2001). El bajo porcentaje de remoción de fósforo se debe a que en los humedales construidos existen pocas oportunidades de contacto entre el agua residual y el terreno (Lara, 1999).

La concentración de fósforo total en Arcoiris se puede catalogar de bajas a medias de acuerdo con la clasificación de Metcalf & Eddy (1991) ya que se encontraron entre 4 a 7 mgL^{-1} . En cuanto al tipo de fósforo que dominó en el sistema de acuerdo con el pH (entre 2.15 a 12.35 unidades) obtenido fue el fosfato primario H_2PO_4^- y el secundario HPO_4^{2-} (Crites & Tchobanoglous, 2000).

Cerca del 25% del fósforo total está formado por ortofosfatos como: fosfato (PO_4^{3-}), fosfato de hidrógeno (HPO_4^{2-}), ion dihidrogeno (H_2PO_4) y ácido fosforico u ortofosforico (H_3PO_4), formas que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. La figura 37 muestra el comportamiento de la concentración de **fósforo ortosoluble**, fracción útil que absorben las plantas, donde, en M1 fue removido en noviembre (2012), abril, noviembre y enero (2014), mientras que de mayo a octubre no existió remoción, este resultado se debe principalmente a que en mayo varias plantas murieron y no fueron sustituidas hasta el mes de julio. A pesar de ello se obtuvo una máxima remoción en enero (2014) con el 48% de un caudal de entrada de 8.3 mgL^{-1} . En M2 el fósforo ortosoluble fue removido en mayo, agosto y enero. La máxima remoción se logró en agosto con el 62% de una concentración inicial de 4.59 mgL^{-1} . No hubo remoción en los meses de abril, agosto, noviembre y enero. Los porcentajes de remoción obtenidos fueron bajos en comparación con los De la Orta y Muñoz (2011) que alcanzó un 81% de remoción en clima semiárido subhúmedo, sin embargo, son similares a los de López (2013) que fueron del 58 y 61% para Arcoiris.

El fósforo hidrolizable determina los polifosfatos ($\text{P}_2\text{O}_7^{4-}$, $\text{P}_3\text{O}_{10}^{5-}$, etc.) y algunos fosfatos orgánicos. De este elemento se obtuvo una remoción en M1 durante agosto y noviembre (2013) con un máximo de eliminación en el mes de noviembre del 71% , mientras que en los meses de noviembre (2012) a julio, octubre y enero no ocurrió remoción (figura 38). En M2 hubo remoción



durante noviembre (2012), mayo, julio y octubre. La remoción máxima fue del 30.3 % en octubre. No hubo remoción en los meses de mayo, agosto, noviembre y enero.

10.7.8. Sólidos.

El término **sólidos** hace referencia a materia suspendida o disuelta en un medio acuoso. Los **sólidos totales (ST)** representan la suma de los SDT y SST, además estos poseen fracciones de sólidos fijos y sólidos volátiles, que pueden ser sedimentables y no sedimentables (Zarela & García, 2012).

En M1 la remoción de ST ocurrió en noviembre (2012), mayo y enero. La máxima remoción ocurrió en enero con 16 % de 0.179 mgL⁻¹ de concentración inicial. No hubo remoción en abril, julio y noviembre (2013). En M2 la remoción sucedió en abril y de julio a enero. La máxima remoción se logró en noviembre (2013) con el 46 % de un caudal de entrada de 0.21 mgL⁻¹. No ocurrió remoción en noviembre (2012) y mayo. Los porcentajes de remoción obtenidos fueron bajo en comparación con lo conseguido por López (2013) que obtuvo una eficiencia para ST de 65 y 67 %.

Los **sólidos disueltos totales (SDT)** son básicamente la suma de todos los minerales, metales y sales disueltos en el agua y es un buen indicador de la calidad del agua, comprenden las sales inorgánicas (principalmente de calcio, magnesio, potasio y sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos) y pequeñas cantidades de materia orgánica que están disueltas en el agua. En módulo 1 existió una remoción de SDT en noviembre (2012) y enero (2014) con 11.8 y 13.3 % respectivamente, de una concentración inicial de 0.10 y 0.17 mgL⁻¹, de abril a noviembre no presentó remoción. En módulo 2 se logró remover los SDT en noviembre (2012), abril y de julio a enero (2014). La máxima eficiencia ocurrió en noviembre (2013) con el 46.6 % de una concentración de 0.2 mgL⁻¹ en el caudal de entrada. No hubo remoción en mayo (figura 39). Los resultados obtenidos de SDT son bajos debido a que las aguas de la barranca Panacuale son de tipo doméstico y no contiene sales inorgánicas que son características de aguas de origen industrial.

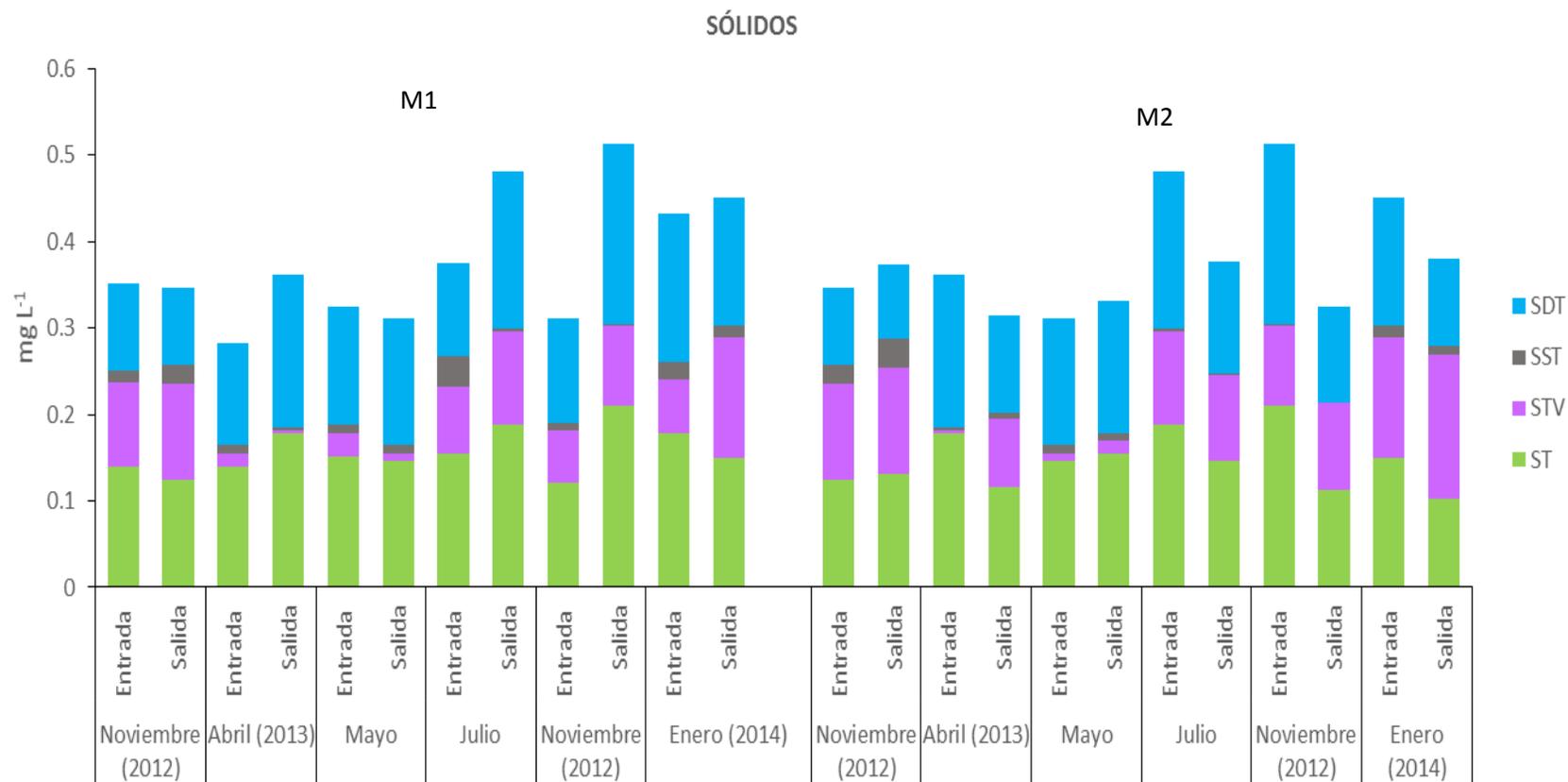


Figura 39. Sólidos en módulo 1 (M1) y Módulo 2 (M2). Sólidos disueltos totales (SDT), Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos totales (ST) y Sólidos totales volátiles (SVT).



Los sólidos suspendidos totales (SST) son partículas sedimentables y flotables en aguas residuales que consta de materia orgánica e inorgánica en suspensión (Heers, 2006). Los sólidos pueden afectar la calidad y suministro del agua ya que estos evitan que la luz penetre hasta lo organismo fotosintético originando una reducción en la producción de oxígeno, liberando gran cantidad de oxígeno, nitrógeno y fósforo presentes en las proteínas (Eugenio & Gallardo 2009). En M1 existió remoción de abril a enero. La eficiencia máxima se logró en julio con el 88% de 0.035 mgL⁻¹ de concentración inicial. No ocurrió remoción en noviembre (2012). En M2 la remoción sucedió de mayo a enero. La máxima eliminación se logró en enero con el 23.07 % de una concentración del caudal de entrada de 0.013 mgL⁻¹. Los resultados obtenidos en M1 coinciden con la remoción lograda por López (2013) del 80 %, además de que concuerda con los estándares de remoción por humedales de flujo subsuperficial, ya que se ha reportado que poseen una eficiencia de más del 80 % (Aburto, 2001). Es importante señalar que las cantidades registradas son bajas, de acuerdo con Metcalf y Eddy (1991) que señala a estas concentraciones por debajo de los 120 mgL⁻¹. Las bajas cantidades de SST se obtuvieron gracias a la participación de la vegetación que ayuda a promover la precipitación y la retención de sólidos suspendidos (Eugenio & Gallardo 2009).

Los sólidos totales volátiles (SVT) son aquellas partículas visibles entre la superficie y el fondo, pueden ser removidos por medio físicos o mecánicos a través de la filtración o sedimentación (Eugenio & Gallardo 2009). Estos se realizan con la finalidad de conocer la cantidad de materia orgánica presente que puede eliminar o volatilizarse cuando esta se quema en un horno mufla. La materia orgánica se convierte en CO₂ y H₂O (Tesillos & Ubaldo).

En M1 la remoción de SVT aconteció en abril con el 81.2 % y mayo con el 66.6 % de una concentración inicial de 0.016 y 0.027 mgL⁻¹ respectivamente. No hubo se presentó remoción de julio a enero. En M2 existió remoción en julio con el 6.5 % de 0.107 mgL⁻¹ como concentración inicial, por otra parte, no ocurrió remoción en noviembre (2012) a mayo, noviembre (2013) y enero.



11. Conclusiones

- Se logró establecer en los dos módulos platanillo (*Canna indica*) y alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*).
- EL periodo de establecimiento de *Canna indica* fue de 9 meses por lo que el periodo fue más corto a comparación de los 12 meses requeridos por plantas que no están previamente acondicionadas al clima semifrío.
- Alcatraz presentó una aclimatación más efectiva a temperaturas bajas (-8 a 22 °C) en comparación con temperaturas elevadas (22 a 30 °C) donde los individuos no resisten el estrés.
- A pesar de que las plantas fueron previamente aclimatadas, el estrés del trasplante afectó en la supervivencia de platanillo con el 58 %, mientras que alcatraz confirmó con un 100 % de supervivencia que las plantas previamente aclimatadas tienen mayor resistencia a temperaturas bajas.
- El porcentaje de supervivencia de las plantas en los módulos depende de tener una cubierta para amortiguar el estrés por las bajas temperaturas.
- Se obtuvieron individuos de *Canna indica* de hasta 2.15 m (M2) y 1.50 m (M1), mayor a lo alcanzado por López (2013) que registró una altura máxima de 1.50 m, con una diferencia de 0.65 m.
- No se encontraron diferencias significativas en la altura y la tasa de crecimiento relativo de las plantas entre módulo 1 y 2 de acuerdo con la prueba estadística t de Student y U de Mann-Whitney.
- Los modelos desarrollados para la estimación de la biomasa vegetal no fueron aplicados debido al bajo número de muestras que originó coeficientes de relación lejanos a 1.
- El crecimiento medido a través de la TCR de *Canna indica* y *Zantedeschia aethiopica* fue favorable en la época de secas de mayo a octubre.
- EL peso seco obtenido al final de monitoreo de *Canna indica* fue de 0.7614 kg y *Zantedeschia aethiopica* de 0.3651 kg en un periodo de un año.



- A pesar de la temperatura (-8 a 22 °C) se consiguió una alta eficiencia de remoción de nitrógeno amoniacal con el 50 % y nitratos con 44 %, mientras que el fósforo ortosoluble alcanzó una remoción del 62 %. Las concentraciones de nitrógeno amoniacal, nitratos y fósforo ortosoluble fueron las suficientes para que las plantas desarrollaran su biomasa vegetal.
- Se obtuvieron altos porcentajes de remoción de DBO (46 y 90 %), DQO (81 y 70 %), nitritos (27 y 52 %), fósforo total (35.5 y 41 %), fósforo hidrolizable (71 y 30 %), 88 % SST (88 y 46 %) y SVT (81 %).

12. Anexos

[Anexo 1] Análisis estadístico para *Canna Indica*.

Prueba de normalidad

	Módulo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
TCR	Módulo 1	.853	8	.102
	Módulo 2	.899	8	.284

Estadísticos de grupo

	Módulo	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
TCR	Módulo 1	8	-.001663	.0133652	.0047253
	Módulo 2	8	.001150	.0100743	.0035618

Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	Sig.	t	CI	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
								Interior	Superior
TCR	.004	.948	-.475	14	.642	-.0028125	.0059173	-.0155039	.0098789
			-.475	13.013	.642	-.0028125	.0059173	-.0155948	.0099698

[Anexo 2] Análisis estadístico para *Zantedeschia aethiopica*.**Prueba de normalidad**

	Módulo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
TCR	Módulo 1	.790	6	.048
	Módulo 2	.942	6	.675

Estadísticos de grupo

	Módulo	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
TCR	Módulo 1	6	.0010667	.00452268	.00184638
	Módulo 2	6	.0003833	.00467094	.00190690

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TCR es la misma entre las categorías de Módulo.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	1.000 ¹	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es .05.

¹Se muestra la significación exacta para esta prueba.

[Anexo 3] Análisis estadístico de la TCR del total de individuos entre módulo 1 y 2.

Prueba de normalidad

	Módulo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
TCR	Módulo 1	.710	12	.001
	Módulo 2	.947	12	.590

Estadísticos de grupo

	Módulo	N	Media	Desviación ttp.	Error ttp. de la media
TCR	Módulo 1	12	-.001894	.0099253	.0028652
	Módulo 2	12	.001837	.0080298	.0023180

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de TCR es la misma entre las categorías de Módulo.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	.590 ¹	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es .05.

¹Se muestra la significación exacta para esta prueba.

[Anexo 4] Análisis estadístico de la TCR entre especies.

Prueba de normalidad

	Especie	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
TCR	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	.941	12	.506
	<i>Canna Indica</i>	.921	12	.291

Estadísticos de grupo

	Especie	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
TCR	<i>Zantedeschia aethiopica</i>	12	.000725	.0043980	.0012696
	<i>Canna Indica</i>	12	-.000781	.0122475	.0035355

Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas	Prueba T para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	Gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
TCR	Se han asumido varianzas iguales	3.417	.078	.401	22	.692	.0015065	.0037566	-.0062842	.0092972
	No se han asumido varianzas iguales			.401	13,790	.695	.0015065	.0037566	-.0065621	.0095751



[Anexo 5] Análisis estadístico de la altura entre módulos de *Zantedeschia aethiopica*.

Prueba de normalidad

	Módulo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Altura	Módulo 1	.950	7	.729
	Módulo 2	.827	7	.075

Estadísticos de grupo

	Modulo	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Altura	Módulo 1	7	21.8457	3.15201	1.19135
	Módulo 2	7	26.1200	5.84182	2.20800

Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas	Prueba T para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
Altura	Se han asumido varianzas iguales	5.334	.040	-1.704	12	.114	-4.27429	2.50890	-9.74071	1.19214
	No se han asumido varianzas iguales			-1.704	9.221	.122	-4.27429	2.50890	-9.92919	1.38062



[Anexo 6] Análisis estadístico de la altura entre módulos de *Canna indica*.

Prueba de normalidad

	Módulo	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Altura	Módulo 1	.823	9	.038
	Módulo 2	.951	9	.700

Estadísticos de grupo

	Módulo	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Altura	Módulo 1	9	62.66	19.596	6.532
	Módulo 2	9	74.69	35.290	11.763

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Altura es la misma entre las categorías de Módulo.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	.605 ¹	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es .0

¹Se muestra la significación exacta para esta prueba.

[Anexo 7] Análisis estadístico de la altura del total de individuos entre módulos.

Prueba de normalidad

		Shapiro-Wilk		
	Módulo	Estadístico	gl	Sig.
Altura	Módulo 1	.820	14	.009
	Módulo 2	.782	14	.003

Estadísticos de grupo

	Modulo	N	Media	Desviación tñp.	Error tñp. de la media
Altura	Módulo 1	14	41.73	25.744	6.880
	Módulo 2	14	51.32	38.098	10.182

Resumen de contrastes de hipótesis

	Hipótesis nula	Prueba	Sig.	Decisión
1	La distribución de Altura es la misma entre las categorías de Módulo.	Prueba U de Mann-Whitney para muestras independientes	.401 ¹	Conserve la hipótesis nula.

Se muestran significaciones asintóticas. El nivel de significancia es .0

¹Se muestra la significación exacta para esta prueba.



[Anexo 8] Análisis estadístico de la altura entre especies.

Prueba de normalidad

	Especie	Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.
Altura	<i>Zantedeschia aethiopica.</i>	.876	14	.050
	<i>Canna Indica</i>	.956	14	.658

*. Esto es un límite inferior de la significación verdadera.

Estadísticos de grupo

	Especie	N	Media	Desviación típ.	Error típ. de la media
Altura	<i>Zantedeschia aethiopica.</i>	14	24.00	5.034	1.345
	<i>Canna Indica</i>	14	69.05	32.334	8.642

Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas	Prueba T para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
									Inferior	Superior
Altura	Se han asumido varianzas iguales	16.412	.00	-5.151	26	.000	-45.051	8.746	-63.028	-27.074
	No se han asumido varianzas iguales			-5.151	13.63	.000	-45.051	8.746	-63.856	-26.245



[Anexo 9]. Modelos de estimación.

Canna indica.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.145	1.358	.277	19.316
Logarítmico	.143	1.331	.282	80.322
Potencia	.123	1.122	.320	71.400
Exponencial	.136	1.256	.295	28.676
Polinomial	.145	.59	.577	14.13.19

La variable independiente es Altura.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.000	.000	.999	76.175
Logarítmico	.015	.119	.739	93.281
Potencia	.005	.043	.841	78.963
Exponencial	.001	.009	.927	70.077
Polinomial	.388	2.23	.178	-65.188

La variable independiente es Cobertura.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.012	.095	.766	68.124
Logarítmico	.072	.621	.453	104.862
Potencia	.049	.411	.539	97.040
Exponencial	.007	.056	.819	61.085
Polinomial	.421	2.55	.147	-11.156

La variable independiente es Biovolumen.



Zanthedeshia aethiopica.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.078	.425	.543	53.210
Logarítmico	.079	.432	.540	-22.030
Potencia	.004	.022	.889	10.439
Exponencial	.005	.024	.882	5.985
Polinomial	.081	.180	.842	85.631

La variable independiente es Altura.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.077	.415	.548	36.404
Logarítmico	.115	.650	.457	29.478
Potencia	.004	.018	.898	7.612
Exponencia	.016	.079	.789	6.345
Polinomial	.192	.480	.651	48.062

La variable independiente es cobertura.

Resumen de modelo y estimaciones de parámetro

Variable dependiente: Biomasa

Ecuación	Resumen del modelo			Estimaciones de parámetro
	R cuadrado	F	Sig.	Constante
Lineal	.056	.297	.609	33.778
Logarítmico	.117	.662	.453	23.209
Potencia	.002	.012	.918	7.370
Exponencial	.032	.163	.703	6.073
Polinomial	.135	.310	.748	42.073

La variable independiente es Biovolumen.



13. LITERATURA CITADA

- Aburto, S. (2011). Análisis y modelación del proceso de nitrificación en sistemas experimentales que simulan humedales artificiales. Tesis de Maestría. UNAM. México. 235 p.
- Arias, C. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. Bogota, Colombia. **13**:17-24.
- Arias, S. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. Informador Técnico. Colombia. **74**: 12-22.
- Aristazábal L. (2008). Evaluación de crecimiento y desarrollo foliar de un plátano hondureño enanos (*Musa AAB*) en una región cafetera colombiana. Agron. **16 (2)**: 23 – 30.
- AENOR. (1998). Norma Española: Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno después de n días (DBO_n). UNE-EN 1899-2.
- AENOR. (1994). Norma española: Determinación del oxígeno disuelto método yodométrico. UNE EN25813.
- APHA (1992). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. Washington D.C. 937p.
- Barbera, A., Giuseppe L., Cavallaro, V., Silvestro, I. Pacifici, P. Castiglione, V. Toscano, A, & Milani M. (2009). Growth and biomass production of different plant species in Sicily. Desalination, **247**: 130-137.
- Barbier, E., Acreman, M., & Knowler, D. (1997). Valoración económica de los humedales guía para decisores y planificadores. Oficina de la Convención de Ramsar, 140p.
- Baskar, G., Deeptha, V., & Abdul, A. (2009). Root zone technology for campus waste. Journal of Environmental Research and Development. **3**: 695-705.
- Belmont, M & Metcalfe, C. (2003). Feasibility of using ornamental plants (*Zantedeschia aethiopica*) in subsurface flow treatment wetlands to remove nitrogen, chemical oxygen demand and nonylphenol ethoxylate surfactants—a laboratory-scale study. Ecological Engineering. **21** : 233–247
- Brisson, J., & Chazarenc, F. (2008). Maximizing pollutant removal in constructed wetlands: should we pay more attention to macrophyte species selection. Science of the Total Environment. **407**: 3923–3930.



- Brix, H. (2003). Plants used in constructed wetlands and their functions. International seminar on the use of aquatic macrophytes for wastewater treatment in constructed wetlands.
- Burciaga, M. (2008). Uso de humedales como alternativa en el tratamiento de efluentes en la industria láctea. Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Durango. 90 p.
- Castro Isabel, casado Miguel, Ramirez Lucia, Costa Margarita & Diaz Francisco. (1996). Funciones de las estimaciones de la biomasa aerea de varias especies de matorral mediterránea del centro de la península Ibérica. Orisis. **11**:107- 116.
- Crites R. y Tchobanoglous G., (2000). Sistemas de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Mc Graw Hill, Santafé de Bogotá. 135p en: Lopez, M. (2013). Evaluación de la calidad del agua del arroyo Panacuale y el establecimiento de plantas ornamentales en un sistema de humedales de flujo subsuperficial para tratar aguas residuales en el Campamento de Pesca Arcoíris, Puebla. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 61 p.
- Cronk, J., & Stobhsn, M. (2001). Wetland plants biology and ecology. Florida: Lewis Publishers. 462 p.
- Cuélla, N., & Herrera, A. (2010). Evaluación de respuestas fisiológicas de la planta arbórea *Hibiscus rosa-sinensis L*, (Cayeno) bajo dos condiciones ambientales (vivero y campo). Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecuaria. **11**:61-72.
- Daubenmire, R. (1979). Ecología vegetal. Tratado de auto ecología de las plantas. Tercera edición. Limusa. México. 496 p.
- Delgadillo, O. (2010). Despuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia: Centro andino para la gestion y uso del agua, 78 p.
- De la Orta, & A. Muñoz, L. (2011). Evaluación de la fenología y la calidad del agua residual generada en el CBTA. No, 176 del municipio de Apaxtla de Castrejón Guerrero tratada en un humedal construido de flujo subsuperficial. Informe de Servicio Social. UNAM, FES Zaragoza. 40 p.
- DOF, (2000). Análisis de agua - determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-007-1980): NMX-AA-007-SCFI-2000.
- DOF, (2001). Análisis de aguas - determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y



residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA- 039-1980): NMX-AA-039-SCFI-2001.

- DOF, (2001a). Análisis de agua - determinación de nitrógeno total Kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-026-1980): NMX-AA-026-SCFI-2001.
- DOF, (2001b). Análisis de agua - determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a las nmx-aa-020-1980 y NMX-AA-034-1981): NMX-AA-034-SCFI-2001.
- DOF, (2006). Análisis de agua – determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales – métodos de prueba (cancela a la NMX-AA 099-1987): NMX-AA-099-SCFI-2006.
- DOF, (2006b). Aguas residuales – muestreo (todas las partes cancelan al PROY NMX-AA-003-SCFI 2006): PROY-NMX-AA-003/1-SCFI-2008.
- DOF, (2008). Análisis de agua.-determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas.- método de prueba-(las partes de esta NMX cancelan la NMX-aa-029-SCFI-2001): PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008.
- DOF, (2011). Análisis de agua - determinación del pH - método de prueba- (cancela a la NMX-AA-008-SCFI-2000): NMX-AA-008-SCFI-2011.
- Eugenio, K. & Gallardo, C. (2009). Evaluación de la calidad física, química y bacteriológica del agua tratada en un humedal de flujo subsuperficial para uso piscícola. Tesis de licenciatura. UNAM. México. 89 p.
- Enríquez, D. (2008). Estudio florístico y fitogeográfico de la sierra de órganos, municipio de Sombrerete, Zacatecas (México). Tesis doctoral. México. 102 p.
- EPA. (1993). Subsurface flow constructed wetlands for waste water treatment a technology assessment. Cincinnati. 87p.
- EPA. (1998). Design manual constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment. Environmental Protection Agency Office of Research and Development Center for Environmental Research Information. Cincinnati. 83 p.
- Espinoza, N. & Raya, A. (2011). Modelo para la estimación indirecta de biomasa aérea de *Xantosoma robustum* y *Cyperus papyrus* en los sistemas de humedales de Tetipac y Apaxtla de Castrejón, Gro. Servicio Social. UNAM FES Zaragoza. México.



- Estrada, I. (2010). Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales. Documento presentado como requisito para optar el título de tecnóloga química. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia. 178 p.
- Faulwetter J., Gagnon V., Sunmdberg C., Chazerenc F., Burr M., Brisson J., Camper A. & Stein O. (2009). Microbial porcesses influencing performance of treatment wetlands: Are view Ecology engineering. **34**: 987-1004.
- Fournier, L. (1993). Recursos Naturales, Segunda Edición. San José, Costa Rica. Editoriales Universitarias De América Latina y Caribe – EULAC. 375 p.
- García, D. & Mora, A. (2013). Evaluación de la calidad del agua tratada en un Sistema de humedales de flujo subsuperficial, para uso recreativo. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 116 p.
- Gómez, L., Blancas, G., Constanza, E. & Cervantes, A. (2014) Análisis de calidad de aguas naturales y residuales con a la aplicación a la microescala. UNAM, FES Zaragoza. México. 204 p.
- González, J., Beascochea, E. Muñoz, J. & M, Fernández. 2005. Manual de fitodepuración. Filtros de macrófitos en flotación Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. 129 p.
- Gitiri, C. (2009). Constructed wetlands: potential for their use in treatment of gray water in Kenya. Master Thesis. University Kiel. 77 p.
- Gutierrez, L. (2008). Evaluación de la calidad física, química y especiación de metales pesados, en lodos residuales de una humedal construido en el Valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 87 p.
- Healy M.G., Newell J., & Rodgers M. (2007). Harvesting effects on biomass and nutrient retention in *Phragmites australis* in a free-water surface constructed wetland in western Ireland. Department of Civil Engineering, National University of Ireland. Galway. 23 p.
- Heers, M. (2006). Constructed wetlands under different geographic conditions: Evaluation of the suitability and criteria for the choice of plants including productive species. Master Thesis. Hamburg University of Applied Sciences. Hamburg. 166 p.
- Hernández, E. (2013). Guía básica del cultivo de alcatraz (*Zantedeschia sp.*) y nociones para su propagación. Trabajo de experiencia recepcional. Universidad veracruzana. Xalapa, México. 31 p.



- Hoffmann, H. (2011). Technology review of constructed wetlands subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment. *Sustentable Sanitation Ecosan*. 35p.
- Huang, J., Cai, W., Zhong, Q. & Wang, S. (2013). Influence of temperature on micro-environment, plant eco-physiology and nitrogen removal effect in subsurface flow constructed wetland *Ecological Engineering*. **60**: 242– 248.
- INEGI (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Tlahuapan, Puebla. Clave geoestadística 21180.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetland, Second Edition*. Boca Raton: CRC Press. 945 p.
- Lara, C. (2010). Transformación y valoración del paisaje en la preciosa, Santa Rita Tlahuapan, Puebla y el programa de ordenamiento ecológico regional del Volcan Popocatepetl. Tesis Profesional. Colegio De Posgraduados. Puebla, México. 67-68.
- Lara, J. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Master en Ingeniería y Gestión Ambiental. Cataluña, España: Universidad Politécnica De Cataluña. 114 p.
- Lei, S., Bao-Z, W., Xiang, C. (2004). Performance of a subsurface flow constructed wetland in Southern. China. *Journal of Environmental Sciences*, **16 (3)**: 476-481.
- Llagas, A.& Guadalupe, E. (2006). diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en UNMSM. *Revista del Intituto de Investigaciones FIGMMG*. 85-95.
- López, M. (2013). Evaluación de la calidad del agua del arroyo Panacuale y el establecimiento de plantas ornamentales en un sistema de humedales de flujo subsuperficial para tratar aguas residuales en el Campamento de Pesca Arcoiris, Puebla. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 61 p.
- Ludwing & Müller. (1964). *Manual de laboratorio de fisiología vegetal*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba. Costa Rica. 161 p.
- Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*. McGraw-Hill Inc. 3rd. edition. New York, U.S.A. 920 p.
- Miller, P. (2007). Seasonal nutrient dynamics in a small-scale constructed wetland treating primary effluent with applications of effluent reuse in biomass production. radford university. Doctoral thesis. Virginia, 269 p.



- Mueleman A., Van L., Rijs G., Verhoeven J. (2003) Water and mass budgets of vertical flow constructed wetlands used wastewater treatment. *Ecological engineering* **20**: 31-44.
- Ochoa, L. (2007). Evaluación del desempeño de la remoción de contaminantes de un efluente hospitalario con el uso de humedales construidos. Tesis de Maestría. UMSNH. México. 113 p.
- Osnaya, M. 2012. Propuesta de diseño de un humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales en la Universidad de la Sierra de Juárez. Tesis de licenciatura. Universidad de la Sierra de Juárez. México.
- Perbangkhem, T.& Polprasert, C. (2010). Biomass production of papyrus (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater. *Bioresource Technology* y **101**: 833-835.
- Ramírez, J. (20014). Diseño de humedales flotantes con *Vetiveria zizanioides (linn.) Nash*. Para el tratamiento de agua residual y se reusó en actividades de pesca deportiva. Tesis de licenciatura. UNAM. México. 92 p.
- Ramírez, H. (1998). Desarrollo de ingeniería básica para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales a base de un humedal de flujo horizontal. Tesis Profesional. UNAM. México.
- Ramsar. (2006). Manual de la convención de Ramsar: Guía a la convención sobre los humedales (Ramsar, Irán, 1971), 4a. Edición. Gland (Suiza): Secretaría de la convención de Ramsar, 124 p.
- Reddy, K.R. & De Busk. (1987). Nutrient storage capabilities of aquatic and wetland plants. Magnolia Publishing. Florida. 337 – 357.
- Rivas, A. (2003). Evaluación de un humedal mexicano con la variante de flujo superficial, para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Seminario internacional sobre metodos naturales para el tratamiento de aguas residuales. Universidad del Valle. Morelos, México. 124-131.
- Rodríguez, J. (2013). Establecimiento de mosaicos de plantas crasas para la naturación de azoteas, mediante hongos micorrícicos arbusculares. Tesis de licenciatura. UNAM. México. 81 p.
- Romero, M., Colín, A., Sanchez, E., & Ortiz, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Int. Contam. Ambient.* 157-167.
- Rosado, E. (2010). Modelos de remoción y transformación de compuestos nitrogenados en humedales artificiales de flujo sub



superficial: panorama actual y propuesta para generar nuevos modelos. Trabajo Monográfico. Tesis Profesional. UNAM. Mexico. 75 p.

- Rzedowski, G. 1998. Flora del Bajío y de regiones adyacentes. Fascículo 64. Instituto de Ecología-Centro Regional del Bajío. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Michoacán, México.
- Salas, J. & Infante, A. (2006). Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana*. **40**: 47-70.
- Salisbury F. & Ross C. (2000). Fisiología de las plantas. Internacional Thomson Editoriales. Madrid, España. 988 p.
- Sedlak, R. (1991). Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater principles and practice, Second Edition. New York, U.S.A. 254 p.
- Sim, C.H. (2003). The use of constructed wetlands for wastewater treatment. Wetlands International-Malaysia Office. 24 p.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). Fisiología Vegetal Volumen 2. Universitat Jaume-1. Valencia, España. 1150 p.
- Tanner, C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological Engineering*. **7**: 59-83.
- Valladares, F. (2004). Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio De Medio, Egraf, S. A. Barcelona. 83 p.
- Víctor, L. (2001). Manual de prácticas de fisiología vegetal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional entre Ríos. Oro Verde, Argentina. 11 p.
- Villaroel, M. (2005). Tratamiento terciario del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales el cortijo para uso agrícola con humedales contruidos en el flujo superficial. Programa doctoral en medio ambiente, Universidad Nacional Trujillo. Lima. 52 p.
- Villaseñor, J. & Espinosa, F. 1998. Catálogo de Malezas de México. Universidad Nacional Autónoma de México y Fondo de Cultura Económica. D.F, México. 28 p.
- Vymazal, J. & Kropfelova, L. (2005). Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecol. Eng.* **25**: 606–621.



- Wang, Y.-C., Ko, C.-H., & Chang, F. (2011). Bioenergy production potential for aboveground biomass from a subtropical constructed wetland. *Biomass and bioenergy*, **35**: 50-58.
- Watson, g. (1987). The relationship of root growth and tree vigour following transplanting. *Arboric. J.* **11**: 97-104.
- Wong, T. (1999). Managing urban stormwater using constructed wetlands. Cooperative Research Centre (CRC) for Catchment Hydrology and Department of Civil Engineering, Monash University. 40 p.
- Zambrano, X. (2004). Diseño del sistema de tratamiento para la depuración de las aguas residuales domésticas de la población San Eloy en la provincia de Manabi por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre. Facultad de Ingenieria en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del litoral (espol). Guayaquil. 8 p.
- Zarela M. & García T. (2002). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de ingeniería. UNI. Perú. 282 p.
- Zariñana E. (2011). Tratamiento de aguas residuales a través de un humedal construido de flujo subsuperficial para el cultivo de trucha (*Oncorhynchus mykiss*) en el campamento de pesca Arcoiris, Puebla. Tesis de Licenciatura. UNAM. México. 76 p.
- Zurita, F., De Anda, J. & Belmont, M. (2009). Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*. **35**: 861-869.



14. MEDIAGRAFÍA

- CONABIO. (1999). Cannaceae. *Canna indica* L. Platanillo. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/cannaceae/canna-indica/fichas/ficha.htm>. (Consultado el 4 de Enero de 2014).
- CONABIO. (1999b). Araceae. *Zantedeschia aethiopica* (L). Alcatraz. <http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/araceae/zantedeschia-aethiopica/fichas/ficha.htm>. (Consultado el 4 de Enero de 2014).
- EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. http://water.epa.gov/scitech/wastetech/upload/2003_07_10_mtb_cs_00_023.pdf (Consultado el 19 de febrero de 2013).
- Gamonal, P. (2002). Tratamiento de drenaje de ácidos de minas en humedales construidos. <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/MedioAmbiente/DAMhumedales.pdf>. (Consultado el 22 de 10 de 2012).
- García, M., Cantellano R., Arcos, R. & Alejo N. (2002). Distribución y abundancia de las diferentes formas del nitrógeno dentro de un humedal construido en Texcoco, Edo. de México. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/149.pdf>. (consultado el 25 de 9 de 2014).
- H. Ayuntamiento de Tlahuapan. (2012). Enciclopedia de Municipios y Delegaciones de México. <http://www.elocal.gob.mx/work/templates/enciclo/EMM21publica/municipios/21180a.html> (Consultado el 13 de 11 de 2012).
- INE. (2008). INE. Boletín Informativo del Instituto Nacional de Estadística: <http://www.ine.es/revistas/cifraine/0108.pdf> (Consultado el 15 de 04 de 2013).
- Plants for a future (PFAF). (2004). Plants for a future - 7,000 useful plants. <http://www.pfaf.org/index.html> (consultado el 23 de 09 de 2013).
- Rienzo D., Casanoves J., González F., Tablada L., Díaz E., Robledo M., Walter C. & Graciela M. (2005) Estadística para las Ciencias Agropecuarias Sexta Edición. <http://agro.uncor.edu/~estad/EstadisticaPCA.pdf>. (Consultado el 30 de 10 de 2013).
- Ruiz, A. (2010). Tesis doctoral. Mejora de la vida de las familias porcicultoras de Parque Porcino de Ventanilla, mediante un sistema



de biodigestion y manejo integral de residuos solidos y liquidos.http://www.ciudadsaludable.org/pdf/Tesis_doctoral_ARR.pdf (Consultado el 22 de 11 de 2012, de Ciudad Saludable.

- Soto, G. (2009). Estudio Para Estimar Los Beneficios Ecológicos Del Proyecto Integral Para El Saneamiento Del Alto Atoyac En El Estado De Puebla.[http://www.ampres.com.mx/pdf/Estudio_beneficios_Atoyac%20\(Act%2006abr10\).pdf](http://www.ampres.com.mx/pdf/Estudio_beneficios_Atoyac%20(Act%2006abr10).pdf) . (Consultado el 15 de 04 de 2013).
- Squeo, F, & Cardemil, L. (2006). Fisiologia Vegetal: Temperatura y crecimiento.<http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Crecimientoytemperatura.pdf> (consultado el 23 de 09 de 2013).