



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LA
ADECUACIÓN DE UN HUMEDAL DE
FLUJO SUBSUPERFICIAL

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

B I Ó L O G O

PRESENTAN:

BERENICE ESCAMILLA CAMPOS
MARIANA MORGADO AGUILAR

DIRECTOR: DR. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS



FES
ZARAGOZA

MÉXICO, D.F.

ABRIL 2014

Agradecimientos

A la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza de la Universidad Nacional Autónoma de México por la formación profesional, cultural y humana recibida durante el tiempo que fuimos parte de esta honorable institución.

A la Asociación Civil Mateo Quinto A.C. por permitirnos desarrollar nuestro trabajo de tesis dentro de sus instalaciones y por las facilidades brindadas.

A la Fundación Gonzalo Rio Arronte I.A.P., por el financiamiento otorgado a través del programa Agua para las adecuaciones realizadas al Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía de la Asociación Civil Mateo Quinto A.C., como parte de la presente investigación.

A los laboratorios de Limnoecología, de Proyectos Ambientales y de Espectrofotometría de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza para la realización del procesamiento de muestras y seguimiento del trabajo en sus diferentes fases.

A los sinodales el M en C. Eliseo Cantellano de Rosas, el Dr. Justo Salvador Hernández Avilés, el Biól. Raúl Arcos Ramos, la Biól. Maricela Arteaga Mejía y la Biól. Aída Zapata Cruz, por el tiempo que dedicaron a la revisión de este trabajo y por las observaciones que realizaron y ayudaron a enriquecer el mismo.

Al Dr. Salvador Hernández Avilés por la confianza que siempre tuvo en nosotras y por sus enseñanzas durante todo este tiempo.

A la Biól. Maricela Arteaga Mejía y a la Dra. Lourdes Castillo Granada por todo el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

A todos los profesores de la Facultad de Estudios Superiores Zaragoza que fueron parte de nuestra formación académica.

A Conchita, Martha, Roberto, Toño, Luis y a todas las personas que viven y trabajan en Mateo Quinto, por darnos su confianza y abrirnos las puertas de ese maravilloso hogar.

Mateo 5:3-12

Dichosos los pobres en espíritu, porque el reino de los cielos les pertenece.

Dichosos los que lloran, porque serán consolados.

Dichosos los humildes, porque recibirán la tierra como herencia.

Dichosos los que tienen hambre y sed de justicia, porque serán saciados.

Dichosos los compasivos, porque serán tratados con compasión.

Dichosos los de corazón limpio, porque ellos verán a Dios.

Dichosos los que trabajan por la paz, porque serán llamados hijos de Dios.

Dichosos los perseguidos por causa de la justicia, porque el reino de los cielos les pertenece.

Dichosos serán ustedes cuando por mi causa la gente los insulte, los persiga y levante contra ustedes toda clase de calumnias.

Alégrense y llénense de júbilo, porque les espera una gran recompensa en el cielo. Así también persiguieron a los profetas que los precedieron a ustedes.

Dedicatorias

A mis Papás, por su paciencia, apoyo, pero sobre todo por su amor, por creer en mí en todo momento, por no dejar que me rindiera, por ser las personas más maravillosas de este mundo y mi motor para seguir adelante cada día, sin ustedes nunca lo huera logrado.

A mis hermanos Diego, Paola y Eduardo por ser mis compañeros y mis amigos, por compartir conmigo este logro.

Al Dr. Salvador Hernández Áviles por ser un gran ejemplo de persona y de profesionalista, por siempre dar lo mejor de sí, por alentarme a siempre ir más allá, por tener confianza en mí, por cambiar mi vida y enseñarme que no hay satisfacción más grande que la que se siente cuando haces tú mayor esfuerzo por ayudar a los demás.

A Mariana Morgado gracias por ser mi compañera de vida, mi hermana, mi amiga, por ser esa maravillosa mujer con la que sé que siempre puedo contar. No pude haber escogido mejor persona para alcanzar esta meta y no hay nadie más con quien la quisiera compartir. Te amo

A Tania Castillo por ser una gran amiga y por todo el apoyo que siempre recibimos de tu parte, por los viajes, las horas de laboratorio, las risas, los pleitos las lágrimas, mi vida no sería la misma sin ti.

A mi familia del corazón, las Limantour, Adriana, Edith, Erick, Ernesto, Héctor, José Miguel, Julio, Lety, Marina, Miguel, Mony, Pau, Ricardo y Yessica por siempre estar ahí, por todo su apoyo, por no dejar que me rindiera, por alentarme, por regañarme, por ser un gran ejemplo para seguir adelante a pesar de las adversidades, por su amor incondicional y porque sin ustedes nunca lo hubiera logrado. Los amo

A Olivio Moreno por ser mi mejor ejemplo a seguir, por ayudarme a siempre tomar las mejores decisiones y por nunca dejar que me rindiera, por enseñarme que hay que hacer las cosas con pasión.

Berenice Escamilla Campos

Mariana Morgado Aguilar

Gracias a Dios, a mis padres, por su apoyo, amor, trabajo y esfuerzo, gracias a ustedes he podido llegar hasta aquí lo mejor que me ha podido pasar es ser su hija los amo.

A mi mama, por enseñarme desde hablar, comer, caminar tú guiaste cada paso y este es uno más. Gracias por ser mi amiga confidente, escucharme y quererme tanto. Eres mi súper mamá.

A mi papá, por tu apoyo por enseñarme a creer en mí misma a trabajar muy duro para lograr lo que uno quiere a superarme día con día.

A mis abuelos, a los que están y a los que no, pero estoy segura que me cuidan desde donde estén junto con cada ángel que ha sido parte de mi vida, los quiero. A mi familia a cada uno por estar con migo, gracias.

Al amor de mi vida, Israel gracias por tu comprensión amor y cariño, por una vida juntos, te amo.

A Berenice más que gracias por todo este trabajo juntas, gracias por la mejor amistad del mundo, sabes que eres la hermana que nunca tuve sin embargo la vida me dio la oportunidad de escogerla así como a mi segunda familia las Limantour, a Tania por su gran ayuda y apoyo, gracias, Paulina, Leticia, Ricardo, José Miguel, Edith, Erick, Miguel, Julio Cesar, Mónica, Marina, Yessica, Héctor, Adriana, los quiero.

Al Dr. Salvador Hernández A., gracias por todo ese trabajo, tiempo, esfuerzo y sobretodo paciencia por la oportunidad de permitirme ser parte de este proyecto, por enseñarme que a pesar de todo siempre se puede ser una mejor persona.

Contenido

1. Resumen.....	15
2. Introducción.....	16
2.1 PANORAMA DE LA DISTRIBUCIÓN MUNDIAL DEL AGUA Y PROBLEMAS ASOCIADOS CON SU USO.....	16
2.2 SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO.....	17
2.3 SUTRANE (SISTEMA UNITARIO DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUA NUTRIENTE Y ENERGÍA).....	19
2.4 HUMEDALES.....	20
2.4.1 HUMEDALES ARTIFICIALES.....	21
3. Antecedentes	26
4. Planteamiento del problema.....	35
5. Justificación.....	36
6. Objetivos.	37
7. Hipótesis estadísticas nulas.....	37
8. Zona de estudio.	38
8.1 MUNICIPIO DE AMOZOC, PUEBLA.....	38
8.1.1 GEOGRAFÍA Y OROGRAFÍA.....	39
8.1.2 HIDROLOGÍA.....	39
8.1.3 CLIMA.....	39
8.1.4 VEGETACIÓN.....	39
8.2 LOCALIZACIÓN DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO.....	39
8.3 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA UNITARIO DE TRATAMIENTO Y REÚSO DE AGUA NUTRIENTES Y ENERGÍA (SUTRANE) DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO A.C.	40
9. Método.....	43

9.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA.....	43
9.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.	44
9.3 CAMPO.....	45
9.3.1 MUESTREO DE VEGETACIÓN.	46
9.3.2 MUESTREO BACTERIANO.	46
9.3.3 MUESTREO DE AGUA.....	47
9.4.1 BACTERIAS.....	49
9.4.2 PARÁMETROS REALIZADOS EN EL LABORATORIO.....	50
9.5.1 VEGETACIÓN.....	52
9.5.2 BACTERIAS.	52
9.5.2.1 ANÁLISIS DE IMÁGENES.	52
9.5.2.2 DENSIDAD.....	53
9.5.2.3 BIOMASA.....	53
9.5.3 PARÁMETROS QUÍMICOS.....	53
9.5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.	53
10. Resultados.....	54
10.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA.....	54
10.2 CRECIMIENTO DE MACROFITAS.....	54
10.2.2 CARRIZO.....	57
10.3 BACTERIAS.	59
10.3.2 CONTENIDO DE CARBONO	61
10.3.3 BIOMASA BACTERIANA.....	62
10.4 TEMPERATURA.	63
10.5 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.	64
10.6 PH	65
10.7 OXÍGENO DISUELTTO (OD).....	66
10.8 NITRITOS.	67
10.9 NITRATOS.....	69

10.10 NITRÓGENO AMONÍACAL.....	72
10.11 ORTOFOSFATOS.....	75
10.12 FÓSFORO TOTAL.....	77
10.13 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅).....	79
10.14 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGENO (DQO).....	81
10.15 COLIFORMES TOTALES.....	84
10.16 COLIFORMES FECALES.....	86
10.17 SÓLIDOS SEDIMENTABLES Y TOTALES.....	89
11. Discusión de Resultados.....	90
11.1 TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA.....	90
11.2 VEGETACIÓN.....	90
11.3 BACTERIAS.....	91
11.4 CALIDAD DEL AGUA.....	92
12. Conclusiones.....	102
13. Adecuaciones y modificaciones estructurales del SUTRANE con base en los resultados obtenidos.....	105
14. Referencias.....	114

Índice de Figuras.

FIGURA 1. TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS: A. CON FLUJO SUPERFICIAL Y B. CON FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (GARCÍA Y CORZO, 2008).....	21
FIGURA 2. DIVISIÓN MUNICIPAL DEL ESTADO DE PUEBLA (INEGI, 2006).....	38
FIGURA 3. POLÍGONO (LÍNEAS ROJAS) DEL ÁREA DE LOS TERRENOS DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO (GOOGLE EARTH, 2010).	40
FIGURA 4. PLANO ARQUITECTÓNICO DEL SUTRANE DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO.....	42
FIGURA 5. CANALETA CON EL CULTIVO DE MACROFITAS CON INÓCULOS BACTERIANOS EN SUS RAÍCES PARA EL DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA.	45
FIGURA 6. TRATAMIENTO EXPERIMENTAL EN EL QUE COMBINAN ALCATRACES Y CARRIZOS EN EL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.	45
FIGURA 7. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LOS BIOVOLÚMENES DE CARRIZO EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL.	58
FIGURA 8. DENSIDAD BACTERIANA PARA TODOS LOS COMPARTIMENTOS DEL SUTRANE	59
FIGURA 9. CONTENIDO DE CARBONO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	61
FIGURA 10. BIOMASA BACTERIANA PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	62
FIGURA 11. PROMEDIO DE LAS TEMPERATURAS REGISTRADAS EN LOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DEL SUTRANE.	63
FIGURA 12. VALORES MEDIOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	64
FIGURA 13. VALORES PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL PH REGISTRADO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.	65
FIGURA 14. CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTU REGISTRADAS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.	66

FIGURA 15. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRITOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	68
FIGURA 16. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE NITRATOS EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE.....	70
FIGURA 17. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRATOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	71
FIGURA 18. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO AMONIAICAL REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	74
FIGURA 19. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE FOSFATOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	76
FIGURA 20. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE FÓSFORO TOTAL REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	78
FIGURA 21. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DBO5 REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	80
FIGURA 22. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE DQO EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE	82
FIGURA 23. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DQO REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	83
FIGURA 24. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE LOS COLIFORMES TOTALES REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	85
FIGURA 25. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE COLIFORMES FECALES EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE ..	88
FIGURA 26. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE LOS COLIFORMES FECALES REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	88
FIGURA 27. PLANO DEL SUTRANE DESPUÉS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS PARA MEJORAR SU FUNCIONAMIENTO	113

Cuadro 1. Parámetros que se realizaron in situ:	48
Cuadro 2. Determinaciones físicas y químicas.....	50
Cuadro 3. Determinaciones colorimétricas espectrofotométricas.....	51
Cuadro 4. Tasa de crecimiento relativo para las macrofitas en el humedal de flujo subsuperficial.	55
Cuadro 5. Valores promedio de la cobertura de los alcatraces, en los diferentes tratamientos del humedal de flujo subsuperficial, para los meses de agosto y octubre del 2010.....	55
Cuadro 6. Análisis de varianza para el logaritmo de las coberturas medias del alcatraz, en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.....	56
Cuadro 7. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de las coberturas medias del alcatraz en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.....	56
Cuadro 8. Valores promedio de la cobertura del carrizo, en los diferentes tratamientos del humedal de flujo subsuperficial, para los meses de agosto y octubre del 2010.....	57
Cuadro 9. Prueba de Kruskal-Wallis para las coberturas del carrizo en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.	57
Cuadro 10. Análisis de varianza para el logaritmo de las concentraciones medias de las densidades bacterianas de todos los compartimentos del SUTRANE.	59
Cuadro 11. Prueba de rangos múltiples de Tukey para las densidades bacterianas cuantificadas en todos los compartimentos del SUTRANE.	60
Cuadro 12. Análisis de varianza para el contenido de carbono en todos los compartimentos del SUTRANE.	61
Cuadro 13. Análisis de varianza de la biomasa en todos los compartimentos del SUTRANE.	62
Cuadro 14. Concentraciones de nitritos registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.....	67

Cuadro 15. Análisis de varianza para el logaritmo de las concentraciones de nitritos en los todos los compartimentos del SUTRANE.....	68
Cuadro 16. Concentraciones de nitratos registradas para todos los compartimentos del SUTRANE.	69
Cuadro 17. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de nitratos en todos los compartimentos del SUTRANE.....	70
Cuadro 18. Concentraciones de nitrógeno amoniacal registradas para los diferentes compartimentos del SUTRANE.	72
Cuadro 19. Análisis de varianza para la raíz cuadrada de las concentraciones medias de nitrógeno amoniacal de todos los tratamientos del SUTRANE.....	73
Cuadro 20. Prueba de rangos múltiples de Tukey para la raíz cuadrada de las concentraciones medias de nitrógeno amoniacal en los diferentes tratamientos del SUTRANE.	73
Cuadro 21. Concentraciones de ortofosfatos registradas para todos los tratamientos del SUTRANE.....	75
Cuadro 22. Análisis de varianza para las concentraciones de ortofosfatos en los diferentes compartimentos del SUTRANE.	76
Cuadro 23. Concentraciones de fósforo total registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.....	77
Cuadro 24. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de fósforo total en los todos compartimentos del SUTRANE.....	78
Cuadro 25. Concentraciones de DBO5 registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.....	79
Cuadro 26. Concentraciones DQO registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.	81
Cuadro 27. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de DQO en los todos compartimentos del SUTRANE.	82
Cuadro 28. Concentraciones de coliformes totales registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.....	84

Cuadro 29. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de coliformes totales en los diferentes compartimentos del SUTRANE.	85
Cuadro 30. Concentraciones de coliformes fecales registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.....	86
Cuadro 31. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de coliformes fecales en todos los compartimentos del SUTRANE.	87
Cuadro 32. Concentración de sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (ST) registrados en los diferentes compartimentos del SUTRANE, en el año 2009 y 2010.....	89

1. Resumen

En esta investigación se realizó un diseño experimental para evaluar el establecimiento y funcionamiento de un humedal de flujo subsuperficial como un componente esencial de un Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía (SUTRANE) previamente establecido dentro de la Asociación Civil Mateo Quinto, empleado para la depuración de aguas residuales de tipo doméstico. El diseño consistió en tres tratamientos utilizando dos especies de macrofitas: alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) y carrizo (*Phragmites australis*), las cuales fueron sembradas de manera independiente y una combinación de ambas en diferentes canaletas del humedal. Las plantas fueron inoculadas con un agregado bacteriano para formar una biopelícula que contribuyera a los procesos de degradación. Como parte del estudio se estimó el crecimiento y la cobertura vegetal, asimismo se cuantificó la densidad y biomasa bacteriana así como también se analizaron parámetros físicos y químicos para conocer la calidad del agua (temperatura, conductividad eléctrica, pH, oxígeno disuelto, nitratos, nitritos, nitrógeno amoniacal, fósforo soluble reactivo, fósforo total, sólidos suspendidos totales, sólidos sedimentables, DBO, DQO, coliformes fecales y coliformes totales). Al final del estudio se determinó que el agua resultante del tratamiento cumplía con lo establecido en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1996 Y NOM-003-SEMARNAT-1997) para ser utilizada con fines de riego. Con base en los resultados se concluye que los factores determinantes en la efectividad de los procesos de depuración fueron las concentraciones de oxígeno, así como la especie vegetal utilizada. Asimismo, la influencia del clima y agentes externos como la hojarasca que entraba al sistema, producida por la vegetación aledaña y la introducción de terrígenos provocaron efectos negativos en el funcionamiento del humedal. Con la finalidad de mejorar la calidad del agua para su reutilización en proyectos de conservación y producción y subsanar la carencia de este recurso dentro de la comunidad, después del estudio se realizaron cambios estructurales e hidráulicos para optimizar el funcionamiento de todo el sistema.

2. Introducción

2.1 Panorama de la distribución mundial del agua y problemas asociados con su uso.

Aunque el agua es un elemento predominante en la Tierra, únicamente el 2.53% del total es agua dulce y el resto es agua salada de la cual aproximadamente dos terceras partes se encuentra inmovilizada en glaciares y al abrigo de nieves perpetuas (ONU, 2003).

A la cantidad natural de agua dulce existente en lagos, ríos y acuíferos se agregan los 8,000 km³ almacenados en embalses. Los recursos hídricos son renovables (excepto ciertas aguas subterráneas), con enormes diferencias de disponibilidad y amplias variaciones de precipitación estacional y anual en diferentes partes del mundo. La precipitación constituye la principal fuente de agua para todos los usos humanos y ecosistemas y es captada por las plantas y el suelo, se evapora en la atmósfera mediante la evapotranspiración y corre hasta el mar a través de los ríos o hasta los lagos y humedales. El agua de la evapotranspiración mantiene los bosques, las tierras de pastoreo y de cultivo no irrigadas, así como los ecosistemas. El ser humano extrae un 8% del total anual de agua dulce renovable y se apropia del 26% de la evapotranspiración anual y del 54% de las aguas de escorrentía accesibles. El control que la humanidad ejerce sobre las aguas de escorrentía es ahora global y el hombre desempeña actualmente un papel importante en el ciclo hidrológico (ONU, 2003).

El consumo de agua per cápita aumenta al mejorar los niveles de vida y con el crecimiento poblacional y en consecuencia el porcentaje de agua objeto de apropiación se eleva. Si se suman las variaciones espaciales y temporales del agua disponible, se puede decir que la cantidad de agua existente para todos los usos escasea y ello lleva a una crisis del agua; se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados (ONU, 2003).

La calidad de los recursos hídricos se ve cada vez más amenazada por la contaminación. Durante los últimos 50 años, la actividad humana ha provocado la contaminación de los recursos hídricos en una magnitud históricamente sin precedentes. Se estima que más de 2,500 millones de personas en el mundo viven sin un sistema adecuado de saneamiento. Cada día, 2 millones de toneladas de aguas residuales y otros efluentes son drenados hacia las cuencas hidrológicas. El problema es más grave en los países en desarrollo, en los que

más del 90% de los desechos sin procesar y el 70% de los desechos industriales sin tratar se vierten en aguas superficiales (Un Water, UNEP, FAOWATER, 2010).

La migración de las zonas rurales a las urbanas aumenta a medida que la población aumenta. Se estima que la población urbana pasará de los 3,400 millones de personas en 2010 a 6,400 millones antes de 2050. Si no se afronta adecuadamente esta situación, mediante una planificación y financiación proactivas, este rápido crecimiento vendrá a sumarse a los problemas que ya encara la calidad del agua. Infraestructuras insuficientes y un mantenimiento deficiente de las existentes generan problemas en la gestión de los desechos municipales así como para el tratamiento y la descarga de las aguas residuales (Un Water, UNEP, FAOWATER, 2010).

Si se asume que un litro de aguas residuales contamina ocho litros de agua dulce, la carga mundial de contaminación puede ascender actualmente a 12,000 km³. Como siempre, las poblaciones más pobres resultan las más afectadas, con un 50% de la población de los países en desarrollo expuesta a fuentes de agua contaminadas (ONU, 2003).

Aunque las aguas residuales deberían recibir tratamiento para ser utilizadas como agua de riego, principalmente en países en desarrollo se usan frecuentemente en forma directa, sin tratar, con los riesgos que esto conlleva en términos de exposición de trabajadores y consumidores a parásitos bacterianos, amebicos, virales y nematodos, así como a contaminantes orgánicos, químicos como metales pesados. Las cosechas regadas con aguas residuales sin tratar no pueden exportarse y su acceso a los mercados locales está restringido, al menos parcialmente. Es probable que el uso de aguas residuales tratadas en zonas urbanas aumente en el futuro para regar árboles, parques y campos de golf (ONU, 2003).

2.2 Situación del agua en México.

El agua es un recurso vital para la vida y soporte del desarrollo económico y social de cualquier país del mundo, fundamental para los ecosistemas y requisito para la sustentabilidad del medio ambiente y su biodiversidad. La distribución natural del agua en el ámbito mundial y regional es desigual: mientras en algunas regiones es abundante, en otras es escasa o inexistente. La disponibilidad del líquido depende de la dinámica del ciclo hidrológico, en el cual los procesos de evaporación, precipitación, transpiración y escurrimientos dependen del clima, las características del suelo, vegetación y de la ubicación geográfica. El hombre ha

alterado dicho ciclo para satisfacer diversas necesidades, principalmente para uso agrícola, industrial, y doméstico. Las actividades agropecuarias consumen aproximadamente el 76% del agua dulce (INEGI, 2006).

El País tiene una superficie de aproximadamente dos millones de kilómetros cuadrados, y una población de 112 336 538 habitantes según últimos datos publicados del censo nacional de población del año 2010 (INEGI, 2010). La ubicación de la población y de los principales polos de desarrollo industrial está inversamente relacionada con la disponibilidad del agua. El agua subterránea juega un papel esencial en la economía del país, ya que para dos terceras partes, el agua subterránea es la principal fuente, y en ocasiones la única fuente de agua ya que más del 60% del territorio se encuentra en condición de aridez o semiáridéz (Marín, 2003).

Los problemas de contaminación en son amplios y pueden ser vistos desde dos puntos: contaminación antropogénica y contaminación natural. La contaminación antropogénica puede ser dividida en tres tipos: biológica, inorgánica y orgánica. La contaminación natural está relacionada principalmente con áreas donde se encuentran elementos o compuestos naturales que son tóxicos como el plomo o arsénico. Uno de los problemas más grandes que enfrenta México es la contaminación bacteriológica. Esto está asociado principalmente a la falta de tratamiento de las aguas residuales. La cobertura de alcantarillado en el medio urbano es del 90%, en el rural es del 37% y en el nivel nacional del 76%. La capacidad instalada para el tratamiento de las aguas residuales municipales es de $81 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y se tratan $51 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Marín, 2003).

En las últimas décadas, el agua se ha convertido en un recurso estratégico para el desarrollo económico y la supervivencia de los países debido a la escasez del agua para consumo humano y a la pérdida de la calidad original.

El desperdicio, la falta de pago por el servicio, la contaminación del recurso, su inadecuada utilización y deficiente administración, además de la presión poblacional, han dado lugar a que la nación se encuentre entre los países con una disponibilidad de agua promedio baja, ubicándose en el lugar 81 a nivel mundial (INEGI, 2006).

La meta del tratamiento de aguas residuales nunca ha sido producir un producto estéril, sin especies microbianas, sino reducir el nivel de microorganismos dañinos a niveles más seguros de exposición, donde el agua es comúnmente reciclada para el riego o usos industriales. Al escoger la tecnología apropiada de

tratamiento, deben considerarse cierto número de factores, incluyendo la cantidad y composición de la corriente de residuos, los estándares del efluente, opciones indicadas de uso y desecho, opciones de pre tratamiento industrial; y factibilidad de funcionamiento (es decir, inquietudes económicas y técnicas).

Muchas opciones de tratamiento pueden ayudar a reducir los efectos de contaminación ambiental. La eficacia del tratamiento debe ser balanceada con el costo, la aplicación práctica y el cumplimiento con los métodos que han sido escogidos para la implementación (Reynolds, 2002).

En muchas ocasiones los vertidos de aguas residuales urbanas superan la capacidad de dilución y autodepuración de los cauces y medios receptores, lo que conlleva a un deterioro progresivo de la calidad de los mismos, e imposibilita la reutilización posterior del agua (Rodríguez, 2003).

El agua residual urbana sin depurar presenta una serie de componentes, que dependiendo de su naturaleza y concentración, pueden producir alteraciones en los equilibrios físicos, químicos y biológicos del ecosistema receptor (Rodríguez, 2003).

Existen varios tipos de plantas o sistemas de tratamiento de agua residual, en este caso se mencionan dos que presentan similitudes, el SUTRANE y el humedal artificial de flujo subsuperficial. Estos dos funcionan como sistemas de tratamiento biológicos y pueden ser sistemas de producción de hortalizas y plantas de ornato.

2.3 SUTRANE (Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía)

Este sistema hace posible el uso balanceado y la recuperación del agua del consumo doméstico. Está concebido como una ecotecnología que elimina los malos olores, la contaminación y los drenajes al exterior (Quirós, 1985). El modelo ideal del SUTRANE está integrado por los siguientes componentes que se mencionan a continuación:

El filtro bioquímico: que consta de dos sistemas, el primero incluye la trampa de natas y la fosa de aguas residuales domésticas provenientes de lavabos, lavadoras, vertederos y fregaderos, y el segundo lo constituye la fosa digestor de aguas residuales domésticas provenientes de escusados, letrinas, etc. Ambos sistemas de fosas se construyen de ferrocemento. En ambas fosas se llevan a cabo procesos de biodegradación aerobia y anaerobia, transformando los desechos del consumo doméstico en nutrientes libres para su posterior utilización.

Filtro biofísico: Para optimizar el proceso biodegradatorio de las aguas de desecho se ha vinculado el sistema un filtro biofísico, el cual consta de dos o tres canales impermeabilizados donde se corta toda posibilidad de filtraciones. Estos canales contienen, de abajo para arriba, las capas de piedra bola, gravilla, grava y arena. Sobre la arena exterior se siembran hortalizas, forrajes o flores.

Trampas de grasas: merece especial mención por su función múltiple. Es parte integrante, junto con la fosa de aguas con jabón, del proceso biodegradatorio de estas que descargan de las regadera, del lavabo, del fregadero, de la cocina y de los lavaderos. Este es un depósito de 40cm de ancho por 60cm de largo y 60 cm de profundidad, que se construye debajo o a un lado de los lavaderos. En su parte superior se cubre con una tapa de madera. La función de la trampa de grasas es aislar las natas y espumas jabonosas para su posterior utilización. Las grasas y natas ahí acumuladas se recogen periódicamente (cada mes) con una coladera grande o su equivalente y pueden transformarse nuevamente en jabón. Es recomendable hacer golpear las aguas provenientes del fregadero sobre una pequeña caja o bote de 40cm de diámetro y 50 cm de alto llena de piedra y grava para propiciar el oxigenado de estas aguas. A este elemento se le llama “preoxigenador” (Quirós, 1985).

2.4 Humedales

Según el convenio de Ramsar sobre humedales, son: “Extensiones de marismas, pantanos y turberas o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Ramsar, 1971).

Los humedales naturales son complejos de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en los que el suelo se mantiene saturado de agua durante un periodo de tiempo cada año. En los humedales crecen vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estas condiciones ambientales. Estos seres vivos, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos productos tóxicos (Lahora, 2002).

Se ha tratado de aprovechar este gran potencial depurador de los humedales para el tratamiento de aguas residuales, diseñando instalaciones capaces de reproducir las características de los humedales naturales (Lahora, 2002).

2.4.1 Humedales artificiales.

Los humedales construidos son sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetales propios de las zonas húmedas y en donde el tratamiento tiene lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna. Los humedales construidos también se denominan humedales artificiales (García y Corso, 2008).

De acuerdo con el tipo de circulación del agua, los humedales construidos se clasifican en flujo superficial o en flujo subsuperficial (Figura 1).

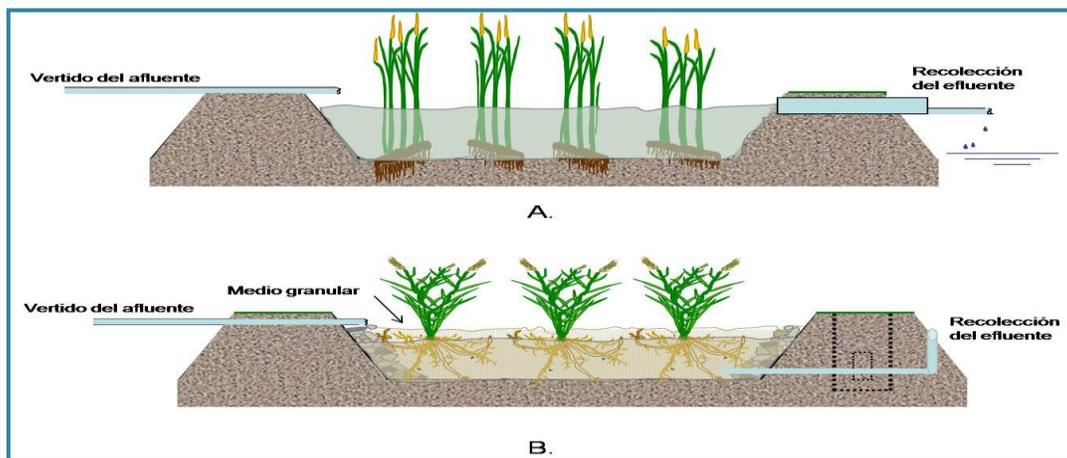


FIGURA 1. TIPOS DE HUMEDALES CONSTRUIDOS: A. CON FLUJO SUPERFICIAL Y B. CON FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (GARCÍA Y CORZO, 2008)

En los sistemas de flujo superficial el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos y hojas de las plantas.

En los humedales de flujo subsuperficial la circulación del agua es de tipo subterráneo a través de un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas. La profundidad de la lámina de agua suele ser de entre 0.3 y 0.9 m. La biopelícula que crece adherida al medio granular y a las raíces y rizomas de las plantas tiene un papel fundamental en los procesos de depuración del agua.

Las principales diferencias de los sistemas de flujo subsuperficial respecto a los superficiales son: mayor capacidad de tratamiento (admiten mayor carga orgánica), bajo riesgo de contacto del agua con las personas y de aparición de

insectos y menor utilidad para proyectos de restauración ambiental debido a la falta de lámina de agua accesible (García y Corzo, 2008).

2.4.1.1 Humedales de flujo subsuperficial.

Un humedal de flujo subsuperficial, puede considerarse como un reactor biológico tipo “proceso biopelícula sumergida”. Está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado (Zambrano *et al.*, 2004). El agua entra por uno de sus extremos y se reparte, atravesando la zona de grava plantada con los helófitos. En el otro extremo el agua es recogida en el fondo. El nivel máximo se regula de manera que no aflore la lámina de agua y se mantenga unos centímetros por debajo de la grava, haciendo visitable el humedal e impidiendo la proliferación de moscas y mosquitos (Lahora, 2002).

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrimentos y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Los humedales artificiales construidos logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial. Además, interactúan con la atmósfera (Llagas y Gómez, 2006).

Los humedales construidos consisten en agua, sustrato, y plantas emergentes. Otros componentes importantes de los humedales, son las comunidades de microorganismos (USEPA, 2000).

Sustratos, sedimentos y restos de vegetación.

Los sustratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca. El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación son importantes por varias razones:

- Soportan muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.

- El sustrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, la fijación de microorganismos y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal.

Vegetación.

Un tipo especial de macrófitas son los helófitos, plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra aérea emergente. Los helófitos, más usados en depuración son tules (*Typha sp*), carrizos (*Phragmites sp*), juncos (*Juncus sp*), *Scirpus*, *Carex*, etc. (Lahora, 2002).

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (los tallos, raíces, rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión.

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos (Zúñiga, 2004).

Microorganismos.

Una característica fundamental de los humedales es que sus funciones son principalmente reguladas por los microorganismos y su metabolismo. Los microorganismos incluyen bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono orgánico y muchos nutrientes.

La actividad microbiana:

- Transforma un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Altera las condiciones de potencial redox del sustrato y así afecta la capacidad del proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrimentos.

Algunas transformaciones microbianas son aerobias, mientras otras son anaerobias. Muchas especies bacterianas son facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aerobias y anaerobias en respuesta a los cambios en las condiciones medioambientales.

Las poblaciones microbianas se ajustan a los cambios en el agua que les llega y se pueden extender rápidamente cuando se tiene la suficiente energía. Cuando las condiciones medioambientales no son convenientes, muchos microorganismos se inactivan.

La comunidad microbiana de un humedal construido puede ser afectada por sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados y debe tenerse cuidado para prevenir que tales sustancias se introduzcan en las cadenas tróficas en concentraciones perjudiciales (Álvarez, 2005)

La alimentación al humedal de flujo subsuperficial horizontal se inicia una vez finalizada la plantación de macrofitas lo que favorece su crecimiento. Para un óptimo mantenimiento del humedal de flujo subsuperficial se debe tener en cuenta los siguientes puntos.

- Limpieza periódica de los sistemas de distribución en cabecera de los canales.

- Evitar, en la medida de lo posible, pisar el sustrato del humedal, con el objeto de evitar su compactación y disminución de su conductividad hidráulica.
- Realizar el corte de las plantas secas una vez finalizado su periodo vegetativo.
- Especialmente en los dos primeros meses de operación, eliminar las malas hierbas que puedan competir con las plantas del humedal.
- Control de la aparición de enfermedades en las plantas del humedal.
- En el caso de contar con tanques sedimentadores (Imhoff) o fosas sépticas en cabecera, extracción periódica de los lodos acumulados.
- Seguimiento continuado de todo el proceso operativo (García y Corzo, 2008).

En un humedal de flujo subsuperficial, el principal problema puede ser la colmatación del sustrato, con lo que si éste se ha seleccionado de forma adecuada, la principal causa de la colmatación habrá que buscarla en el mal funcionamiento de los tratamientos previos. Se aconseja detener la alimentación durante unas dos semanas. En invierno es normal que se produzca la muerte de hojas y tallos. Si esto ocurriese en otra época del año y no se debiese a la falta de agua, la causa podría radicar en la presencia de sustancias tóxicas en las aguas a depurar (Martín *et al.*, 2006).

a. Ventajas

Las principales ventajas de un humedal de flujo subsuperficial son:

- Un bajo costo de construcción y operación.
- Fácil manejo del sistema
- Mínima o nula necesidad de equipos mecánicos, electricidad u operadores calificados para su operación.
- Nula producción de biosólidos y lodos residuales que por su capacidad de absorción de metales pesados son perjudiciales para el sistema.
- Disminución de producción de olores, vectores y riesgo publico
- Incremento de la actividad biológica por mayor área superficial disponible para el tratamiento.
- El crecimiento de biopelículas sobre el medio poroso y las raíces de las macrofitas (USEPA, 2000, Zúñiga, 2004, García *et al.*, 2002).

3. Antecedentes

El SUTRANE de la Asociación Mateo Quinto se construyó en el año de 1993 como una planta ecológica tratadora de aguas residuales de origen doméstico pues desde entonces y hasta la actualidad no se cuenta con acceso a la red de agua potable ni de drenaje y este tipo de ecotecnología respondía a la necesidad de disponibilidad de agua, aunque solo se recupera para riego de uso agrícola, frutícola y de pastos de conservación. El diseño del SUTRANE fue hecho como una tesis de Licenciatura de la carrera de Arquitectura de la Universidad Iberoamericana campus Puebla.

En el año 2005 se realizaron análisis del pH y de la demanda bioquímica del oxígeno (DBO_5) en diferentes depósitos del sistema (aguas negras, aguas jabonosas, mezcla y sitio final de depósito de aguas del humedal) las cuales fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Autónoma de Chapingo registrando valores de pH cercanos a la neutralidad y para la DBO_5 en algunos sitios se ubicaron fuera del límite establecido de 150 mg L⁻¹ para uso de riego agrícola de acuerdo con NOM-001-SEMARNAT-1996.

En el año del 2006 se realizó una evaluación multicriterio de la Asociación Civil Mateo Quinto, como parte de una tesis de maestría del Colegio de Post-graduados campus Puebla. Dentro de este estudio se evaluó el funcionamiento técnico del SUTRANE, para lo que se realizaron muestreos en dos semanas diferentes del mes de noviembre, en donde se obtuvo la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) y el número más probable de coliformes fecales (NMP), para la evaluación de estos parámetros se consideraron los límites permisibles establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 para “uso en riego agrícola” (García, 2007). En este estudio se encontró que los niveles de estos parámetros se encontraban dentro de los límites permisibles en la norma antes citada.

Como parte de un estudio técnico para la fundación Gonzalo Rio Arronte, en el 2010 se realizó un análisis de metales pesados (Pb, Cr, Fe y Zn) para los depósitos de aguas negras, aguas jabonosas, el depósito de entrada y el depósito de salida del SUATRANE, en el cual se obtuvieron concentraciones mínimas o nulas de estos elementos.

Para plomo las concentraciones fueron de 0 mg L⁻¹, para todos los compartimentos, para cromo de 0.01 mg L⁻¹ para el depósito de salida y no se encontró este elemento en los otros depósitos, mientras que para los demás

elementos se encontraron concentraciones mínimas en todos los compartimientos con promedios de 0.03 para el hierro y 0.010 para el Zinc.

Al comienzo del presente estudio, el sistema se encontraba con un visible deterioro debido a la falta de mantenimiento, encontrando un crecimiento excesivo de las macrofitas plantadas en las canaletas del humedal, plantas de carrizo y alcatraz en una proporción aproximada del 90% y el 10% respectivamente (Fotos 1 y 2), además de la presencia de malezas. Asimismo, las canaletas y los pasillos que las separan estaban cubiertos por suelo y hojarasca que caían dentro del sistema por el arrastre de terrígenos provenientes de las pendientes que lo rodean y de árboles aledaños.



FOTOS 1 Y 2. CRECIMIENTO EXCESIVO DE MACROFITAS Y DE MALEZAS EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL.

El depósito de aguas jabonosas (Foto 3) y la canaleta de entrada donde se mezclan las aguas negras y las jabonosas (Foto 4), se encontraban saturados de hojarasca proveniente de la vegetación aledaña, así como de malezas que crecían alrededor e invadían a esta última. Además ambos sitios contenían una gran cantidad natas (conglomerados de grasas) que se generan en el depósito de aguas jabonosas, las cuales no eran extraídas con regularidad.



FOTO 3 Y 4. ACUMULACIÓN DE HOJARASCA Y NATAS EN EL DEPÓSITO DE AGUAS JABONOSAS; INVASIÓN DE MALEZAS EN LA CANALETA DE ENTRADA.

Limpieza

Con base en el evidente abandono del SUTRANE y su relevancia en otras unidades productivas y de conservación al interior de la Asociación Civil, como primera medida se realizó un aclareo de la vegetación y la limpieza de todo el sistema, que se puntualiza a continuación:

1. Aclareo y eliminación malezas

Se realizó la poda de las macrofitas que se encontraban plantadas en las siete canaletas del filtro biofísico (humedal) dejando el carrizo en una talla que permitiera el desarrollo de nuevos brotes, mientras que a los alcatraces se podaron y cortaron las flores, dejando solamente las hojas que se encontraban en posición vertical (Foto 5).

Se eliminó toda la vegetación ajena al sistema que había invadido las canaletas del filtro biofísico (humedal), así como los pasillos que dividen a las mismas.

Este trabajo favoreció el tener un libre acceso para realizar otras labores al interior del filtro biofísico.



FOTO 5. ACLAREO DE CARRIZOS Y ALCATRACES EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL.

2. Limpieza de la canaleta de entrada

Se realizó la limpieza, extrayendo la hojarasca (Foto 6 y 7) que caía dentro de la canaleta procedente de los árboles aledaños al sistema, además de las natas provenientes del depósito de aguas jabonosas, que se encontraba colmatada de las mismas.



FOTO 6 Y 7. EXTRACCIÓN DE HOJARASCA DE LA CANAleta DE ENTRADA.

3. Extracción de natas

Se extrajeron las natas que se producen en el depósito de trampas construido para tal fin, generadas después de pasar por el depósito de aguas jabonosas resultado de las actividades de aseo personal, lavadoras y lavaderos, así como en la limpieza de trastes.

Esta actividad se realizó en cada visita o cada vez que se observó la presencia de natas en la trampa que se encontraba anexo al depósito de aguas jabonosas. (Foto 8 y 9).



FOTO 8 Y 9. DEPÓSITO DE AGUAS JABONOSAS SATURADO DE NATAS; EXTRACCIÓN DE NATAS (CONGLOMERADOS DE GRASAS) PROVENIENTES DE LAS AGUAS JABONOSAS.

4. Limpieza del filtro biofísico (humedal)

Además de la eliminación de malezas, terrígenos y la hojarasca fue necesario realizar una limpieza de las canaletas, con lo cual se pretendía optimizar el funcionamiento todo el sistema.

Dicha limpieza consistió en las siguientes actividades:

- Extracción de macrofitas

Se realizó la extracción consecutiva de todas las macrofitas que se encontraban plantadas en las canaletas del humedal (Foto 10 y 11), con la finalidad de facilitar la limpieza de las canaletas, disminuir el número de organismos en cada una de estas y deshijar las plantas para poder realizar la posterior inoculación de los bulbos e hijuelos.



FOTO 10 Y 11. EXTRACCIÓN CONSECUTIVA DE MACROFITAS PARA SU POSTERIOR INOCULACIÓN.

- Extracción de hojarasca

Se retiró la hojarasca que se encontraba dentro del humedal (Foto 12 y 13), ya que el sistema se encontraba colmatado y esto provocaba que los tubos de abastecimiento se bloquearan y por ende las canaletas se inundaran de manera irregular.



FOTOS 12 Y 13. ACUMULACIÓN DE HOJARASCA EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL

- Limpieza y de las canaletas del humedal

Se realizó la limpieza de las canaletas (Fotos 14 y 15) para favorecer los procesos de degradación dentro de estas, eliminando en la medida de lo posible la hojarasca y material ajeno al sistema.



FOTOS 14 Y 15. LIMPIEZA DE LAS CANALETAS DEL HUMEDAL

- Rellenado de canaleta

Se rellenaron las canaletas con tezontle (Foto 16 y 17) para tener el mismo nivel de sustrato en todas.



FOTOS 16 Y 17. COLOCACIÓN DE TEZONTLE ROJO EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL

- Inoculación.

Los bulbos de alcatraz y plantas del carrizo (Fotos 18 y 19) se trasladaron al laboratorio para su inoculación.

Para este procedimiento se les sometió a estrés hídrico por un periodo aproximado de 20 días, con la finalidad de que el inoculo fuera absorbido por las plantas de forma más eficiente.



FOTOS 18 Y 19. SELECCIÓN DE ALCATRACES PARA INOCULACIÓN MICROBIANA DE BULBOS.

- Plantación.

Las plantas inoculadas se llevaron al sistema para ser plantadas en las canaletas del humedal.

La plantación (Foto 20) se realizó en forma de zigzag a una distancia aproximada 20 cm entre cada individuo, teniendo una densidad de 20 individuos por canaleta (Foto 21). Cuando se consideró que las plantas estaban bien establecidas por el tamaño que presentaban, se realizó un reacomodo de las plantas debido a que la distancia entre ellas no era la apropiada para su desarrollo,

Para el caso del alcatraz se plantaron grupos de 3 individuos de forma lineal al centro de la canaleta con una distancia aproximada de 90 cm entre un grupo y otro, teniendo una densidad de 30 plantas por canaleta. Para el caso del carrizo las plantas se colocaron en la misma disposición que los alcatraces con una densidad de 10 plantas por canaleta, tomando en cuenta que los carrizos estaban más desarrollados que el alcatraz y un individuo se constituía de 3 tallos, por lo que el número de individuos era equivalente.



FOTOS 20 Y 21. PLANTACIÓN DE MACROFITAS YA INOCULADAS EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL

- Diseño del humedal.

Se siguió un diseño experimental de tres tratamientos con repetición para el cual se consideró tener la misma proporción de las dos especies de macrofitas (alcatraz y carrizo), que se encontraban originalmente en el sistema por lo que se plantaron de la siguiente manera (Foto 22):

Canaleta 1.- Alcatraz

Canaleta 2.- Carrizo

Canaleta 3.- Alcatraz/Carrizo

Canaleta 4.- Alcatraz/Carrizo sin inóculo (Testigo)

Canaleta 5.- Alcatraz

Canaleta 6.- Carrizo

Canaleta 7.- Alcatraz/Carrizo



FOTO 22. DISEÑO EXPERIMENTAL EN LAS CANALETAS DEL HUMEDAL (CON BANDERINES NARANJAS SE ENUMERARON LOS ALCATRAZES Y CON BLANCOS LOS CARRIZOS).

4. Planteamiento del problema.

La Asociación Civil Mateo Quinto A.C., que trabaja desde hace 28 años como un hogar permanente o temporal de niños, adolescentes y jóvenes con discapacidad intelectual y/o física tiene como objetivos fundamentales el desarrollo integral de sus beneficiarios y el contar con un sistema integral de recursos ecológicos y productivos como fuente de sustento y terapia ocupacional.

El predio con el que cuenta esta Asociación Civil se ubica dentro de una zona rural periurbana en situación de marginación dentro del Municipio de Amozoc, Puebla. Para el cuál todas sus localidades se ubican por la CONAPO dentro de un nivel de marginación, siendo el 68% de muy alto y alto grado (Anzaldo y Prado, 2007).

En este contexto la Asociación no cuenta desde sus orígenes con drenaje municipal para canalizar las aguas residuales que se generan al interior de la misma. Para subsanar esta deficiencia hace 15 años se instaló un Sistema Unitario de Tratamiento y Rehúso de Agua Nutriente y Energía (SUTRANE). Desde entonces, las aguas tratadas con este sistema se han empleado para riego en diversas unidades, como por ejemplo en pastos en un área de conservación y en una huerta frutal con la que cuenta dicha Asociación.

Sin embargo, el SUTRANE ha ido sufriendo un deterioro con el paso del tiempo de manera considerable, por lo que actualmente no trabaja alrededor del 50% de su capacidad. Así, al inició del presente trabajo de investigación solamente operaban 4 canales de oxidación de los siete construidos, además de que la falta de mantenimiento favoreció un crecimiento desmedido de las macrofitas instaladas y malezas. Asimismo, dentro de las canaletas de crecimiento se había acumulado hojarasca derivada de la cubierta forestal aledaña al sistema que limitan los procesos de oxidación de la materia orgánica. Finalmente, cuando se plantaron las macrofitas acuáticas del sistema sus raíces no recibieron un tratamiento previo con inóculos bacterianos que favorecieran un adecuado tratamiento de las aguas residuales al establecerse una biopelícula y consorcios que propiciarán procesos de degradación microaerobia.

5. Justificación.

La adecuación del humedal de flujo subsuperficial en las canaletas del filtro biofísico del SUTRANE, permite obtener agua de mejor calidad, esto debido al cultivo de macrofitas que se inocularon con un agregado bacteriano, las cuales hacen más eficientes los procesos de biotransformación que se llevan a cabo dentro del sistema. El humedal además de brindar beneficios al mejorar el tratamiento del agua residual para su uso dentro de la Asociación Civil, sirve a corto plazo como un módulo de producción intensiva de plantas de ornato, esto de acuerdo con la visión de la comunidad de contar con sistemas ecológicos y productivos, que favorezcan un desarrollo sustentable. El diseño experimental que se realizó en esta tesis responde a la necesidad de conocer mejor la operación de estos sistemas para la optimización del tratamiento de las aguas residuales y comprobar si existen diferencias significativas al emplear tratamientos con dos tipos de macrofitas acuáticas (carrizos y alcatraces). Asimismo, además de las evaluaciones propuestas en las Normas Oficiales Mexicanas, gracias al desarrollo de técnicas modernas de biología celular y microscopía de epifluorescencia es posible conocer con mayor precisión la contribución en términos de densidad y biomasa bacteriana en los procesos de tratamiento de aguas residuales, lo que permite tener un mejor entendimiento de la operación de los mismos.

6. Objetivos.

Objetivo General.

Evaluar el funcionamiento de un humedal de flujo subsuperficial con el empleo de diferentes macrofitas (alcatraz, carrizo y combinación de ambas) con inóculos bacterianos, como componente del Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutriente y Energía (SUTRANE).

Objetivos particulares

- Evaluar el crecimiento vegetativo de las macrofitas para los diferentes tratamientos en el humedal.
- Estimar la cobertura vegetal en cada uno de los canales del filtro biofísico.
- Cuantificar la densidad y biomasa bacteriana en cada uno de los componentes del SUTRANE.
- Determinar la calidad del agua en los componentes del SUTRANE y compararlos con los requerimientos establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997).
- Establecer si en alguno de los tratamientos hay un mejor proceso de biodepuración del agua tratada.
- Proponer modificaciones estructurales a las instalaciones del SUTRANE con base en el adecuado establecimiento de un humedal de flujo subsuperficial.

7. Hipótesis estadísticas nulas.

H1: No existen diferencias significativas en el desarrollo de las macrofitas en los diferentes tratamientos.

H2: La tasa de crecimiento vegetal es equivalente para los diferentes tratamientos.

H3: No existen diferencias significativas entre la densidad y biomasa bacteriana en el agua procedente de los diferentes tratamientos.

H4: No hay diferencias significativas entre la calidad del agua obtenida con los diferentes tratamientos.

8. Zona de estudio.

8.1 Municipio de Amozoc, Puebla.

El municipio de Amozoc se localiza en la parte central del estado de Puebla. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 18° 00'30" y 19° 12' 12" de latitud norte y los meridianos 97° 59'18" y 98° 08' 42" de longitud occidental. Limita al norte con el municipio de Puebla y Tepatlaxco de Hidalgo, al sur con Cuautinchán, al oriente con los municipios de Tepatlaxco y Acajete y al poniente con el municipio de Puebla (Centro Nacional de Desarrollo Municipal,1999).

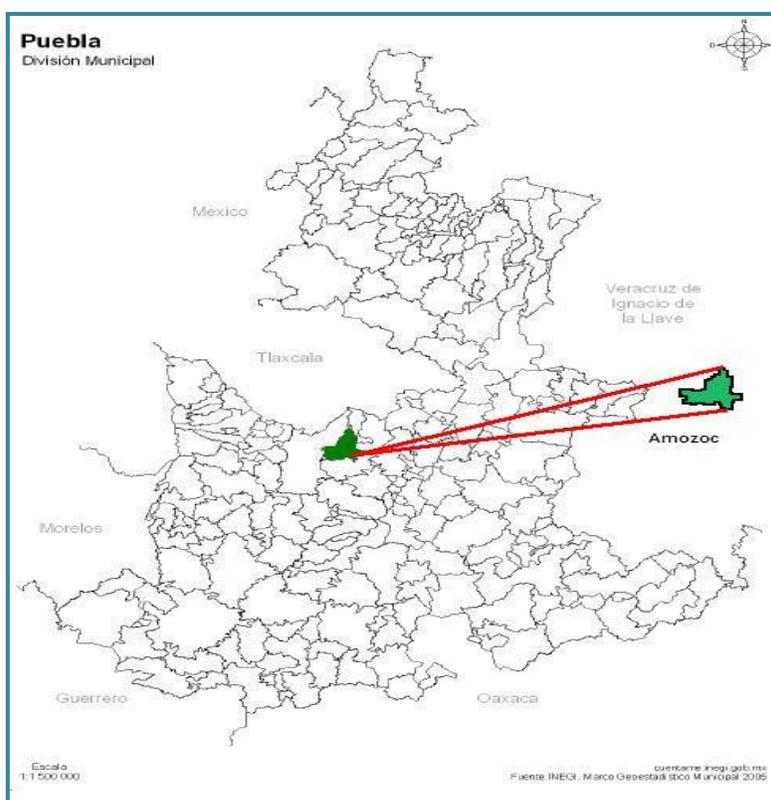


FIGURA 2. DIVISIÓN MUNICIPAL DEL ESTADO DE PUEBLA (INEGI, 2006)

8.1.1 Geografía y Orografía.

En el municipio confluyen tres regiones morfológicas: al norte, las estribaciones inferiores de la Malinche, al centro el Valle de Tepeaca, y al sur la Sierra de Amozoc (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999).

8.1.2 Hidrología.

El municipio pertenece a la cuenca del Atoyac, una de las más importantes del Estado; sin embargo, no cuenta con corrientes superficiales importantes.

Tanto en las partes altas de la Malinche como de la sierra de Amozoc se desprenden arroyos intermitentes que bañan el municipio y confluyen al centro, en el Valle de Tepeaca, de donde se dirige hacia el oriente, o al poniente, para posteriormente servir como afluente del Atoyac (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999).

8.1.3 Clima.

El municipio se localiza dentro de la zona de los climas templados del Valle de Tepeaca; identificándose el clima templado subhúmedo con lluvias en verano C(w) (García, 1988) que se presenta en una franja latitudinal del sur del municipio predominando en las primeras estribaciones de la Malinche; y el clima semifrío subhúmedo con lluvias en verano C(E)(w) (García, 1988) presentándose en las zonas más altas del volcán la Malinche, excluyendo la cumbre que presenta clima frío (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999).

8.1.4 Vegetación.

La mayor parte del municipio presenta zonas dedicadas a la agricultura de temporal. La sierra de Amozoc presenta bosques de encino con vegetación secundaria arbustiva, así como pequeñas áreas de pastizal inducido. (Centro Nacional de Desarrollo Municipal, 1999).

8.2 Localización de la Asociación Civil Mateo Quinto.

La Asociación Civil Mateo Quinto se ubica a los 19°02'56" de latitud norte y 98°04'02.39" de longitud occidental en la carretera Federal Puebla-Tehuacán, Km 14.5 en el Municipio de Amozoc, Puebla (Fig. 3).



FIGURA 3. POLÍGONO (LÍNEAS ROJAS) DEL ÁREA DE LOS TERRENOS DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO (GOOGLE EARTH, 2010).

8.3 Características generales del Sistema Unitario de Tratamiento y Reúso de Agua Nutrientes y Energía (SUTRANE) de la Asociación Civil Mateo Quinto A.C.

El SUTRANE de la Asociación Civil Mateo Quinto (Figura 4) está compuesto de un filtro bioquímico compuesto por dos sistemas, el primero donde se depositan aguas residuales domésticas provenientes de lavabos, lavadoras, vertederos y fregaderos, dividido en una trampa de natas que tiene una dimensión de 1.5m de ancho x 1.5m de largo y una fosa de aguas con altas concentraciones de jabón que mide 1.5m ancho x 3.0m de largo (1) y el segundo que es una fosa digestor de aguas negras que presenta dimensiones de 1.5m de ancho x 10m de largo (2), ambos sistemas de fosas construidas de concreto.

El punto que se marca en el plano arquitectónico con el número (3), está constituido por la canaleta de entrada que funciona como mezcladora, en este punto se combinan las aguas con altas concentraciones de jabón (procedentes de lavabos, lavaderos, vertederos y fregaderos) así como las aguas negras (procedentes de escusados, letrinas, etc.), para su posterior ingreso al filtro biofísico. Este canal presenta dimensiones de 6.5m de largo x 0.5m de ancho.

El filtro biofísico está constituido por siete canales (4), (5), (6), (7), (8), (9) y (10), que funcionan como humedales artificiales de flujo subsuperficial, sus dimensiones son 10m de largo x 0.80m de ancho, estos filtros están impermeabilizados y

contienen tezontle que sirve como sustrato. Sobre este sustrato se cultivan macrofitas (alcatraz y carrizo) que realizan un proceso de depuración del agua que entra en el sistema.

Finalmente se encuentra la fosa colectora de excedentes (11), se trata de un depósito donde se acumula el agua que pasa por los canales del filtro biofísico, las aguas excedentes que fueron tratadas con la ayuda de las macrofitas están enriquecidas por lo que se reutilizan actualmente en la Asociación para:

- Riego de una huerta de árboles frutales.
- Zona de conservación de pastos.

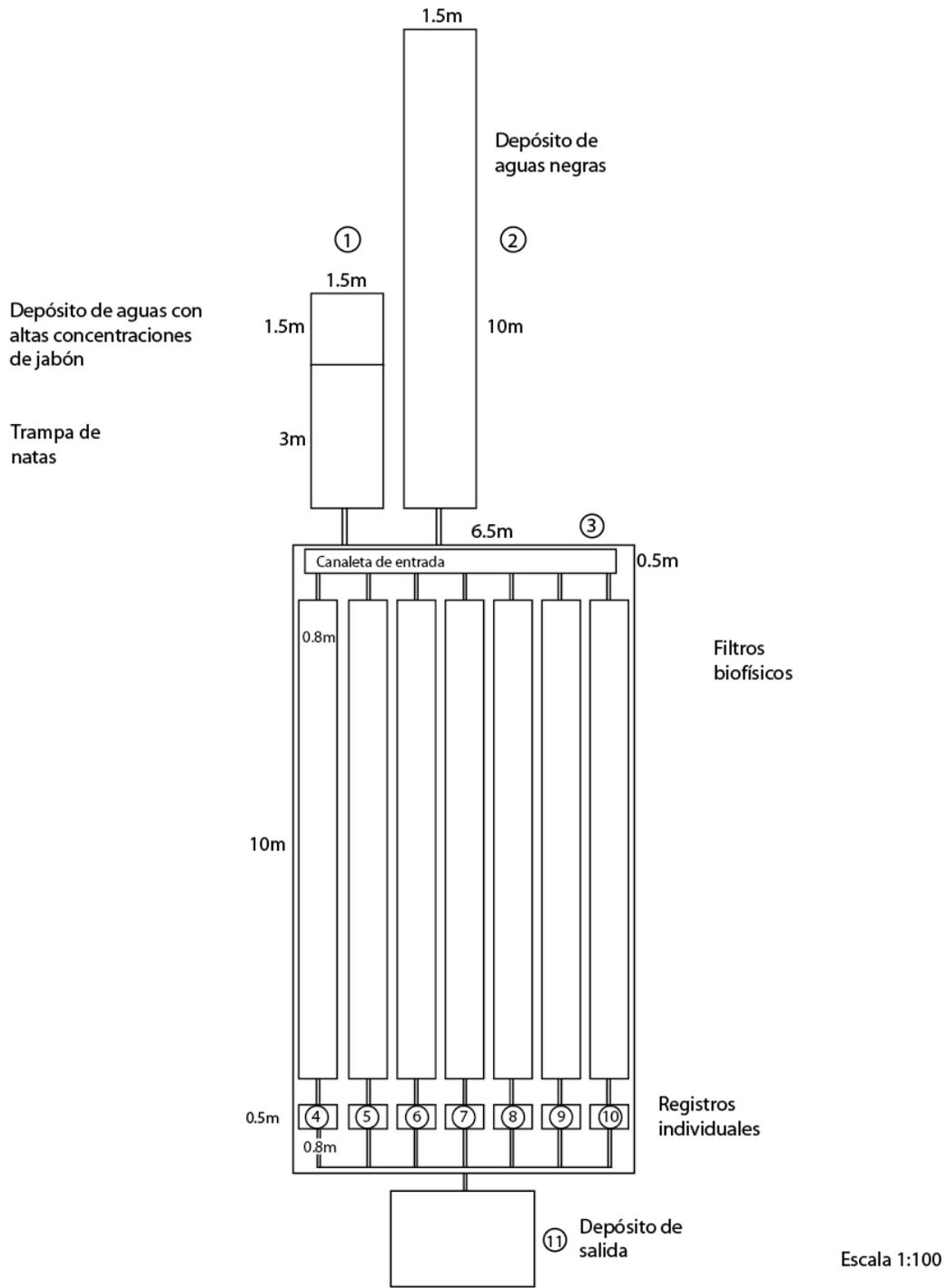


FIGURA 4. PLANO ARQUITECTÓNICO DEL SUTRANE DE LA ASOCIACIÓN CIVIL MATEO QUINTO

9. Método.

9.1 Tiempo de retención hidráulica

Para determinar el flujo promedio en el humedal se aplicó la siguiente ecuación:

$$Q = U * V$$

Dónde:

U: Número de usuarios

V: Flujo de agua residual generado por persona día⁻¹

El tiempo de retención hidráulico TRH (día), se refiere al tiempo que el agua debe permanecer en el sistema para alcanzar los niveles de remoción deseados. Para determinar dicho valor se empleó la siguiente ecuación (Reed et al., 1995):

$$t = \frac{L * W * d * n}{Q}$$

Dónde:

L: Longitud del estanque (m).

W: Ancho del estanque (m).

d: profundidad del agua en el estanque (m).

n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un por ciento y se expresa en forma decimal.

Q: Flujo promedio a través del humedal (m³ d⁻¹).

Para determinar el área del terreno (As) necesaria para la cama del humedal artificial de flujo subsuperficial se empleó la siguiente ecuación:

$$As = \frac{(Q) (t)}{(n) (d)}$$

Dónde:

Q: Flujo promedio a través del humedal. (m³ d⁻¹)

t: tiempo de retención hidráulico. (día)

d: profundidad del medio. (m)

n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un por ciento y se expresa en forma decimal.

Para determinar la proporción longitud / ancho (R_A) se empleó la siguiente ecuación:

$$R_A = A_s / W^2$$

Donde

A_s : Área del terreno (m^2)

W : Ancho del estanque (m).

9.2 Diseño Experimental.

Para el rediseño del humedal de flujo subsuperficial se realizaron las siguientes adecuaciones del SUTRANE.

Se realizó la limpieza del filtro biofísico eliminando las malezas y la sobrepoblación de macrofitas. Así como la remoción de la hojarasca y el sustrato superficial (tezontle), introduciendo tezontle nuevo.

Posteriormente se plantaron dos especies de macrofitas alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) y carrizo (*Phragmites australis*) inoculadas con un consorcio de bacterias (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Desulfovibrio*) en las canaletas del humedal (Fig. 5), siguiendo un diseño experimental de una vía con repetición de la siguiente manera:

- 1.- Alcatraces (Canaleta 1 y 5).
- 2.- Carrizos (Canaleta 2 y 6).
- 3.- Combinación de alcatraces y carrizos (Canaleta 3 y 7) (Fig. 6).
- 4.- Testigo. Alcatraz y carrizo sin inóculo (Canaleta 4)

Este diseño se realizó con el objeto de conocer si existen diferencias significativas en la calidad del agua resultante de los tratamientos citados anteriormente.

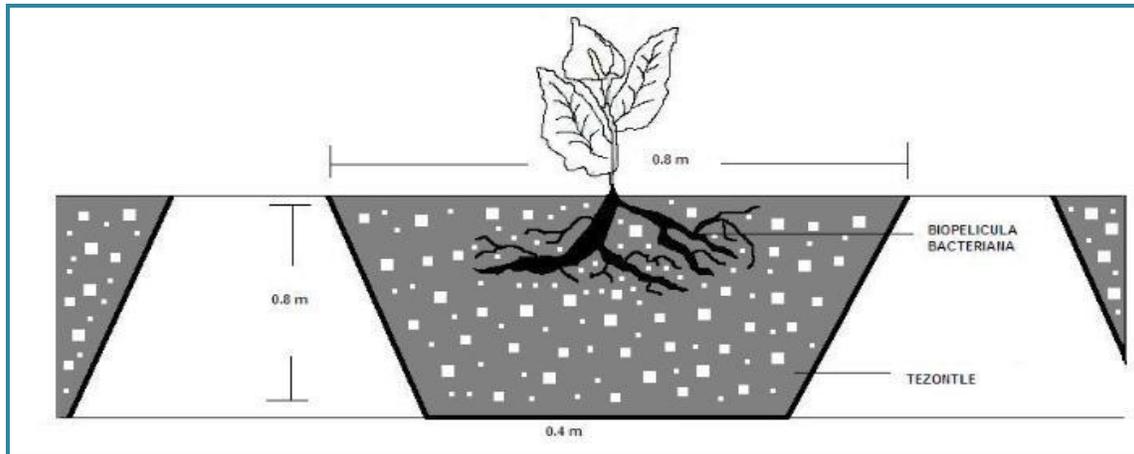


FIGURA 5. CANALETA CON EL CULTIVO DE MACROFITAS CON INÓCULOS BACTERIANOS EN SUS RAÍCES PARA EL DESARROLLO DE UNA BIOPELÍCULA.

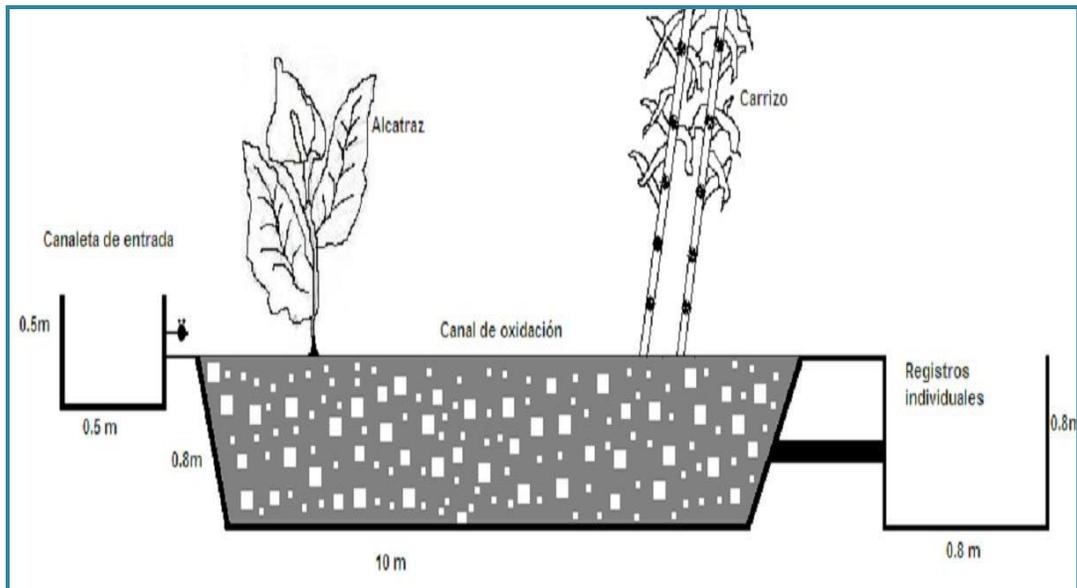


FIGURA 6. TRATAMIENTO EXPERIMENTAL EN EL QUE COMBINAN ALCATRAZES Y CARRIZOS EN EL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

9.3 Campo

El trabajo de campo se realizó dentro del SUTRANE de la Asociación Civil Mateo Quinto.

Se realizaron visitas mensuales para hacer adecuaciones al sistema durante un año a partir del mes de septiembre del año 2009.

En el mes de septiembre del año 2009 se realizó un muestreo para determinar la calidad del agua, en el que se obtuvieron resultados de la cantidad de coliformes totales y fecales, así como de los sólidos suspendidos totales y sedimentables.

Del mes de septiembre hasta diciembre del 2009 se realizó la limpieza del sistema, esta consistió en la extracción de plantas para dejar la misma cantidad de individuos en todas las canaletas y la poda de las plantas periódicamente para evitar el crecimiento desmedido, asimismo se eliminó el suelo y la hojarasca que se acumuló con el paso del tiempo por falta de mantenimiento.

A partir del mes de diciembre se inició la limpieza de las canaletas del humedal, así como la plantación de las macrofitas inóculadas y a partir de febrero se realizaron muestreos mensuales para evaluar la calidad del agua, en los meses de abril y agosto se efectuaron muestreos bacterianos y se realizó la medición de las plantas para evaluar su crecimiento, esto se hizo hasta el mes de noviembre del año 2010. El diseño experimental se pudo comenzar a evaluar a partir del mes de julio ya que todas las canaletas del humedal lograron tener características similares.

9.3.1 Muestreo de vegetación.

Para la evaluación del crecimiento vegetativo de las macrofitas en cada una de las canaletas que comprenden el humedal del sistema se realizaron las siguientes mediciones:

- Altura, cobertura de la estructura vegetativa (alcatraz).
- Altura y cobertura del tallo (carrizo).

Estas mediciones se registraron en una bitácora mensualmente para su posterior procesamiento.

9.3.2 Muestreo bacteriano.

Para el análisis bacteriano se tomaron muestras de agua con una botella Van Dorn de 3 L de capacidad en los once depósitos del SUTRANE y se depositaron en botellas de 125 mL las cuales se prepararon con 6.0 mL de formol libre de bacterias lo que permitió tener una concentración final de este fijador al 2% de acuerdo con lo propuesto por Porter y Feig (1980).

Para el picoplancton se tomaron muestras de agua en botellas de 150 mL las cuales contenían un volumen de 7.5 mL de formol al 40% libre de bacterias lo que permitió tener una concentración final de este fijador al 2%.

9.3.3 Muestreo de agua.

Se tomaron muestras de agua de los siguientes depósitos del sistema:

- Aguas residuales domésticas provenientes de lavabos, lavadoras y fregaderos (Aguas jabonosas)
- Aguas residuales domésticas provenientes de escusados, letrinas, etc. (Aguas Negras)
- Del depósito de entrada con ambos tipos de aguas residuales.
- En siete depósitos individuales de recolección de las canaletas del Humedal
- Depósito de salida (Fig.4)

En estos 11 puntos se realizaron los muestreos con ayuda de una botella Van Dorn de 3L de capacidad, el muestreo para la determinación de los nutrimentos se realizó en botellas de plástico de un litro, para el caso del nitrógeno se usaron botellas plásticas de medio litro a las que se les adicionaron 2 mL de H_2SO_4 como conservador, botellas DBO claras para el caso de oxígeno disuelto y demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), el muestreo bacteriano de coliformes totales y fecales se realizó con botellas esmeriladas color ámbar estériles a las que previamente se les agregó 0.1mL de solución de tiosulfato de sodio al 1% para inhibir la acción del cloro que pudiera contener la muestra.



FOTOS 23 Y 24. TOMA DE MUESTRAS EN LOS DEPÓSITOS COLECTORES DE LAS CANALETAS CON LA AYUDA DE BOTELLAS VAN DORN CON LA FINALIDAD DE CONSEGUIR MUESTRAS HOMOGÉNEAS Y REPRESENTATIVAS DE AGUA RESIDUAL

Cuadro 1. Parámetros que se realizaron in situ:

Parámetro	Método	Referencia
Oxígeno disuelto	Yodométrico	NMX-AA-012-SCFI-2001
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	Winkler – azida	NMX-AA-028-SCFI-2001
Coliformes Totales Coliformes Fecales	Fermentación de tubos múltiples	NMX-AA-042-2005
Temperatura	Termómetro de inmersión	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad Eléctrica	Conductímetro	NMX-AA-093-SCFI-2000
pH	Electrodo de calomel	NMX-AA-008-SCFI-2000



FOTOS 25 Y 26. DETERMINACIÓN DE OXÍGENO DISUELTO *IN SITU* POR LA TÉCNICA DE WINKLER CON LA MODIFICACIÓN DE AZIDA DE SODIO Y SIEMBRA DE COLIFORMES TOTALES POR LA TÉCNICA DE TUBOS MÚLTIPLES

Las muestras de agua que se tomaron en campo se trasladaron al laboratorio, dentro de hieleras con hielo y sal a una temperatura aproximada de 4°C.



FOTO 27. TRASLADO DE MUESTRAS AL LABORATORIO EN HIELERAS PARA REDUCIR LA TEMPERATURA A APROXIMADAMENTE 4° C

9.4 Laboratorio.

9.4.1 Bacterias.

Las bacterias se cuantificaron tiñendo su ADN con DAPI (4' 6-diamidino-2-fenilindol) sobre membranas negras de policarbonato con tamaño de poro de 0.2 μm montadas en aceite de inmersión, y se contabilizaron usando un microscopio de epifluorescencia (Leica, Alemania) con un lente de inmersión 100x en campos seleccionados al azar hasta que fueron contadas de 400 a 600 bacterias de acuerdo con Hobbie *et al.* (1977) y Porter y Feig (1980).

Asimismo, para la estimación de las medidas morfométricas de las bacterias se tomaron imágenes fotográficas con una cámara digital (Canon S-45) montada en el microscopio de epifluorescencia.

Recuentos del HPP (heterotrophic picoplankton)

Filtración y tinción con DAPI:

Se montó el material de filtración con un membrana blanca de policarbonato (de 0.2 μm de diámetro de poro y acoplada al sistema de vacío). Se añadió agua destilada prefiltrada por 0.2 μm y se agitó la botella de la muestra antes de tomar una alícuota. Se añadió el volumen de la muestra apropiado (variable dependiendo del origen de la muestra; entre 1 a 3 mL en la mayoría de los casos) con una pipeta automática.

Posteriormente se añadió del colorante una cantidad de 50 µl de DAPI (4,6-diamidino-2-fenilindol) y se esperó dos minutos y aplicó vacío suavemente. Cuando se concluyó el filtrado de toda el agua, se retiró la membrana de policarbonato con unas pinzas y se llevó a alcohol al 80% por 15 minutos, posteriormente se enjuagó en agua hasta su montaje. Se evitó la exposición directa a la luz.

Se montó sobre un portaobjetos y se añadió una nueva gota de VECTA shield (Fluorescent Mounting Media, Vector Labs) sobre la membrana (sin que el gotero tocará la membrana), colocando suavemente el cubreobjetos. En el borde del portaobjetos se rotuló el nombre de la muestra y el volumen filtrado. Se guardaron los filtros en congelación hasta el momento de su observación al microscopio.

Observación de las bacterias teñidas al microscopio de epifluorescencia: Se utilizó un microscopio de epifluorescencia de la marca Leica (modelo DFC300 FX). Se enfocó la preparación con luz ultravioleta. La mayoría de las células se vieron de color azul. Se tomaron 10 fotografías por canaleta, dependiendo de la cantidad de células por fotografía.

9.4.2 Parámetros realizados en el laboratorio.

Cuadro 2. Determinaciones físicas y químicas

Parámetro	Método	Referencia
Nitrógeno Amoniacal	Kjendahl	NMX-AA-026-SCFI-2001
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Winkler - azida	NMX-AA-028-SCFI-2001
Sólidos Sedimentables	Visual	NMX-AA-004-SCFI-2000
Sólidos Totales	Gravimétrico	NMX-AA-034-SCFI-2001

Cuadro 3. Determinaciones colorimétricas espectrofotométricas

Parámetro	Método	Referencia
Nitritos	Sufanilamida	NMX-AA-099-SCFI-2006
Fósforo Total	Digestión con persulfato	APHA, 1992
Ortofosfatos	Fosfomolibdato	APHA, 1992
Nitratos	Sulfato de brucina	NMX-AA-079-SCFI-2001
Demanda Química de Oxígeno	Digestión en reflujo cerrado	NMX-AA-030-SCFI-2001



FOTOS 28 Y 29. DETERMINACIÓN DE NITRÓGENO AMONICAL POR LA TÉCNICA DE KJENDAHL

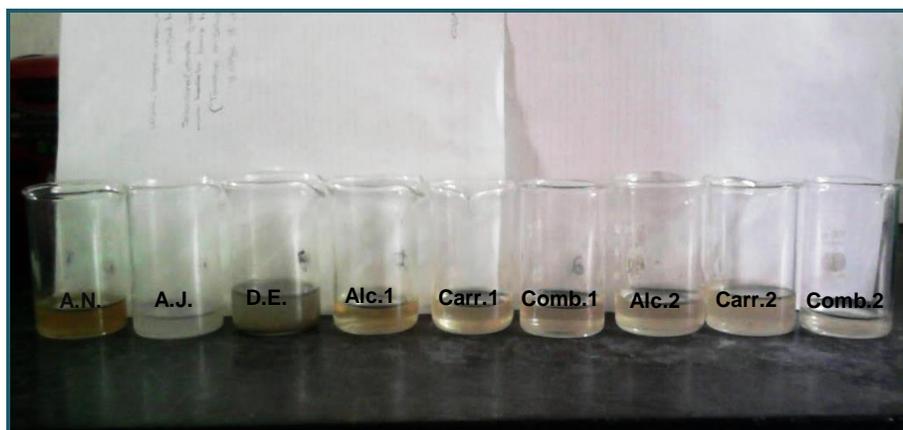


FOTO 30. VISTA DEL AGUA EXTRAIDA DE LOS CAMPARTIMENTOS DE ENTRADA Y DE LOS TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL, ANTES DE REALIZAR LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS

9.5 Gabinete.

9.5.1 Vegetación.

La cobertura de las plantas se calculó realizando mediciones de la altura y el diámetro de las dos especies. Posteriormente se aplicó la siguiente fórmula:

$$\text{Cobertura} = (\text{Ancho1}) * (\text{Ancho2}) * (\pi) * (\text{Altura})$$

La tasa de crecimiento relativo se obtiene aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{TCR} = \ln (\text{altura inicial}) - \ln (\text{altura final}) / \text{TI} - \text{TF}$$

Dónde:

$$\text{T I} = \text{tiempo inicial} \quad \text{T F} = \text{tiempo final}$$

9.5.2 Bacterias.

Se analizaron las dimensiones morfométricas de las bacterias (Psenner, 1993) con el programa Image J (área, perímetro, máximo Feret), posteriormente en una hoja de cálculo del programa Excel con macros se calcularon los siguientes parámetros bacterianos (longitud, ancho, volumen celular y contenido de carbono). Para el contenido de carbono se empleó la ecuación alométrica de Loferer-Krößbacher (Posch *et al.*, 2001).

Con los datos del volumen celular y del contenido de carbono multiplicados por la abundancia bacteriana se estimó el biovolumen y la biomasa respectivamente.

9.5.2.1 Análisis de Imágenes.

Se utilizó el programa Image J con el que se editaron las fotografías tomadas con una cámara Cannon modelo Power Shot 545, para eliminar materia orgánica y componentes inorgánicos, este programa cuenta las células así como el área, perímetro y máximo feret, para la selección de las células de un tamaño mayor de 0.05 μm^2 para el HPP. Los anteriores datos fueron llevados estos datos a una hoja de Excel la cual contiene macros para el cálculo del largo, ancho, volumen y contenido de carbono mediante la siguiente formula alométrica $\text{CC} = 218 \times \text{V}^{0.86}$ (Loferer-Krößbacher *et al.*, 1998) para el picoplancton procarionte heterotrófico

9.5.2.2 Densidad.

Para el cálculo de la abundancia se contó en el microscopio Leica las células en diferentes campos tratando de cubrir toda la muestra hasta llegar a 600 células este conteo se transfirió a una hoja de cálculo con la cual se determinó la densidad tomando en cuenta el conteo de células en cada cuadro en el microscopio que tiene una área de $277.55 \mu\text{m}^2$.

9.5.2.3 Biomasa.

Para la abundancia en el caso de HPP se realizó una base de datos en Excel donde se calculó la biomasa, abundancia y biovolumen, tomando en cuenta el ancho, largo, volumen, contenido de carbono y densidad.

BIOMASA = (Abundancia) (Contenido de Carbono)

Para comparar si existían diferencias significativas entre las abundancias, contenido de carbono y biomasa por canaleta se realizó un análisis de cajas múltiples con muesca (Salgado-Ugarte, 1992).

9.5.3 Parámetros químicos

Por sustitución en la recta de mejor ajuste obtenida a partir de las curvas patrón se determinaron las concentraciones de los siguientes parámetros nitratos, nitritos, fósforo total, fosfatos y demanda química de oxígeno (DQO).

Para la determinación de las concentraciones de los parámetros en el caso de, demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), coliformes totales, coliformes fecales, nitrógeno amoniacal, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, se utilizaron las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes a cada parámetro.

9.5.4 Análisis estadísticos.

Se comprobaron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de todos los datos obtenidos. En caso necesario se realizaron transformaciones para estandarizar los mismos. Posteriormente se realizó un análisis de varianza de una vía para estimar si existían diferencias significativas entre los tratamientos y si las había se hacía una prueba de Tukey para ver cuál tratamiento fue significativamente diferente (Kuehl, 2001).

10. Resultados

10.1 Tiempo de retención hidráulica

Para calcular el tiempo de retención hidráulica se consideró el gasto promedio por habitante de la comunidad y el volumen real del humedal, así se obtuvo un TRH teórico de 3.55 días, que representa la cantidad de tiempo que el flujo residual debió permanecer en cada canaleta del humedal para alcanzar niveles de remoción eficientes.

Valor de flujo promedio (Q) para el humedal de flujo subsuperficial.

$$Q = (25 \text{ personas}) (0.15 \text{ m}^3/\text{persona día}^{-1})$$

$$Q = 3.75 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$$

Tiempo de retención hidráulica:

$$t = (10 \text{ m}) (0.80 \text{ m}) (0.80 \text{ m}) (0.30) / 3.75 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1} = 3.55 \text{ días}$$

Área del terreno para todo el humedal:

$$A_s = (3.75 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}) (3.55 \text{ día}) / (0.30) (0.80 \text{ m}) = 13.31 \text{ m}^3 / 0.24 \text{ m}$$

$$A_s = 55.45 \text{ m}^2$$

El área total real de tratamiento para todas las canaletas es de 56 m²

La relación longitud ancho del humedal de flujo subsuperficial:

$$R_A = 55.45 \text{ m}^2 / (5.6 \text{ m})^2 = 1.76$$

10.2 Crecimiento de macrofitas.

Se realizaron mediciones de las alturas y las coberturas de las macrofitas en los meses de agosto y octubre del 2010, una vez que había transcurrido un tiempo pertinente desde su la plantación hasta un adecuado establecimiento y desarrollo. Con los valores de las aturas registrados se calcularon las tasas de crecimiento relativo para las dos especies.

El alcatraz tuvo una mayor tasa de crecimiento que el carrizo tanto en el tratamiento individual como en el combinado. Sin embargo, donde se presentaron

los crecimientos máximos fue en los tratamientos individuales para ambos casos, donde el alcatraz mostró un valor de 0.135 m mes^{-1} y el carrizo de 0.02 m mes^{-1} .

Cuadro 4. Tasa de crecimiento relativo para las macrofitas en el humedal de flujo subsuperficial.

Tasa de crecimiento relativo por mes					
Alcatraz	Carrizo	Combinada		Testigo	
		Alcatraz	Carrizo	Alcatraz	Carrizo
0.135 m mes^{-1}	0.02 m mes^{-1}	0.125 m mes^{-1}	0.01 m mes^{-1}	0.135 m mes^{-1}	0.01 m mes^{-1}

10.2.1 Alcatraz

Una vez establecido las especies de macrofitas utilizadas en el sistema se pudo observar un incremento de las coberturas de alcatraz con respecto al tiempo (Cuadro 5)

Cuadro 5. Valores promedio de la cobertura de los alcatraces, en los diferentes tratamientos del humedal de flujo subsuperficial, para los meses de agosto y octubre del 2010.

Cobertura (m^3)		
Tratamiento	Agosto	Octubre
Alcatraz	1.71 ± 2.45	4.91 ± 3.0
Combinada	2.77 ± 1.61	4.81 ± 3.44
Testigo	6.82 ± 2.83	10.2 ± 2.94

Asimismo, para las coberturas del alcatraz se encontraron diferencias significativas ($F_{2,81}=5.44$, $P<0.05$) entre los tratamientos (**Cuadro 6**).

Cuadro 6. Análisis de varianza para el logaritmo de las coberturas medias del alcatraz, en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	Valor de P
Entre grupos	19.31	2	9.65	5.44	0.006
Dentro de grupos	143.75	81	1.77		
Total (Corr.)	163.06	83			

Al realizar la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontró que no existían diferencias cuando la especie se encontraba sola y cuando se plantó de forma combinada, solamente se encontraron diferencias de estas con las coberturas del alcatraz en la canaleta testigo. (**Cuadro 7**).

Cuadro 7. Prueba de rangos múltiples de Tukey para el logaritmo de las coberturas medias del alcatraz en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limite
Alcatraz – Combinada		-0.011	0.63
Alcatraz – Testigo	*	-2.25	1.37
Combinada – Testigo	*	-2.24	1.42

* Diferencia estadísticamente significativa.

10.2.2 Carrizo

Para el carrizo también se presentó un incremento de su cobertura de forma individual y combinada con respecto al tiempo, siendo más evidente su desarrollo con respecto al testigo (Cuadro 8).

Cuadro 8. Valores promedio de la cobertura del carrizo, en los diferentes tratamientos del humedal de flujo subsuperficial, para los meses de agosto y octubre del 2010.

Cobertura		
Tratamiento	Agosto	Octubre
Carrizo	0.015 ± 0.02	0.155 ± 0.135
Combinada	0.01 ± 0.0125	0.11 ± 0.073
Testigo	0.238 ± 0.129	0.306 ± 0.14

Los datos de las coberturas del carrizo no cumplieron con los supuestos de normalidad y homocedasticidad, por lo que se realizó una prueba para datos no paramétricos.

Con la prueba de Kruskal-Wallis se encontró que hubo diferencias significativas entre los distintos tratamientos obteniendo un valor de $P < 0.001$ (**Cuadro 9**).

Cuadro 9. Prueba de Kruskal-Wallis para las coberturas del carrizo en todos los tratamientos de las canaletas del humedal.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Carrizo	39	32.90
Combinada	18	28.17
Testigo	18	58.89

Prueba estadística = 22.34 P-valor = **0.0000141**

Al realizar un análisis de cajas múltiples con muesca se encontró diferencia entre la cobertura de los carrizos en los tratamientos donde se utilizó esta especie, tanto en forma individual como combinada, con las coberturas del carrizo plantado en la canaleta testigo. Sin embargo, destaca para el carrizo plantado de forma individual la presencia de casos extraordinarios hacia coberturas mayores. (Figura 7).

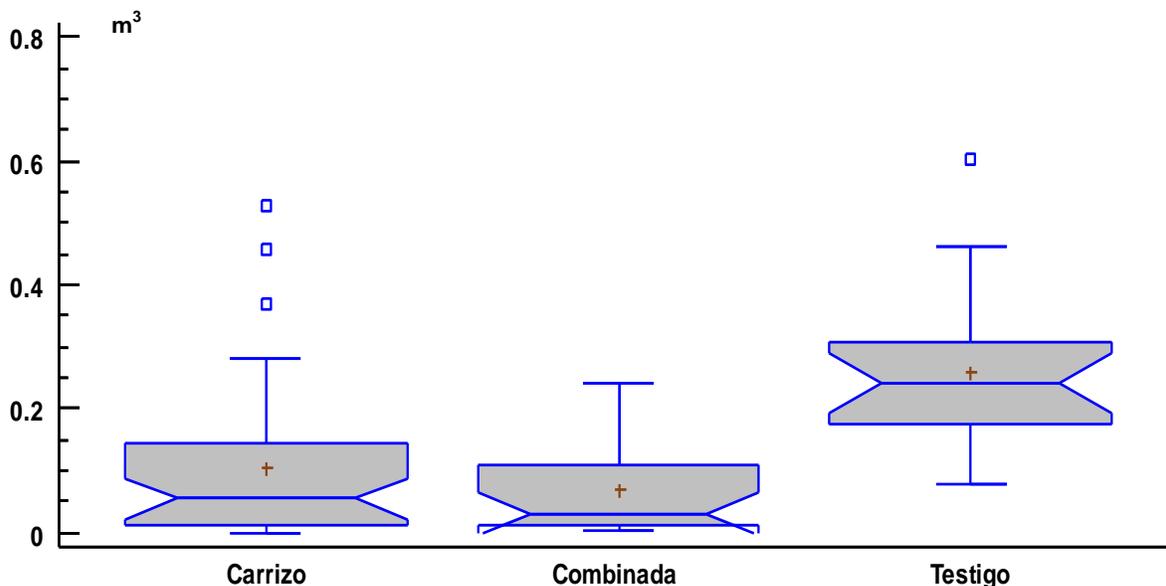


FIGURA 7. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS COBERTURAS DE CARRIZO EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL.

10.3 Bacterias.

10.2.1 Densidad Bacteriana

La mayor densidad bacteriana se registró en el depósito de aguas negras, con un valor de $2.50E+08 \pm 5.03E+07$ cél. mL⁻¹, mientras que el menor se obtuvo en la canaleta testigo con $4.26E+07 \pm 9.42E+06$ cél. mL⁻¹.

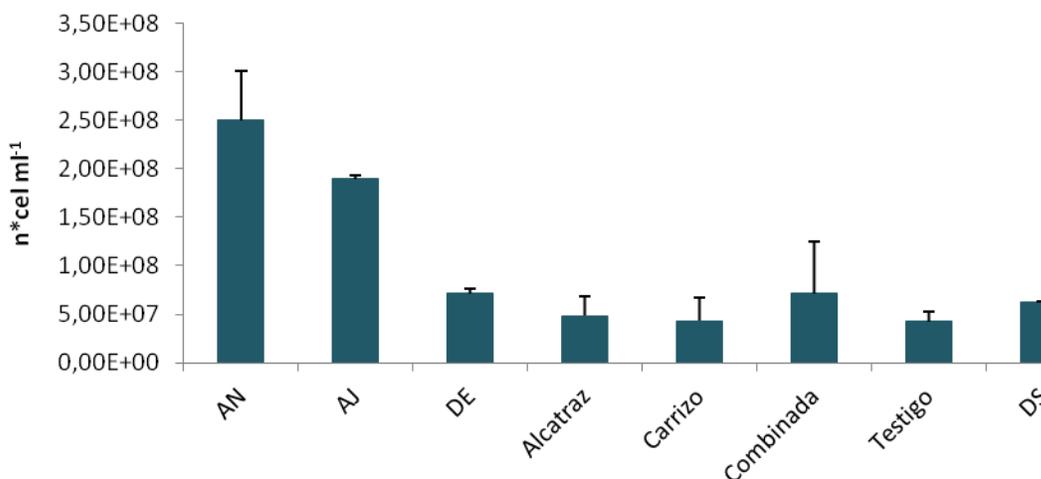


FIGURA 8. DENSIDAD BACTERIANA PARA TODOS LOS COMPARTIMENTOS DEL SUTRANE

Al realizar en análisis de varianza se encontraron diferencias significativas para el logaritmo de las medias de densidad bacteriana obteniendo valores de $F_{10,5}=8.58$ y de $P<0.05$ (**Cuadro 10**).

Cuadro 10. Análisis de varianza para el logaritmo de las concentraciones medias de las densidades bacterianas de todos los compartimentos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	P-Valor
Entre grupos	9.01009E16	10	9.01009E15	8.58	0.0142
Dentro de grupos	5.24841E15	5	1.04968E15		
Total (Corr.)	9.53494E16	15			

De acuerdo con la prueba de Tukey las diferencias se presentaron entre las densidades bacterianas cuantificadas en los depósitos de aguas negras y jabonosas con los demás compartimientos del SUTRANE, incluidos el depósito de entrada, las canaletas del humedal y el depósito de salida. Además se encontraron diferencias entre las densidades bacterianas de las canaletas 6 la cual estaba plantada con carrizos y la canaleta 7 donde había una combinación de las dos especies de macrofitas (**Cuadro 11**).

Cuadro 11. Prueba de rangos múltiples de Tukey para las densidades bacterianas cuantificadas en todos los compartimientos del SUTRANE.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limite
Aguas jabonosas–Depósito de entrada	*	1.78578E8	8.3284E7
Aguas jabonosas–Canaleta 1	*	1.94887E8	8.3284E7
Aguas jabonosas–Canaleta 2	*	2.05754E8	1.02002E8
Aguas jabonosas–Canaleta 3	*	2.00587E8	1.02002E8
Aguas jabonosas–Canaleta 4	*	2.14183E8	1.02002E8
Aguas jabonosas–Canaleta 5	*	2.03079E8	1.02002E8
Aguas jabonosas–Canaleta 6	*	2.09162E8	8.3284E7
Aguas jabonosas–Depósito de salida	*	1.88431E8	1.02002E8
Aguas negras–Depósito de entrada	*	1.17865E8	8.3284E7
Aguas negras –Canaleta 1	*	1.34174E8	8.3284E7
Aguas negras–Canaleta 2	*	1.45041E8	1.02002E8
Aguas negras–Canaleta 3	*	1.39874E8	1.02002E8
Aguas negras–Canaleta 4	*	1.5347E8	1.02002E8
Aguas negras–Canaleta 5	*	1.42365E8	1.02002E8
Aguas negras–Canaleta 6	*	1.48449E8	8.3284E7
Aguas negras–Depósito de salida	*	1.27718E8	1.02002E8
Canaleta 6 - Canaleta 7	*	-1.08273E8	1.02002E8

* Diferencia estadísticamente significativa

10.3.2 Contenido de Carbono

Para el caso del SUTRANE se concluyó que las bacterias con mayor contenido de carbono se localizaron en el depósito de aguas negras con un valor promedio de $74.07 \pm 36.26 \text{ fg C cel}^{-1}$, mientras que las más pequeñas se encontraron en el depósito de aguas jabonosas donde en promedio midieron $43.16 \pm 8.04 \text{ fg C cel}^{-1}$ (Figura 9).

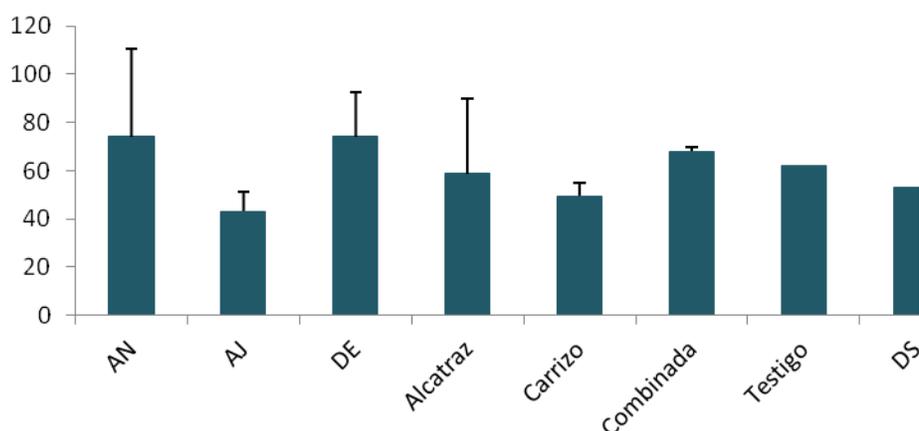


FIGURA 9. CONTENIDO DE CARBONO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Se realizó el análisis de varianza para las concentraciones medias del contenido de carbono y no se encontraron diferencias significativas entre los diferentes compartimentos del sistema (Cuadro 12).

Cuadro 12. Análisis de varianza para el contenido de carbono en todos los compartimentos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	P-Valor
Entre grupos	0.492764	10	0.0492764	0.23	0.9764
Dentro de grupos	1.06415	5	0.212829		
Total (Corr.)	1.55691	15			

10.3.3 Biomasa bacteriana

La biomasa bacteriana más grande se registró dentro del depósito de agua negras con un valor promedio de 17618.08 $\mu\text{g C L}^{-1}$ y la más pequeña para la canaleta testigo con un valor promedio de 2231.96 $\mu\text{g C L}^{-1}$ (**Figura 10**).

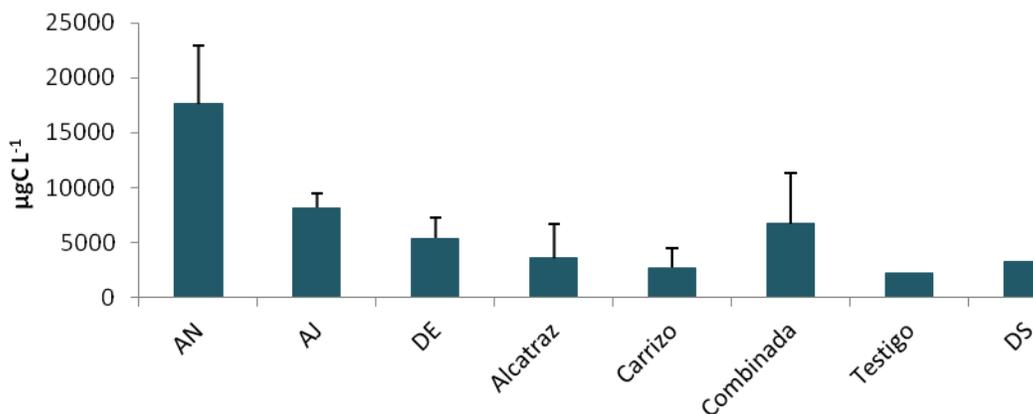


FIGURA 10. BIOMASA BACTERIANA PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

De acuerdo con el análisis de varianza para las concentraciones medias de la biomasa bacteriana no se encontraron diferencias significativas entre los compartimentos del sistema debido a que se obtuvieron valores de $F_{10,4}=.074$ con $P>0.05$ (**Cuadro 13**).

Cuadro 13. Análisis de varianza de la biomasa en todos los compartimentos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	P-Valor
Entre grupos	1.22378	10	1.22378	0.74	0.6849
Dentro de grupos	6.65127	4	1.66282		
Total (Corr.)	1.88891	14			

10.4 Temperatura.

Se registraron las temperaturas de los diferentes compartimentos del SUTRANE, donde se presentan las medias del depósito de aguas negras y los valores más altos y más bajos con respecto al depósito de aguas jabonosas y a las canaletas del humedal. El valor máximo se presentó para las aguas negras en el mes de mayo con 20 °C, y el menor se en las canaletas del humedal en el mes de febrero con 10.6 °C (**Figura 11**).

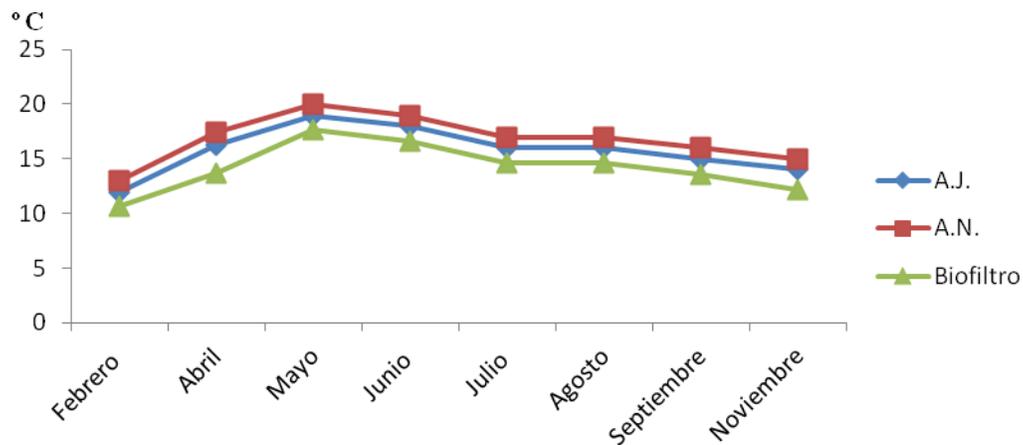


FIGURA 11. PROMEDIO DE LAS TEMPERATURAS REGISTRADAS EN LOS DIFERENTES COMPARTIMENTOS DEL SUTRANE.

10.5 Conductividad eléctrica.

Para la conductividad eléctrica el valor máximo se presentó en el depósito de aguas negras con $1.72 \pm 0.88 \text{ mS cm}^{-1}$, mientras que el valor mínimo se obtuvo en el depósito de aguas jabonosas $0.664 \pm 0.285 \text{ mS cm}^{-1}$ (**Figura 12**).

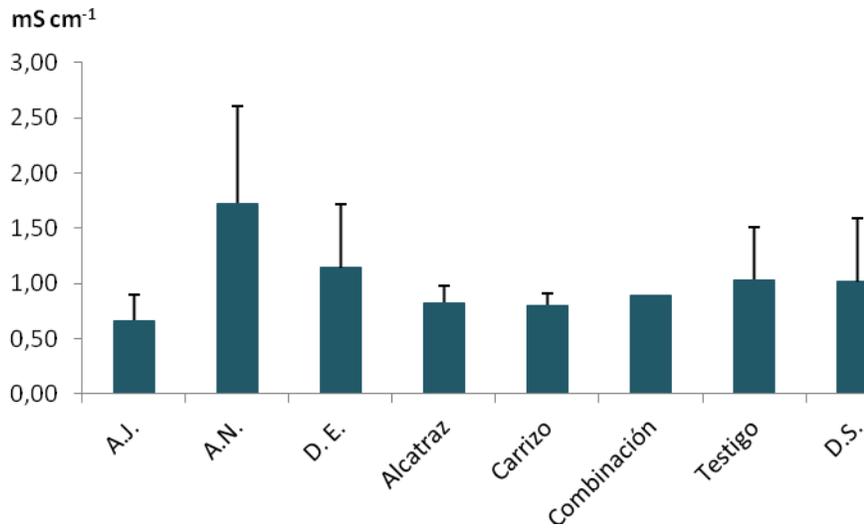


FIGURA 12. VALORES MEDIOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.6 pH

En el caso del pH los valores registrados en el sistema fluctuaron de neutros a ligeramente básicos, siendo el depósito de aguas jabonosas el que presentó el valor mínimo de 6.66 ± 0.28 , mientras que valor más alto se registró en el tratamiento de carrizos inoculado con un valor de 7.45 ± 0.19 (**Figura 13**).

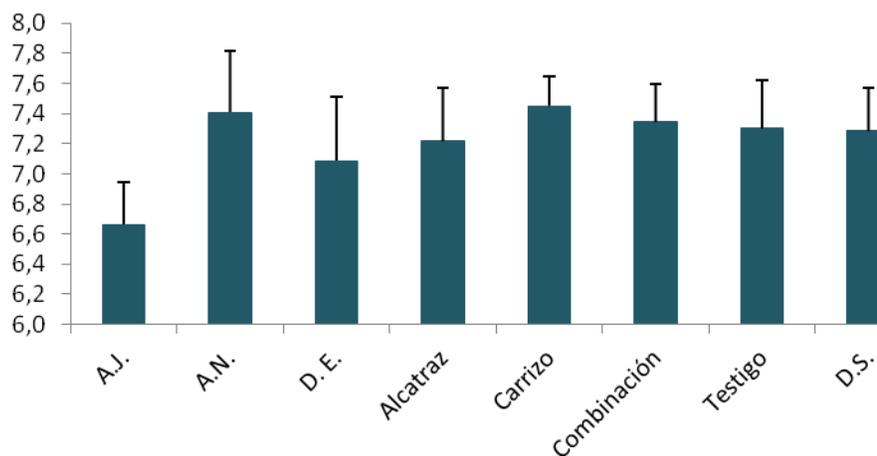


FIGURA 13. VALORES PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DEL PH REGISTRADO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.7 Oxígeno disuelto (OD)

Para el oxígeno disuelto las concentraciones registradas fueron bajas, típicas de estos sistemas. Las concentraciones de oxígeno registradas en la fase primaria fueron de 0 mg L^{-1} . Por otro lado puede observar que la concentración más alta se presentó en las canaletas donde fueron plantados alcatrazes inoculados con bacterias, donde la concentración promedio fue de $1.14 \pm 0.27 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que en el tratamiento donde se combinaron las dos especies de macrofitas y la canaleta testigo fue la que presentó la menor concentración de oxígeno disuelto de $0.58 \pm 0.05 \text{ mg L}^{-1}$ (FIGURA 14).

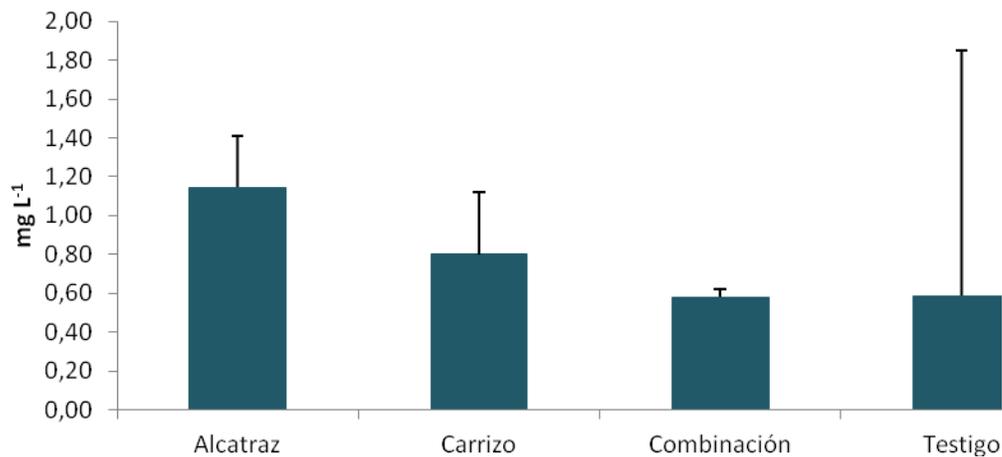


FIGURA 14. CONCENTRACIONES DE OXÍGENO DISUELTO REGISTRADAS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.8 Nitritos.

En este caso la concentración más alta se obtuvo en el depósito de aguas jabonosas con un valor promedio de 1.05 ± 0.49 y la concentración más pequeña se presentó en el depósito de salida con un valor promedio de 0.40 ± 0.24 mg L⁻¹ (Cuadro 14).

Cuadro 14. Concentraciones de nitritos registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	Concentración mg N-NO ₂ L ⁻¹
Aguas Negras	0.55 ± 0.30
Aguas Jabonosas	1.05 ± 0.49
Depósito de entrada	0.71 ± 0.37
Alcatraz	0.61 ± 0.50
Carrizo	0.78 ± 0.02
Combinada	0.48 ± 0.24
Testigo	0.62 ± 0.79
Depósito de Salida	0.40 ± 0.24

Al realizar el análisis de varianza para el logaritmo de las concentraciones medias de todos los compartimentos del SUTRANE no se encontraron diferencias significativas $F_{7.75}=1.22$, $P>0.05$.

Cuadro 15. Análisis de varianza para el logaritmo de las concentraciones de nitritos en los todos los compartimentos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	P-Valor
Entre grupos	7.79229	7	1.11318	1.22	0.3043
Dentro de grupos	68.6201	75	0.914935		
Total (Corr.)	76.4124	82			

Para los nitritos el mayor porcentaje de remoción se presentó en el depósito de salida con un valor del 62%, mientras que en para el caso del tratamiento con carrizos fue del 26% (**Figura 15**).

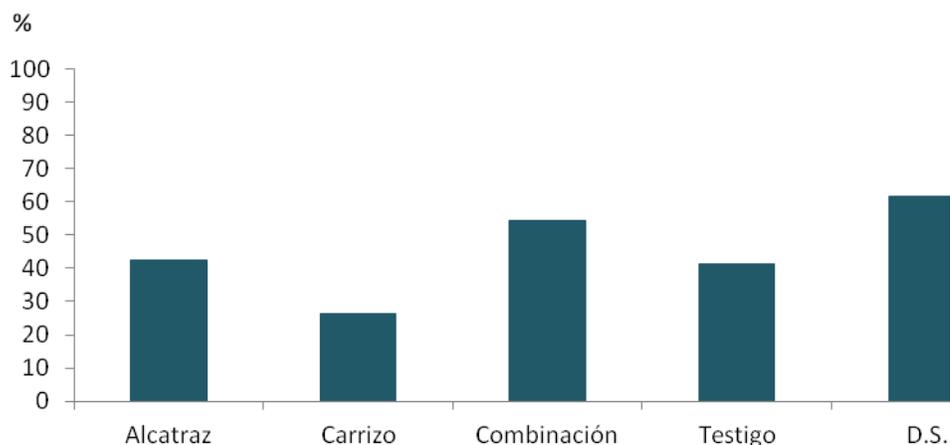


FIGURA 15. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRITOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.9 Nitratos.

En el caso de los nitratos la concentración más alta se obtuvo en el depósito de entrada con un promedio de $0.56 \pm 0.45 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que la concentración más baja se registró para la canaleta testigo con un promedio de $0.26 \pm 0.18 \text{ mg L}^{-1}$ (**Cuadro 16**).

Cuadro 16. Concentraciones de nitratos registradas para todos los compartimientos del SUTRANE.

Tratamiento	Concentración $\text{mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$
Aguas Negras	0.33 ± 0.11
Aguas Jabonosas	0.31 ± 0.20
Depósito de entrada	0.56 ± 0.45
Alcatraz	0.34 ± 0.05
Carrizo	0.50 ± 0.16
Combinada	0.32 ± 0.04
Testigo	0.26 ± 0.18
Depósito de Salida	0.27 ± 0.15

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones promedio de nitratos en todos los compartimentos del sistema se obtuvo no existía diferencia significativa entre ellos $P > 0.05$ (**Cuadro 17**).

Cuadro 17. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de nitratos en todos los compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Aguas jabonosas	7	35.64
Aguas negras	7	43.64
Depósito de entrada	7	53.21
Alcatraz	14	32.5
Carrizo	13	40.19
Combinada	13	38.96
Testigo	7	29.21
Depósito de salida	7	33.42

Prueba estadística = 6.4585 Valor de P = **0.4873**

A pesar de que en con la prueba de Kruskal-Wallis no se presentaron diferencias significativas, en la gráfica de cajas múltiples con muesca, se registraron la existencia de casos extraordinarios en los tratamientos, siendo el tratamiento del carrizo donde se presentaron las concentraciones más elevadas (**Fig. 17**).

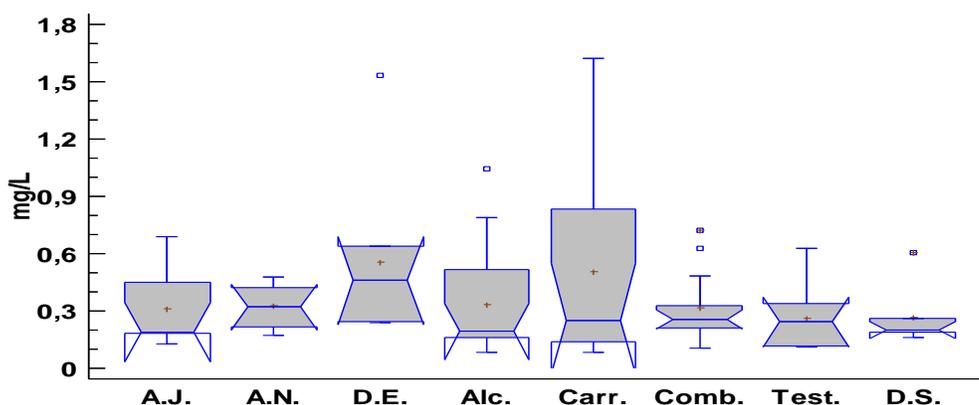


FIGURA 16. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE NITRATOS EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE.

En el caso de los nitratos el mayor porcentaje de remoción se presentó en la canaleta testigo con 53 %, mientras que el menor porcentaje se registró para el tratamiento donde se plantaron los carrizos con 11 % (**Figura 17**).

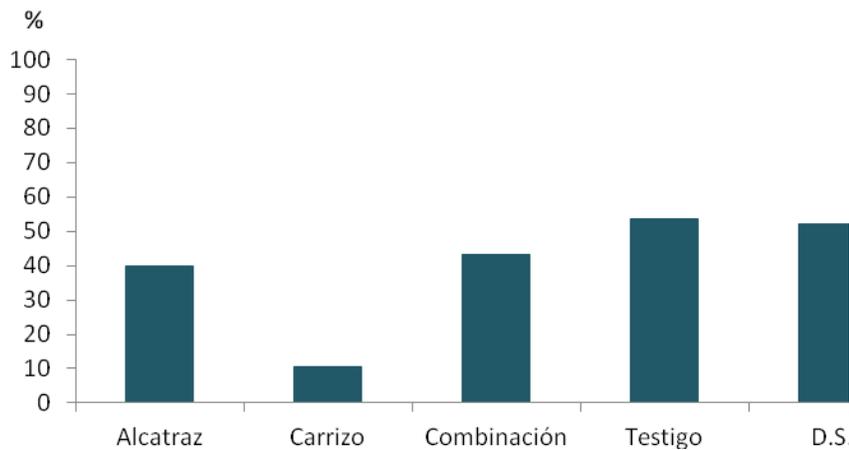


FIGURA 17. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRATOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.10 Nitrógeno amoniacal.

Para el caso del nitrógeno amoniacal las concentraciones más altas se registraron en el depósito de aguas negras con un valor promedio de $28.63 \pm 20.45 \text{ mg L}^{-1}$, y la más baja para el depósito de aguas jabonosas con $6.39 \pm 5.20 \text{ mg L}^{-1}$ (**Cuadro 18**).

Cuadro 18. Concentraciones de nitrógeno amoniacal registradas para los diferentes compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Concentración $\text{mg NH}_4^+ \text{ L}^{-1}$
Aguas Negras	28.63 ± 20.45
Aguas Jabonosas	6.39 ± 5.20
Depósito de entrada	20.09 ± 5.83
Alcatraz	12.32 ± 1.88
Carrizo	8.87 ± 0.49
Combinada	14.90 ± 3.92
Testigo	10.21 ± 6.29
Depósito de Salida	11.73 ± 4.93

Al realizar un análisis de varianza para la raíz cuadrada de las concentraciones medias de todos los compartimentos del SUTRANE, se encontraron diferencias significativas $F_{7,68} = 3.40$, $P \leq 0.05$ (**Cuadro 19**).

Cuadro 19. Análisis de varianza para la raíz cuadrada de las concentraciones medias de nitrógeno amoniacal de todos los tratamientos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	P-Valor
Entre grupos	56.4933	7	8.07048	3.40	0.0036
Dentro de grupos	161.401	68	2.37354		
Total (Corr.)	217.894	75			

Al realizar la prueba de rangos múltiples de Tukey se encontró que las diferencias existían entre las aguas jabonosas y las aguas negras, el tratamiento de alcatraz y el tratamiento de carrizo. Además de las diferencias entre las aguas negras con todos los demás compartimentos del SUTRANE (**Cuadro 20**).

Cuadro 20. Prueba de rangos múltiples de Tukey para la raíz cuadrada de las concentraciones medias de nitrógeno amoniacal en los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Limite
Aguas Jabonosas – Aguas Negras	*	-3,85281	1,71037
Aguas Jabonosas – Alcatraz	*	-1,65324	1,5001
Aguas Jabonosas – Carrizo	*	-1,54829	1,51731
Aguas Negras – Depósito de Entrada	*	2,25934	1,64327
Aguas Negras- Alcatraz	*	2,19958	1,42312
Aguas Negras – Carrizo	*	2,81452	1,44125
Aguas Negras – Combinada	*	2,30452	1,44125
Aguas Negras – Testigo	*	2,32779	1,59109
Aguas Negras – Depósito de Salida	*	2,72463	1,59109

En el caso del nitrógeno amoniacal el mayor porcentaje de remoción se presentó en la canaleta testigo, para éste el valor fue del 64%, mientras que en el depósito de salida fue del 34% (**Figura 18**).

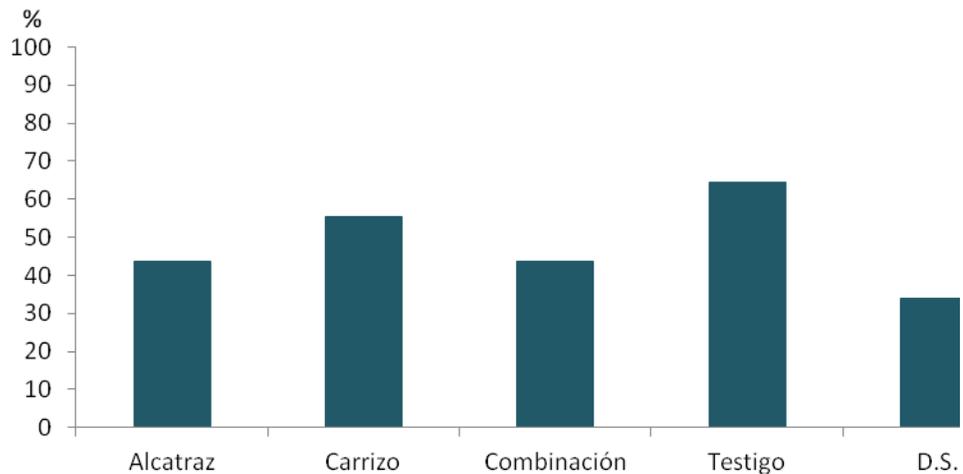


FIGURA 18. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE NITRÓGENO AMONIAAL REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.11 Ortofosfatos.

Para los ortofosfatos las concentraciones más altas se registraron para el depósito de aguas negras con $3.54 \pm 0.69 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que las concentraciones más bajas se registraron para en el tratamiento de carrizos inoculados que presentó un valor de $2.81 \pm 0.20 \text{ mg L}^{-1}$ (**Cuadro 21**).

Cuadro 21. Concentraciones de ortofosfatos registradas para todos los tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	Concentración $\text{mg P-PO}_4^{-3} \text{ L}^{-1}$
Aguas Negras	3.54 ± 0.69
Aguas Jabonosas	2.73 ± 0.47
Depósito de entrada	2.95 ± 0.65
Alcatraz	2.86 ± 0.30
Carrizo	2.81 ± 0.20
Combinada	3.30 ± 0.11
Testigo	2.97 ± 0.85
Depósito de Salida	3.15 ± 0.88

Para las concentraciones medias de los ortofosfatos con el análisis de varianza no se encontraron diferencias significativas $F_{10,75} = 1.31$, $P > 0.05$) (**Cuadro 22**).

Cuadro 22. Análisis de varianza para las concentraciones de ortofosfatos en los diferentes compartimentos del SUTRANE.

Fuente	Suma de cuadrados	Df	Cuadrados medios	F-Ratio	Valor de P
Entre grupos	5.11911	7	0.731301	1.31	0.2593
Dentro de grupos	41.9935	75	0.559914		
Total (Corr.)	47.1126	82			

Para el ortofosfato el agua que presentó un mayor porcentaje de remoción fue la resultante del tratamiento con carrizos con un valor de 21%, mientras que el menor porcentaje de remoción se obtuvo en las canaletas donde se plantaron alcatrazes y carrizos combinados con el 7% (**Figura 20**).

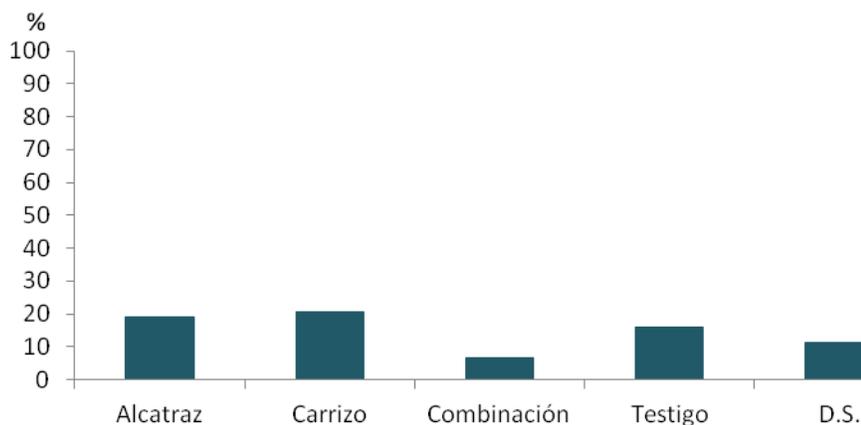


FIGURA 19. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE FOSFATOS REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.12 Fósforo total.

Para el fósforo total la concentración más alta se presentó en la canaleta de entrada con un promedio de $5.75 \pm 2.11 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que la más baja se registraron para el tratamiento de carrizo con un promedio de $4.19 \pm 0.06 \text{ mg L}^{-1}$ (Cuadro 23).

Cuadro 23. Concentraciones de fósforo total registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	Concentración $\text{mg P-PO}_4^{-3} \text{ L}^{-1}$
Aguas Negras	4.86 ± 2.01
Aguas Jabonosas	5.15 ± 1.23
Depósito de entrada	5.75 ± 2.11
Alcatraz	4.19 ± 0.56
Carrizo	4.19 ± 0.06
Combinada	4.81 ± 1.05
Testigo	5.33 ± 2.06
Depósito de Salida	4.20 ± 2.47

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis entre todos los tratamientos se obtuvo un valor de $P > 0.05$ por lo que no existieron diferencias significativa entre ellos (**Cuadro 24**).

Cuadro 24. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de fósforo total en los todos compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Aguas jabonosas	8	48.25
Aguas negras	8	39.87
Depósito de entrada	8	49.87
Alcatraz	15	35.73
Carrizo	13	34.53
Combinada	13	41.76
Testigo	8	52.62
Depósito de salida	8	33.50

Prueba estadística = 6.43015 Valor de P = **0.490514**

En el caso del fósforo total se registró el mayor porcentaje de remoción para el tratamiento de alcatraz, carrizo y el depósito de salida con 27%, mientras que la canaleta que sirvió como testigo presentó un porcentaje del 7% (**Figura 19**).

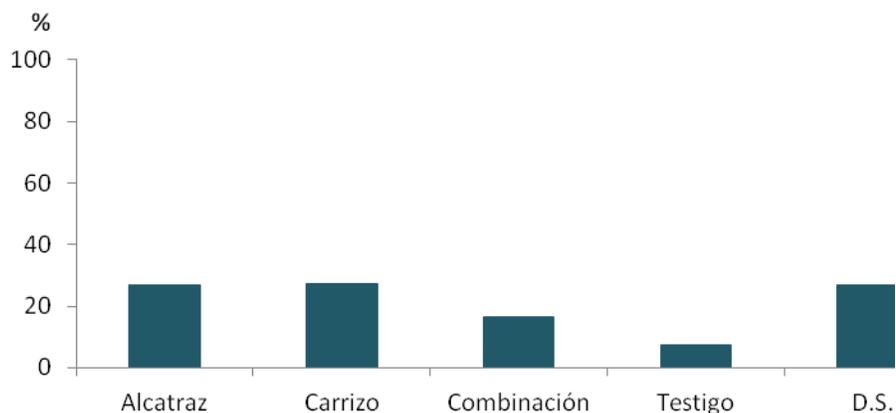


FIGURA 20. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE FÓSFORO TOTAL REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.13 Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅).

Para la demanda bioquímica de oxígeno la concentración más alta se presentó en el depósito de entrada con $175.14 \pm 211.76 \text{ mg L}^{-1} \text{ DBO}_5$, mientras que la menor concentración se obtuvo para la canaleta donde se plantaron carrizos inoculados con un agregado bacteriano, la cual presentó un promedio de 36.39 ± 9.43 (Cuadro 25).

Cuadro 25. Concentraciones de DBO₅ registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	DBO ₅
Aguas Negras	104.7 ± 81.20
Aguas Jabonosas	112.57 ± 80.58
Depósito de entrada	175.14 ± 211.76
Alcatraz	56.32 ± 8.60
Carrizo	36.39 ± 9.43
Combinada	70.50 ± 43.58
Testigo	53.62 ± 56.72
Depósito de Salida	61.22 ± 67.47

En el caso de la DBO_5 el mayor porcentaje de remoción se presentó en el tratamiento de carrizos inoculados con un agregado bacteriano, para este se obtuvo un valor del 79%, mientras que el tratamiento donde se combinaron las macrofitas se obtuvo el menor porcentaje de remoción con un valor del 60% (Figura 21).

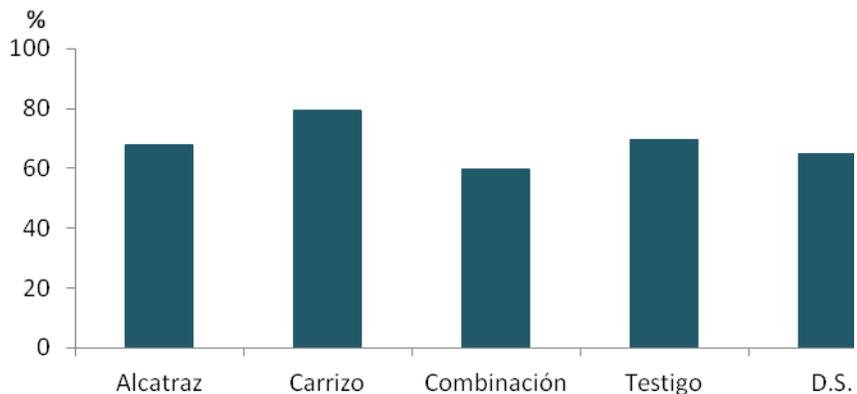


FIGURA 21. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DBO_5 REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.14 Demanda química de oxígeno (DQO).

Para la demanda química de oxígeno la concentración más baja se presentó en las canaletas donde fueron plantados carrizos inoculados con un agregado bacteriano, donde la DQO tuvo una concentración de $223.25 \pm 49.85 \text{ mg L}^{-1}$, mientras que la concentración más alta se registró en el depósito de aguas jabonosas con una DQO de $1708.50 \pm 989.18 \text{ mg L}^{-1}$ (**Cuadro 26**).

Cuadro 26. Concentraciones DQO registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	DQO
Aguas Negras	832.50 ± 360.79
Aguas Jabonosas	1708.50 ± 989.18
Depósito de entrada	1536.50 ± 898.68
Alcatraz	329.50 ± 137.18
Carrizo	223.25 ± 49.85
Combinada	375.00 ± 70.00
Testigo	268.50 ± 141.67
Depósito de Salida	434.50 ± 216.17

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis entre los diferentes tratamientos presentaron diferencias significativas entre ellos $P \leq 0.05$ (**Cuadro 27**).

Cuadro 27. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de DQO en los todos compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Aguas jabonosas	6	48.7
Aguas negras	5	39.5
Depósito de entrada	5	47.0
Alcatraz	10	19.1
Carrizo	9	14.6
Combinada	9	23.7
Testigo	5	17.4
Depósito de salida	5	27.1

Prueba estadística = 32.9406 Valor de P = 0.00002716

En el análisis de cajas múltiples con muesca se observan las diferencias que existen entre los depósitos de la fase primaria y los tratamientos del humedal (**Figura 22**).

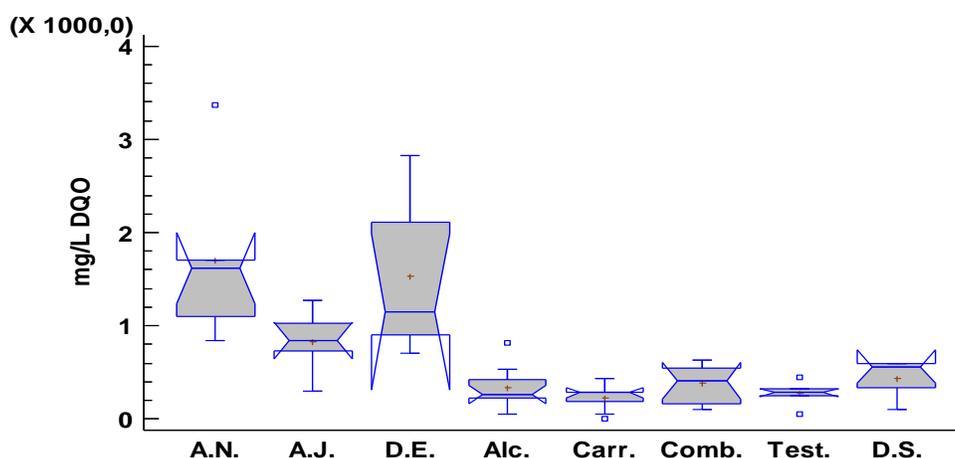


FIGURA 22. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE DQO EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE

Para el caso de la DQO, el mayor porcentaje de remoción se obtuvo en el tratamiento de carrizo con un valor de 87%, mientras que el valor más bajo se registró para el depósito de salida con 75%.

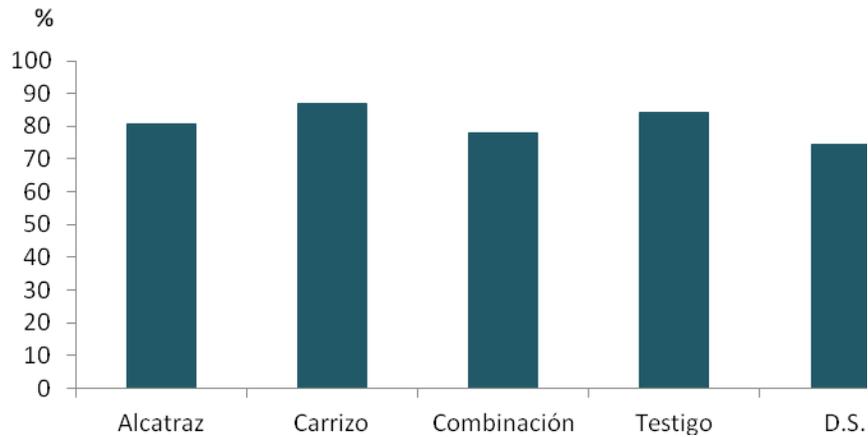


FIGURA 23. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE DQO REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.15 Coliformes totales.

Para el caso de los coliformes totales las concentraciones más altas se registraron en el depósito de aguas negras con un valor promedio de 4049.67 ± 747.53 nmp, mientras la menor se obtuvo en el tratamiento de alcatraces inoculados con un agregado bacteriano en el cual se tuvieron concentraciones de 2568.44 ± 53.45 nmp (**Cuadro 28**).

Cuadro 28. Concentraciones de coliformes totales registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	nmp Coliformes totales
Aguas Negras	4049.67 ± 747.53
Aguas Jabonosas	3404.19 ± 1450.01
Depósito de entrada	2729.89 ± 2087.11
Alcatraz	2568.44 ± 53.45
Carrizo	2813.79 ± 367.17
Combinada	2642.25 ± 628.10
Testigo	2789.29 ± 1395.12
Depósito de Salida	3494.31 ± 1515.78

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis entre los diferentes tratamientos presentaron un valor de $P > 0.05$ por lo que no existe diferencia significativa entre ellos (**Cuadro 29**).

Cuadro 29. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de coliformes totales en los diferentes compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Aguas jabonosas	5	38.4
Aguas negras	5	42.1
Depósito de entrada	7	34.5
Alcatraz	14	34.9
Carrizo	13	30.1
Combinada	13	32.7
Testigo	6	35.3
Depósito de salida	6	42.0

Prueba estadística = 2.72974 Valor de P= **0.908828**

Para el caso de los coliformes totales el mayor porcentaje de remoción se encontró en el tratamiento de alcatraz con un 37% y el menor se presentó en el depósito de salida con 14% (**Figura 24**).

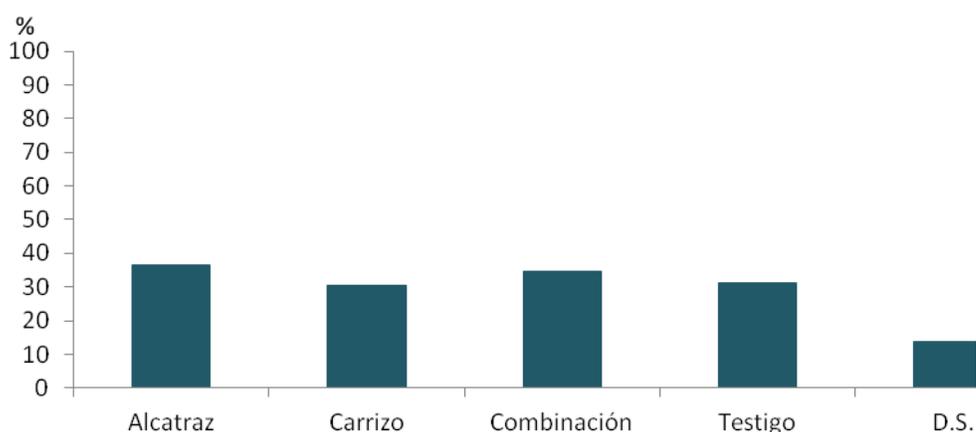


FIGURA 24. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE LOS COLIFORMES TOTALES REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.

10.16 Coliformes fecales.

Para los coliformes fecales el valor promedio más alto se registró para el depósito de aguas negras de 3389.71 ± 1361.45 nmp, mientras que el más bajo fue el del tratamiento donde se combinaron alcatraces y carrizos inoculados con un agregado bacteriano, donde el valor promedio fue de 773.33 ± 278.58 nmp (**Cuadro 30**).

Cuadro 30. Concentraciones de coliformes fecales registradas para los diferentes tratamientos del SUTRANE.

Tratamiento	nmp Coliformes fecales
Aguas Negras	3389.71 ± 1361.45
Aguas Jabonosas	1946.23 ± 2225.35
Depósito de entrada	2638.46 ± 2186.67
Alcatraz	1286.87 ± 487.21
Carrizo	773.33 ± 278.58
Combinada	803.37 ± 464.61
Testigo	1067.22 ± 1636.67
Depósito de Salida	2614.51 ± 2023.79

Al realizar la prueba de Kruskal-Wallis entre los diferentes tratamientos presentaron un valor de $P \leq 0.05$ por lo que existió diferencia significativa entre ellos (**Cuadro 31**).

Cuadro 31. Prueba de Kruskal-Wallis para las concentraciones de coliformes fecales en todos los compartimentos del SUTRANE.

Tratamiento	Tamaño de la muestra	Rango de la media
Aguas jabonosas	5	41.8
Aguas negras	5	56.0
Depósito de entrada	7	41.71
Alcatraz	14	33.17
Carrizo	13	25.38
Combinada	13	27.61
Testigo	6	33.75
Depósito de salida	6	46.33

Prueba estadística = 13,8627 Valor de P= **0.05**

En el análisis de cajas múltiples con muesca se observan las diferencias en el número de coliformes fecales que hay entre los depósitos de la fase primaria y los tratamientos del humedal (**Figura 25**).

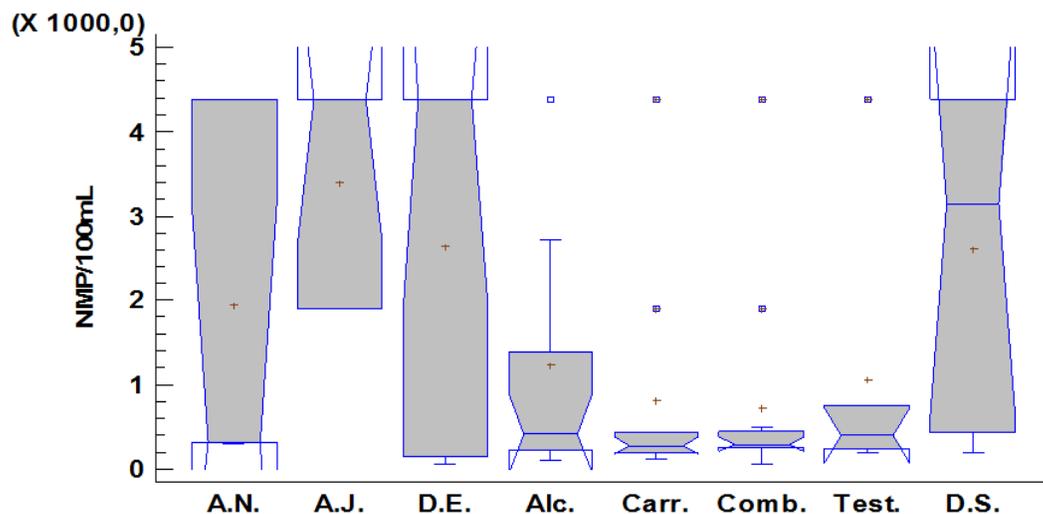


FIGURA 25. ANÁLISIS DE CAJAS MÚLTIPLES CON MUESCA PARA LAS CONCENTRACIONES MEDIAS DE COLIFORMES FECALES EN TODOS LOS COMPARTIMIENTOS DEL SUTRANE

En el caso de los coliformes fecales el mayor porcentaje de remoción se presentó en las canaletas donde se plantaron carrizos inoculados con un agregado bacteriano, donde el valor obtenido fue del 77% mientras que en el depósito de salida, solo se eliminó el 23% (**Figura 26**).

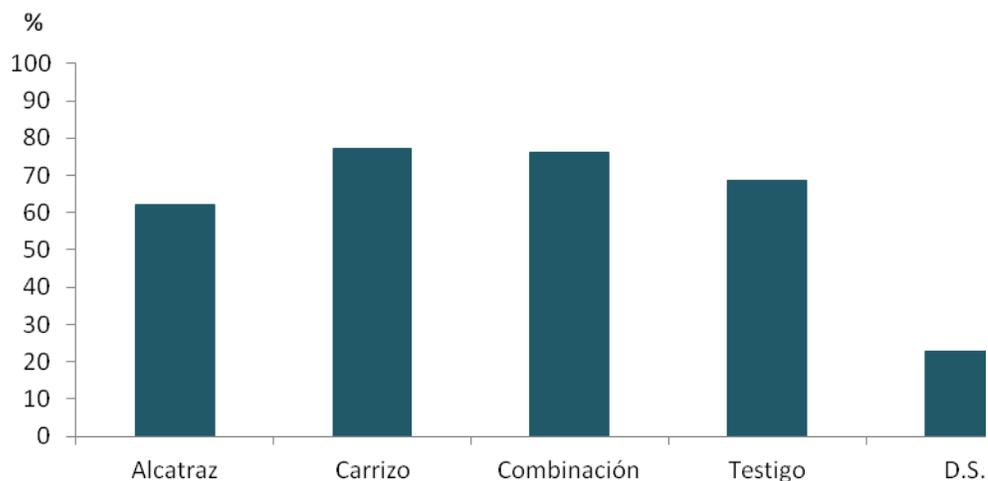


FIGURA 26. PORCENTAJES DE REMOCIÓN DE LOS COLIFORMES FECALES REGISTRADOS PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DEL HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

10.17 Sólidos sedimentables y totales

En el caso de los sólidos se realizaron dos muestreos uno en el año 2009 y otro en el año 2010, donde hubo una disminución tanto de sólidos sedimentables como de sólidos totales en el segundo muestreo, que se hizo después de las modificaciones al sistema (**Cuadro 32**).

Cuadro 32. Concentración de sólidos sedimentables (SS) y sólidos suspendidos totales (ST) registrados en los diferentes compartimentos del SUTRANE, en el año 2009 y 2010.

	2009	2010	2009	2010
	ST	ST	SS	SS
	(mg L ⁻¹)			
Aguas Jabonosas	567.33	507	0.4	4
Aguas Negras	1964.71	1189.5	0.4	0.2
Mezcla de Entrada	1269.12	665	1.6	4.5
Alcatraz	1173.25	535	-	.125
Carrizo	721.5	591.25	-	0.25
Combinada (Alcatraz/Carrizo)	1020.5	604.5	-	0.15
Testigo	1059.5	734.5	-	0
Depósito de Salida	1262.65	546	0.2	0

ST = Sólidos totales

SS = Sólidos sedimentables

11. Discusión de Resultados.

11.1 Tiempo de retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica (TRH) calculado para el humedal de flujo subsuperficial de la Asociación fue de 3.55 días, el cual se puede considerar adecuado para el tratamiento de las aguas residuales de la comunidad. Dado que un TRH de 4 días no solamente favorece la remoción de materia orgánica y contaminantes, sino además mantiene la estabilidad de la eficiencia del tratamiento a través del tiempo tal como lo reportan Gosh y Gopal (2010). Sin embargo, este tiempo no se considera suficiente para la eliminación de fósforo, así se ha propuesto una remoción por arriba del 80% de este nutriente con un TRH de 20 días (Akaratos y Tsihrintzis, 2007). Lo que implica no solo una remoción de este nutriente asociada con la porosidad presente en el humedal sino también con la actividad microbiana.

De acuerdo con la relación longitud-ancho obtenida para el humedal de 1.8:1 se considera que esta proporción conveniente para el tratamiento de aguas residuales de origen doméstico, lo que coincide con lo reportado por Crites y Tchobanoglous (1998), los cuales recomiendan para tal fin proporciones de 2:1 y 4:1.

11.2 Vegetación

Durante el estudio los individuos de alcatraz tuvieron una mejor adaptación con respecto al carrizo en el humedal de flujo subsuperficial, lo que se reflejó en un mayor crecimiento de esta especie con respecto a la otra (Cuadro 4). De acuerdo con Hernández (2013) el alcatraz requiere condiciones de constante humedad y abundante materia orgánica, y se desarrolla en altitudes que van de los 900 m s.n.m. a 2600 m s.n.m. y temperaturas promedio de 12° a 23° C. La Asociación se encuentra a 2296 m s.n.m., en un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y la temperatura promedio del sistema que fue de 15° C que favoreció un mejor desarrollo de esta especie. Por otro lado, de acuerdo con Fernández (2010) las plántulas de carrizo no toleran la inundación permanente, por lo que naturalmente estas se desarrollan en las orillas de los humedales y una vez establecidas, su propagación queda asegurada vegetativamente gracias a los rizomas, por lo que a diferencia del alcatraz, el carrizo necesita más tiempo para su establecimiento y desarrollo. Sin embargo, se sabe que el carrizo es una de las especies más utilizadas en este tipo de sistemas debido a que ya establecida, es muy eficiente en la remoción de distintos parámetros indicadores de

contaminación como (DBO, N total y fósforo) además de tener buena tolerancia a la salinidad (Fernández 2010).

Con lo que respecta a la cobertura vegetal no se encontraron diferencias significativas cuando las macrofitas se plantaron solas o combinadas (Cuadros 5 a 9 y Fig. 7), lo que indicó que no hubo una respuesta sinérgica positiva aparentemente entre ellas, es decir que la presencia de una favoreciera el crecimiento de la otra. Solo se encontraron diferencias de las coberturas con las plantas de la canaleta testigo como era de esperarse, debido a que estas no fueron extraídas y se encontraban ya bien establecidas, mientras que las plantas de los demás tratamientos se introdujeron en tallas pequeñas para su inoculación, lo que representó un mayor tiempo para su adaptación y óptimo desarrollo dentro del sistema.

11.3 Bacterias.

Un factor determinante en la dinámica bacteriana fueron las concentraciones de oxígeno disuelto (Figura 14), ya que debido a las condiciones de anoxia en los depósitos de aguas negras y jabonosas la densidad bacteriana fue mayor que en el humedal donde se presentaron condiciones de aerobiosis con presencia de nutrimentos.

Por otro lado el contenido de carbono se mantuvo constantes en todo el sistema lo que indica que no hubo una relación entre el tamaño bacteriano medido por el biovolumen celular y la disponibilidad de oxígeno. Tampoco se encontró diferencia con la biomasa bacteriana que se calcula del producto de la densidad y el contenido de carbono, lo que pudiera indicar un efecto compensatorio entre la densidad con los biovolúmenes bacterianos en los diferentes compartimentos del sistema, aunque solo se haya encontrado diferencias significativas para el parámetro de abundancia. Para el depósito de aguas negras se obtuvo una densidad bacteriana de $2.5E+08$ cél. mL^{-1} , que es menor al reportado por Pike y Curds (1971) para el número de bacterias totales para las aguas residuales sedimentadas que es de $6.8E+08$ cél. mL^{-1} . Mientras para el humedal el valor promedio fue de $9.73E+07$ cél. mL^{-1} , que es mayor a los reportadas por los mismos autores para el efluente secundario que es de $5.2E+07$ cél. mL^{-1} .

11.4 Calidad del agua

Temperatura

Según la NOM-001-SEMARNAT-1996 donde se establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales no aplica un intervalo de temperatura para el uso de riego agrícola que sería el que se le da a las aguas tratadas a través del SUTRANE. En dicha norma se menciona 40°C como la temperatura promedio del agua aceptable para depositar en cualquier cuerpo de agua o bien nacional, por lo que al compararla con los resultados obtenidos dentro el sistema se encuentran por debajo de este valor. Se pudo observar que la temperatura del agua en el sistema estuvo directamente determinada por las condiciones del tiempo atmosférico en la zona.

En el depósito de aguas negras se presentaron las temperaturas más altas en el mes de mayo con 20°C con respecto a las canaletas del humedal donde se registraron las temperaturas más bajas para el mes de febrero con 10°C. Esta diferencia se atribuye principalmente a que el depósito de aguas negras es un sistema cerrado, donde hay un incremento de la temperatura y presión por efecto de las interacciones biológicas bacterianas para la degradación de la materia orgánica. Mientras que los demás componentes del sistema además de presentar una mayor interacción con la temperatura ambiente anual, se pueden considerar como abiertos, donde hay una mayor difusión de la temperatura, a pesar de que se sigan presentando procesos de degradación de la materia orgánica en todos ellos.

Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica es uno de los parámetros importantes para la determinación de la calidad del agua para riego, debido a que proporciona información sobre la concentración de las sales solubles. En este estudio el valor mínimo obtenido fue de 0.71 mS cm⁻¹ en el tratamiento de alcatraz mientras el máximo fue de 0.89 mS cm⁻¹ en la tratamiento testigo. Para el caso de la conductividad eléctrica no hay un límite máximo permisible considerado en las Normas Oficiales Mexicanas que se ajuste al tipo de agua que se obtuvo en el sistema. Para tener un punto de referencia se realizó la comparación con la Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes: recurso agua de la República de Ecuador, (2001) donde mencionan cuatro grados de restricción dependiendo de la concentración obtenida: **1) Ninguno**, hasta 0.7 mS cm⁻¹, **2) Ligero** >0.7 mS

cm⁻¹, **3) Moderado**, hasta 3.00 mS cm⁻¹ y **4) Severo** >3.00 mS cm⁻¹. Por lo que al compararlas con los resultados obtenidos (Fig. 12), todos los tratamientos se ubican de ninguna a ligera restricción de acuerdo con esta Norma.

pH

El valor de pH es un parámetro regulado por límites máximos permisibles en descargas de aguas residuales al alcantarillado o a cuerpos receptores, también es un parámetro de calidad del agua para usos y actividades agrícolas, para contacto primario y para el consumo humano (NMX-AA-008-SCFI-2000).

Los valores de pH en el sistema fluctuaron de 7.22 a 7.51 unidades, por lo que todos ellos se encontraron dentro del límite máximo permisible (LMP) de 5 a 10 unidades de pH de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996; estos valores registrados en el sistema indican una tendencia hacia una condición ligeramente básica. En el depósito de salida donde se acumula temporalmente el agua tratada que se emplea directamente para el riego de árboles frutales y pastos de conservación de la Asociación, registró un valor de pH de 7.29, que se considera apta para tal fin al encontrarse dentro de los LMP.

Oxígeno disuelto

Debido a que el depósito de aguas negras está diseñado para una degradación de tipo anaerobia en él se registraron condiciones de anoxia. Asimismo, esta concentración nula se presentó también en el depósito de aguas jabonosas resultado de la carencia de aireación continua y el efecto de la trampa de natas que impide un intercambio con el oxígeno atmosférico. Mientras que en las canaletas del humedal, por la actividad fotosintética de las macrofitas, se favoreció una cierta oxigenación. Sin embargo, las concentraciones fueron bajas, típicas de un ambiente microaerobio. Se debe tomar además en cuenta que en este tipo de sistemas de tratamiento normalmente no hay presencia de oxígeno debido a su utilización durante la descomposición y al efecto de la difusión lenta del oxígeno molecular (Atlas y Bartha, 2002).

Otro factor que puede afectar la presencia de oxígeno disuelto pueden ser los productos de la fermentación y la reducción de los sumideros de electrones secundarios, como el nitrato y el sulfato, que pueden producir olores, sabores y colores nocivos o desagradables; además de condiciones anóxicas o sépticas (Atlas y Bartha, 2002).

Las bajas concentraciones que fluctuaron de 0.58 mgL^{-1} a 1.14 mgL^{-1} de OD en el humedal también pudieron responder al efecto de la acumulación de hojarasca procedente de la vegetación aledaña (árboles de encino) que al ser materia orgánica en suspensión reduce la cantidad de oxígeno en la columna de agua para utilizarlo en su descomposición (Hernández, 1992).

Nitrógeno

En el caso del SUTRANE el agua que ingresa al sistema es de tipo residual doméstico, por lo que el principal aporte de nitrógeno proviene del depósito de aguas negras que es de tipo anaerobio, en que predomina la forma de nitrógeno amoniacal con una concentración promedio de 28.63 mg L^{-1} , por lo que en este compartimento predomina el proceso de amonificación. Sin embargo, esta cantidad disminuyó en un 30% por efecto de dilución, cuando estas aguas se mezclaban con las aguas jabonosas en el depósito de entrada, obteniendo así una concentración promedio de 20.09 mg L^{-1} . Mientras que para el agua resultante del tratamiento en el humedal, la concentración promedio fue de $11.60 \text{ mg NH}_4 \text{ L}^{-1}$, lo que implicó una remoción del 48% de este nutrimento con respecto al agua que ingresaba al humedal. A partir de lo cual se infiere que dentro del sistema se llevaron a cabo los procesos de remoción naturales del nitrógeno los cuales son: filtración, sedimentación, adsorción y volatilización (Hunt y Poach, 2000). Además de dichos procesos estos autores afirman que las formas reducidas del nitrógeno, principalmente el amonio, puede ser utilizado por microorganismos anaeróbicos, que a su vez lo transforman en nitrógeno molecular dicho proceso es conocido como ANAMOX (oxidación anaerobia del amonio) o es inmovilizado en el medio como un ion permutable.

Por otro lado, se sabe que la nitrificación y desnitrificación son las formas más comunes de remoción. Sin embargo, en este caso se encontró que las concentraciones de nitratos y nitritos fueron considerablemente bajas con respecto a las de amonio (Cuadros 13, 15 y 17), esto puede deberse en parte a la gran cantidad de materia orgánica en descomposición en todo el sistema y principalmente a las bajas concentraciones de oxígeno en el mismo, además de que el proceso de nitrificación parece estar limitado en su mayor parte a un número restringido de bacterias quimioautótrofas aerobias (Fotch y Verstraete 1977, Hopper 1990). Los dos pasos de la nitrificación, es decir la formación de nitritos y de nitratos los realizan poblaciones de bacterias distintas. Sin embargo, los dos procesos están muy relacionados y las condiciones para que se lleven a cabo deben ser similares.

A pesar de las condiciones de anaerobiosis se encontraron nitratos ($0.33 \text{ mg N-NO}_3^- \text{ L}^{-1}$) y nitritos ($0.57 \text{ mg N-NO}_2^- \text{ L}^{-1}$), en muy bajas concentraciones por lo que se puede inferir microzonas aerobias en las raíces de la macrofitas y una oxigenación de tipo física en el tezontle poroso donde se acumulan biopelículas microbianas, donde ocurrió el proceso de nitrificación. Mientras en las zonas anóxicas y microaerobias se transformaron los nitratos en nitrógeno gaseoso por procesos de desnitrificación (Zuñiga, 2004; Hunt y Poach 2000). También debe tomarse en cuenta que la desnitrificación es más frecuente en aguas estancadas que en aguas corrientes.

De acuerdo con Lara (1999), la remoción del nitrógeno puede ser muy efectiva en los sistemas de humedales artificiales ya que esta puede alcanzar valores por encima del 80%. En este caso el mayor porcentaje de remoción para los nitritos fue del 62%, mientras el de los nitratos fue del 53% que es menor que el reportado por Belmont (2004), que fue del 98.5%. Este valor estuvo asociado a las bajas concentraciones de oxígeno disuelto dentro del sistema, lo que provocó que no se llevara a cabo de manera exitosa el proceso de nitrificación. Para el nitrógeno amoniacal la remoción fue del 64%, que fue mayor que lo reportado para otros sistemas de humedales de flujo subsuperficial del 42.7%, en Texcoco, Edo de México (Belmont *et al.*, 2004) o del 44%, para un sistema en Guerrero (De La Orta y Muñoz, 2011). Se destaca que el potencial de remoción de nitrógeno dentro del humedal puede tomar varios años en desarrollarse; ya que por lo menos se requieren dos o tres etapas del crecimiento de las plantas, sistemas de raíces, capa de residuos y materiales de bentos, para alcanzar un equilibrio, por lo que al principio solo una pequeña fracción puede ser eliminada por la asimilación de las plantas (Lara 1999).

Al no se encontraron diferencias significativas ($P=0.3043$) para las concentraciones de nitritos en todo el sistema, ni para para los nitratos ($P=0.4873$), se infiere que los procesos de nitrificación fueron equivalentes en todo el humedal, así como su posible asimilación por las macrofitas.

Para el nitrógeno amoniacal se encontraron diferencias ($P<0.01$) entre la concentración del nitrógeno amoniacal de las aguas negras y todos los demás compartimientos del SUTRANE, además de que existieron diferencias entre las aguas jabonosas y los tratamientos de alcatraz y carrizo. Resalta el hecho, de que el proceso anaerobio del sedimentador de aguas negras no favorece los procesos de nitrificación, sin embargo imperan los procesos de amonificación. Mientras en las canaletas del humedal se presentaron procesos de nitrificación, asimilación o en su caso desnitrificación.

Fósforo.

Las formas más frecuentes en que se encuentra el fósforo en soluciones acuosas son ortofosfato, polifosfato y fósforo orgánico. Las formas de fósforo por ejemplo: PO_4^{3-} , HPO_4^- , H_2PO_4^- y H_3PO_4 , se hallan disponibles para el metabolismo biológico sin precisar una posterior ruptura. Los polifosfatos incluyen las moléculas con dos o más átomos de fósforo, átomos de oxígeno y en algunos casos, átomos de hidrogeno combinados en una molécula compleja. Los polifosfatos sufren la hidrolisis en soluciones acuosas y vuelven a sus formas de ortofosfato; sin embargo, esta hidrolisis es generalmente de menor importancia en la mayoría de las aguas residuales domésticas (Metcalf y Eddy, 1981)

Se puede ver en los casos estudiados en la literatura que la remoción de fósforo está entre el 22% y el 95%, con un promedio de 49.7% (US. EPA. 1993, Axler et al., 2000, Davison et al., 2000, Nakamura, 2000, Salati et al., 2000, Vymazal, 2000). En el sistema de estudio el mayor porcentaje de disminución de fósforo total fue del 27% en los tratamientos de alcatraz y carrizo, mientras que para los ortofosfatos hubo una remoción máxima del 21% en el tratamiento de carrizo, de acuerdo con Zuñiga (2004) la remoción del fósforo ocurre por la acción de las macrofitas, las cuales lo utilizan como nutriente. También ocurre por la incorporación de éste en la biomasa de los microorganismos y por procesos de precipitación dentro del humedal. Las remociones de fósforo pueden ser optimizadas biológicamente con base en cada una de las ventajas que poseen los microorganismos anaerobios, aerobios y anóxicos.

Así los organismos aerobios acumulan glucógeno, biomasa y PO_4^{3-} y los organismos anaerobios y anóxicos a su vez liberan los mismos componentes. Con base a esto se remueve fósforo ya que los organismos aerobios acumulan más de lo que liberan los microorganismos anóxicos y anaerobios (Zuñiga, 2004). Por lo que se infiere que la mayor remoción que se dio dentro del sistema fue por las plantas, aunque estuvo limitada debido a su desarrollo temprano dentro del sistema. De acuerdo con las condiciones de anaerobias prevalecientes en el SUTRANE las bacterias tendieron a liberar los ortofosfatos así como otros compuestos orgánicos. Proceso que además se vio favorecido por las condiciones reducidas del sistema.

La concentración máxima promedio de fósforo total se registró para el influente en el depósito de entrada con $5.75 \pm 2.11 \text{ mg L}^{-1}$ y para el efluente se registraron dos mínimas de $4.19 \pm 0.56 \text{ mg L}^{-1}$ para el tratamiento de alcatraz y de $4.19 \pm 0.06 \text{ mg L}^{-1}$ para el tratamiento de carrizo. Estas concentraciones se encuentran muy por

debajo de los 20 mg L^{-1} que es límite máximo permisible de fósforo total en agua que se utiliza para riego agrícola de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, a pesar de que la disminución del fósforo total y el porcentaje de remoción de los ortofosfatos no fueran elevados.

Para ambos parámetros de fósforo determinados no se encontraron diferencias significativas de acuerdo con los análisis de varianza (Cuadros 20 y 21) realizados para los diferentes compartimentos del SUTRANE, lo que da un indicio de la poca eficiencia del sistema para remover este nutrimento.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)

La concentración media de DBO₅ en el depósito de entrada fue de 175 mg L^{-1} , que se encuentra por debajo del máximo reportado para aguas residuales urbanas (Shroeder, 1977). Y también es menor a las concentraciones reportadas para el tratamiento de aguas residuales en municipios de Guerrero empleando humedales de flujo subsuperficial (López, 2011).

La concentración media de DBO₅ registrada para todo el humedal fue de 55.61 mg L^{-1} , por lo que se encuentra dentro de los límites máximos permisibles para uso de riego agrícola de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, para agua proveniente de embalses naturales y artificiales que es de 75 mg L^{-1} o de ríos para uso de riego agrícola de 150 mg L^{-1} de BDO₅ como promedios mensuales. Sin embargo, para la descarga al suelo para riego agrícola no se establecen límites de este parámetro. Asimismo, de acuerdo con la clasificación de la calidad del agua de la CONAGUA, el agua resultante del tratamiento se encuentra dentro del intervalo entre $30 \text{ mg L}^{-1} < \text{DBO}_5 \leq 120 \text{ mg L}^{-1}$ que es considera como contaminada (aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal) (CONAGUA, 2008). Cabe destacar que la Norma anteriormente citada es ambigua, mientras que el intervalo considerado por esta dependencia gubernamental para tipificar este tipo de aguas es muy amplio. Destaca el hecho de que en el SUTRANE se depura una cantidad considerable de materia orgánica procedente de los sanitarios, así como jabones de pasta de fácil degradación y en menor concentración detergentes considerados biodegradables.

Las condiciones de anoxia registrada en el sistema de tratamiento, producen que los organismos aerobios entre estos algunas formas microbianas mueran y la descomposición de biopelículas bacterianas asociadas a conglomerados orgánicos constituya una demanda adicional de oxígeno (Atlas y Bartha, 2002). De

acuerdo con Schroeder (1977) el tratamiento de las aguas residuales tiene como propósito reducir la DBO antes del vertido, este proceso regularmente se consigue en tres etapas del tratamiento denominadas primaria, secundaria y terciaria. Las dos primeras una de tipo físico (sedimentador) y otra de tipo biológica causan una mayor reducción de la DBO original. La tercera etapa de tipo química normalmente está dirigida a eliminar nutrientes minerales y/o compuestos orgánicos recalcitrantes. En el caso del SUTRANE solo se dan las dos primeras fases, aunque la biológica puede considerarse que estaría cubriendo la función de la parte química, al tener las biopelículas bacterianas y el efecto de las macrofitas en el humedal. Un tratamiento puede considerarse adecuado, cuando en la fase primaria se elimina de un 70 a 80% de materia orgánica, sin embargo en las aguas residuales domésticas típicas, durante esta fase solo se elimina del 30 al 40% y es necesario el tratamiento secundario para una reducción aceptable. En este caso particular, después de todo el tratamiento el agua resultante presentó una reducción promedio del 71.5 % en el efluente con respecto al depósito de entrada (canaleta donde se mezclan las aguas jabonosas y aguas negras), con lo que se demuestra la efectividad que presenta el humedal sub-superficial para el tratamiento. Este porcentaje de depuración es debido a que en los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, favorecido por el flujo lento de agua en los primeros metros del mismo. Así, la materia orgánica sedimentable que se va acumulando se descompone aeróbica o anaeróbicamente dependiendo del oxígeno disuelto disponible. El resto de la materia orgánica se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema a través de biopelículas bacterianas. Esta actividad biológica puede ser aeróbica cerca de la superficie del agua, de las raíces y rizomas, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema (Lara 1999).

Demanda química de oxígeno (DQO)

La demanda química de oxígeno se define como la cantidad de un oxidante específico que reacciona con una muestra bajo condiciones controladas (León, 2009), esta medición se relaciona con la DBO ya que la diferencia entre estas dos constituye la cantidad de materia contaminante de poca o nula degradación.

La DQO presentó para el depósito de aguas negras una concentración promedio de 832 mg L⁻¹ y para las aguas jabonosas de 1708 mg L⁻¹ que se consideran fuertemente contaminadas al estar por arriba de los 200 mg L⁻¹ de acuerdo con la

Subdirección Técnica de la CONAGUA (2003) o de concentración fuerte al ser mayores de 1000 mg L^{-1} (Metcalf y Eddy, 1981).

Arango y Garcés (2007) argumentan que la concentración de DQO depende de la composición del tipo de agua, sobre todo de la cantidad de grasas y aceites así como de detergentes, de acuerdo con esta idea, se puede atribuir que las altas concentraciones de DQO en la fase primaria se deben en gran medida a las condiciones del depósito de aguas jabonosas en el momento del análisis, ya que de acuerdo con el diseño original, éste requería de una aireación constante, sin embargo esto no se llevaba a cabo con la frecuencia necesaria. Lo que provocó una saturación de natas derivadas del uso de jabones de pasta y detergentes que son utilizados en el lavado de utensilios, ropa y aseo personal y por otro lado de las grasas y aceites provenientes del lavado de utensilios de cocina que contenían residuos de aceite vegetal.

Para el humedal la concentración media de DQO fue 258 mg L^{-1} , lo que lo tipifica cercano a la concentración débil de acuerdo con Metcalf y Eddy (1981) que reportan para este nivel una concentración media igual a 250 mg L^{-1} .

Para las concentraciones de DQO de los depósitos de la fase primaria y las del humedal se encontraron diferencias significativas (Kruskal-Wallis $P=0.00002$). Esto representó una remoción de la DQO del 83% en el humedal. Valor elevado en comparación con la remoción del 47% registrada para el tratamiento de aguas residuales con humedales de flujo subsuperficial en Guerrero (De la Orta y Muñoz, 2011), y equiparable con el 83% de remoción obtenida en una planta de tratamiento con características similares en Checoslovaquia (Vymazal, 1993).

Coliformes totales y fecales

Las bacterias coliformes incluyen los géneros *Escherichia* y *Aerobater*. El uso de los coliformes como organismos indicadores es problemática debido a que la *Aerobacter* y ciertas especies de *Escherichia* pueden crecer en el suelo. Por tanto, la presencia de coliformes no siempre significa contaminación con residuos humanos (Metcalf y Eddy, 1981).

Durante el tiempo de estudio el agua contenida en los depósitos de salida del humedal registró concentraciones de coliformes fecales que fluctuaron entre los 1286 y 773 NMP/100 mL, con un promedio de 982.69 NMP/100mL, por lo que el agua tratada se encuentra dentro de los límites máximos permisibles de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997). Sin embargo, en el depósito de salida se registró una concentración de 2614 NMP/100 mL, dado que

en éste se presentaba un deterioro por falta de mantenimiento, además de no contar con una tapa adecuada y encontrarse al ras del suelo. Todo esto facilitaba el ingreso de terrígenos lo que pudo tener como consecuencia la entrada de ciertas especies de *Escherichia* originadas en el suelo. Asimismo, se presentaba un tiempo de retención mayor, al no tener un desagüe continuo, provocando un cierto estancamiento y un efecto de acumulación negativo.

Los tiempos de retención hidráulica dentro del humedal se incrementaron al no fluir el agua de manera uniforme en todo el sistema debido al deterioro de la tubería y a los eventos de lluvia intensos que influyeron negativamente provocando que algunas canaletas de desbordaran. Debido a estas condiciones no se obtuvo una remoción importante de coliformes totales, dado que el máximo registrado fue de 4050 NMP/100 mL para aguas negras y el mínimo de 2568 NMP/100 mL en el tratamiento de alcatraz, lo que representa una reducción aproximada del 37%. En general, los organismos coliformes no se consideran dañinos al hombre y, de hecho, son útiles para destruir la materia orgánica en los procesos biológicos de tratamiento de aguas residuales (Metcalf, 1981).

Para coliformes totales no se encontraron diferencias significativas en los diferentes compartimentos del sistema (Kruskal-Wallis, $P=0.91$). Sin embargo, para coliformes fecales si se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos del humedal (Kruskal-Wallis, $P=0.05$) alcanzando un 77% de remoción en el tratamiento con carrizo. Esto es del todo relevante al asegurar que en el sistema se estaban eliminando en su mayoría los organismos que pudieran ser patógenos.

Sólidos sedimentables y sólidos totales.

Los principales procesos que generan la remoción de los sólidos son la sedimentación y la filtración por el medio poroso (sustrato) y el sistema radicular en el humedal, además de que para el caso de la materia orgánica particulada puede haber un proceso de degradación generada por los microorganismos dentro del sistema principalmente a través de la biopelículas bacterianas. Sin embargo, a pesar de que las cargas de sólidos totales que ingresan al SUTRANE fueron altas, en la primera fase del tratamiento se dio un proceso de sedimentación en el depósito de aguas negras, mientras que en las aguas jabonosas, el material particulado y en suspensión fue capturado en la trampa de natas.

Para los sólidos sedimentables las concentraciones de 1 a 2 mg L⁻¹ son los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en

aguas y bienes nacionales para depósito de agua en embalses naturales y artificiales con uso de riego agrícola de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Dentro del sistema se obtuvo para este parámetro un máximo en la entrada de 1.6 mg L^{-1} y para la salida de 0.20 mg L^{-1} en el 2009, lo que representó una remoción del 87%. Mientras la remoción para el 2010 fue del 100% a pesar de tener una concentración máxima de entrada de 4.5 mg L^{-1} (Cuadro 29) .

Para los sólidos totales se presentó una disminución de las cargas una vez que ya se había establecido el sistema. Con porcentajes de remoción entre el 55% y 63% en el humedal con respecto a los depósitos de entrada (Cuadro 29). Para este parámetro en particular no existe una Norma Oficial Mexicana que establezca límites máximos permisibles para su emisión con fines agrícolas. Sin embargo, puede ser comparado con los sólidos suspendidos totales registrados en otros humedales artificiales de flujo subsuperficial, siendo alto al reportado por Belmont *et al.*, (2004) que fue de 406.1 mg L^{-1} y equiparable si se compara con los 1662 mg L^{-1} (García, 2005).

12. Conclusiones

El alcatraz presentó una mayor tasa de crecimiento y adaptación al sistema en comparación con el carrizo en el humedal de flujo subsuperficial.

Se encontró una relación inversa entre las condiciones anaeróbicas y aeróbicas con respecto a la respuesta de la densidad bacteriana, aunque los contenidos de carbono y biomasa bacteriana fueron equivalentes.

La temperatura del agua en el sistema estuvo directamente determinada por las condiciones del tiempo atmosférico de la zona teniendo una temperatura promedio de 15 °C todo el sistema.

Los procesos de depuración fueron influenciados por la fluctuación de las temperaturas ambientales y la estación de lluvias que modificaron los tiempos de retención hidráulica dentro del humedal, por lo que en algunos casos existió una variación en las concentraciones de los nutrientes por efecto de dilución.

Para la conductividad eléctrica todos los compartimientos del SUTRANE no presentan ninguna o ligera restricción de acuerdo con la Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes: recurso agua de la República de Ecuador, (2001).

El agua de todos los compartimientos del SUTRANE se encontraron dentro del límite máximo permisible (LMP) de pH de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, con una tendencia a ser ligeramente básicos.

El efecto combinado de los inóculos microbianos establecidos en las raíces de las macrofitas, así como el crecimiento vegetal de especies helófitas favorecieron la degradación de la materia orgánica y una alta asimilación de nutrimentos, siendo una forma eficaz para el tratamiento de aguas residuales.

Las concentraciones de oxígeno disuelto en el humedal fueron bajas, típicas de un ambiente microaerobio, siendo el tratamiento con alcatraz el que presentó las mayores concentraciones de este elemento, la cantidad de oxígeno tuvo una influencia determinante en los procesos de nitrificación, desnitrificación y amonificación, así como la oxidación de la materia orgánicas que se llevaron a cabo dentro de todo el sistema.

Las formas oxidadas del nitrógeno se vieron limitadas al encontrarse en un ambiente microaerobio, sin embargo hubo una disminución de estas, siendo el tratamiento donde se combinaron las dos macrofitas el que presentó la mayor

asimilación de nitrógeno. Por otro lado estas bajas concentraciones de oxígeno favorecieron la presencia de las formas reducidas de nitrógeno las cuales se eliminaron en mayor cantidad en el tratamiento con carrizo.

Las concentraciones de fósforo total se encuentran por debajo del límite máximo permisible en agua que se utiliza para riego agrícola de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, siendo el tratamiento con carrizos donde se obtuvo la mayor remoción de este nutrimento.

Debido al temprano desarrollo de las plantas la reducción de los ortofosfatos se vio limitada, siendo el tratamiento con carrizo el que presentó la mayor absorción y asimilación de este compuesto.

Las concentraciones medias de DBO_5 se encuentran dentro de los límites máximos permisibles para uso de riego agrícola de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996. Presentando una reducción promedio del 71.5 % en el efluente, con lo que se demuestra la efectividad que presenta el humedal sub-superficial para el tratamiento, siendo el tratamiento de carrizo donde se presentó mayor remoción de materia orgánica oxidable.

A pesar de las altas concentraciones de DQO registradas en el influente debido al deterioro de la trampa de natas se alcanzó un porcentaje de remoción del 83% siendo el tratamiento con carrizo el que presentó la mayor eficiencia para este parámetro.

La remoción de coliformes totales se vio influenciada por el aporte de terrígenos y materia orgánica ajenos al sistema, sin embargo para los coliformes fecales se alcanzó un porcentaje de remoción máximo del 77% para el tratamiento con carrizo, por lo que el agua tratada se encuentra dentro de los límites máximos permisibles de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-003-SEMARNAT-1997).

Para los sólidos sedimentables las concentraciones entran en los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales para depósito de agua en embalses naturales y artificiales con uso de riego agrícola de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996, con porcentajes de remoción del 87% y 100%. En el caso de sólidos totales se presentó una disminución de entre el 55% y 63% en el humedal. Siendo el tratamiento con carrizo el más eficiente.

Después del estudio científico técnico se sugirieron las siguientes modificaciones en la estructura del SUTRANE como la ampliación de la canaleta de entrada, un sistema de control de flujos para optimizar la entrada de agua a las canaletas, el establecimiento de un invernadero para controlar las condiciones de temperatura y la influencia de agentes externos (lluvia, animales, hojarasca, terrígenos). Con estas modificaciones que favorecen un adecuado tiempo de retención hidráulica, un mayor tiempo de maduración de la comunidad vegetal y de las biopelículas microbianas se podrá obtener agua de mejor calidad.

A partir de estas modificaciones en todo el SUTRANE, el humedal artificial se transformó en una unidad de producción intensiva de plantas de ornato, con la generación de flores para su comercialización, con lo que se logra un doble propósito: la generación de ingresos extraordinarios y un tratamiento eficiente del agua residual para su reciclaje en un huerto frutal y pastos de conservación dentro del predio de la Asociación Civil.

13. Adecuaciones y modificaciones estructurales del SUTRANE con base en los resultados obtenidos

Las adecuaciones realizadas a todo el sistema con el apoyo económico otorgado por la Fundación Gonzalo Río Arronte se cubrieron en una 100% de acuerdo con las recomendaciones propuestas a partir de los resultados de la presente investigación.

A continuación se destacan los impactos a corto plazo obtenidos y los que se lograrán a mediano plazo con dichas adecuaciones y modificaciones.

Al enmallar el sistema, este se convirtió en un sitio de acceso restringido y controlado, lo que es del todo favorable por el riesgo potencial que representaba para los beneficiarios de la obra que son personas con discapacidad. Además evita el paso de algunos animales que puedan depredar a las plantas en cultivo o dañar el sistema y el aporte de hojarasca y terrígenos.

Con el sistema de caída libre de las aguas jabonosas se favorece la oxidación permanente de las mismas, al establecerse un proceso aerobio que incrementa la tasa de degradación de este tipo de aguas. Disminuyendo además el esfuerzo que implicaba realizar una oxigenación de forma manual como tradicionalmente se venía practicando.



FOTO 8 Y 9. INVERNADERO Y MICROINVERNADERO EN EL SUTRANE. SISTEMA DE CAÍDA LIBRE DENTRO DEL DEPÓSITO DE AGUAS JABONOSAS.

Con la construcción de un microinvernadero en los depósitos de aguas jabonosas y de natas se favorecen los procesos de degradación con el incremento de la temperatura. En el depósito de aguas jabonosas será factible la introducción de macrófitas acuáticas flotantes como lirio acuático lo que favorecerá un proceso de

degradación aerobio más acelerado. Asimismo, la extracción mensual de las natas se facilitará al contar con un sistema de puerta movable.



FOTO 10. VEGETACIÓN (LIRIO ACUÁTICO) DENTRO DEL DEPÓSITO DE AGUAS JABONOSAS.

Con el relleno y la reparación de los pisos adenaños al depósito de aguas negras se logró tener un acceso seguro al sistema, además de fortalecer las paredes del mismo, pues se estaban presentando hundimientos por un movimiento natural de reacomodo de la tierra. Asimismo, con la reparación del techo de este depósito se evitó que se fracturara y aireara. Cabe destacar que primer proceso de descomposición de la materia orgánica fecal debe darse bajo condiciones anaerobias para evitar el desarrollo de patógenos. Este proceso libera una cantidad importante de gases que deben escaparse de manera permanente para evitar cualquier riesgo de explosión por su acumulación, siendo necesario fijar el tubo de liberación de gases preexistente.

Con la adecuación en el ángulo de inclinación del depósito de aguas negras y la ampliación de su diámetro se evitó la colmatación del mismo, que impedía la salida del agua. La cual es fundamental por su riqueza en nutrientes para el sistema para las macrófitas ubicadas en las canaletas del humedal.



FOTO 11. CAMBIÓ DE TUBERÍA DE ENTRADA DE AGUAS NEGRAS A DEPÓSITO DE ENTRADA PARA MEJORAR EL FLUJO DE ESTAS DENTRO DEL SISTEMA

Con la construcción y diseño de canaletas de desagüe de agua de lluvia se evitará que el sistema se inunde durante las temporadas de máxima precipitación como se había venido registrado, lo que implicaba la muerte de macrofitas por encharcamientos en las canaletas, así como la reducción de los tiempos de retención del agua, por lo que los procesos de tratamiento no se llevaba de manera adecuada.



FOTO 12 Y 13. SE MEJORÓ EL SISTEMA DE DESAGÜE DEL SUTRANE CON LA RECONSTRUCCIÓN DE CANALETAS DE AGUAS PLUVIALES.

Al elevar la altura de las bardas aledañas al sistema y controlar las pendientes se evita la entrada de terrígenos que llegan a colmatar el filtro biofísico que requiere de material poroso para favorecer los procesos de aireación y la formación de biopelículas bacterianas. Al ampliar el depósito de entrada donde se mezclan las

aguas jabonosas con las negras se favorece una mejor homogenización de las mismas y se permite un mayor tiempo de retención. Además de que favorece una adecuada distribución hacia las canaletas del humedal del sistema.



FOTO 14. ELEVACIÓN DE PAREDES DE CONTENCIÓN

Con la instalación de una nueva tubería y llaves hidráulicas que alimentan a las canaletas del humedal se aseguran flujos de agua iguales y continuos en cada una de ellas. Lo que es básico para un adecuado funcionamiento del sistema.



FOTO 15 Y 16. CAMBIO DE TUBERÍA DE ALIMENTACIÓN.

Con la reparación de las fisuras e impermeabilización en las canaletas del humedal se evitó la fuga del agua residual de la planta de tratamiento, lo que influye en los tiempos de retención y la comunicación de esta fuera del sistema. Lo que representaba una posible contaminación puntual al no ser eficientemente tratada.



FOTO 17 Y 18. LIMPIEZA Y REPARACIÓN DE LAS CANALETAS DEL HUMEDAL.

Al hacer pasillos más amplios aledaños a las canaletas de oxidación se favorecerá el poderse desplazar en el humedal para los trabajos que se realicen en la unidad de producción intensiva de flor, en cuanto aclareo, poda y limpieza. Así como la fácil recolección de las flores para su comercialización.



FOTO 19. CONSTRUCCIÓN DE PASILLOS DE CONCRETO ENTRE LAS CANALETAS DEL HUMEDAL.

Con la reparación, limpieza e impermeabilización de los depósitos de salida de las canaletas del filtro biofísico, se consiguió que estos sitios permanezcan en un estado óptimo para el almacenamiento temporal del agua tratada que fluye del proceso de degradación aeróbica favorecida por microorganismos inoculados en los bulbos y rizomas de las macrofitas relacionados con los procesos de nitrificación y oxidación de materia orgánica.

La colocación de tapas ligeras en los depósitos de salida de las canaletas en sustitución de las de concreto permitirá su fácil manejo para la limpieza periódica de los mismos y la realización de muestreos de calidad de agua que sean necesarios.



FOTO 20. TAPAS DE LOS DEPÓSITOS DE SALIDA.

La construcción de la tapa del depósito final de salida permitirá que esta no se llene de material externo al sistema y que se pueda almacenar por tiempos cortos sin que se modifique su calidad última. La colocación de una bomba adecuada permite la distribución de esta agua tratada para su empleo en el riego de la huerta de duraznos y para el riego de los pastos en las áreas de conservación de suelos.



FOTO 21. DEPÓSITO FINAL DE ALMACENAMIENTO DE AGUAS TRATADAS.

La construcción del invernadero donde se alberga el humedal de flujo sub-superficial permitirá:

-La producción intensiva de flores la mayor parte del año, al tener una regulación de la temperatura, la humedad y al evitar el ataque de plagas, particularmente áfidos que son transmisores de enfermedades virales a las plantas en cultivo, al contar las paredes con malla antiáfido.

-El control del ingreso de material orgánico alóctono como hojarasca que reducía la capacidad de tratamiento del sistema.



FOTO 22 Y 23. PRODUCCIÓN INTENSIVA DE ALCATRAZ DENTRO DEL SUTRANE.

-No estará supeditado a los cambios del tiempo atmosférico estacional, así se evitará la entrada de lluvia por precipitación pluvial al contar con material plástico en la parte superior impermeabilizante y una estructura con parteaguas para canalizarla fuera del sistema. Asimismo, el efecto de las heladas en invierno será menor. Y por la altura del sistema y ventilación contemplada en el diseño se evitará un sobrecalentamiento durante la primavera y el verano.





FOTO 24 Y 25. INVERNADERO.

Finalmente al reparar y en su caso rehacer los registros tanto de las aguas negras como jabonosas se evita también la entrada de terrígenos y otros materiales alóctonos como hojarasca que obstruyen el sistema y reducen su eficiencia. Además algunos de ellos al estar ya fracturados representaban un riesgo potencial pues podría romperse al ser pisados.



FOTO 26. CONSTRUCCIÓN DE REGISTROS PARA EL SELLADO DE LAS TUBERÍAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL SUTRANE.

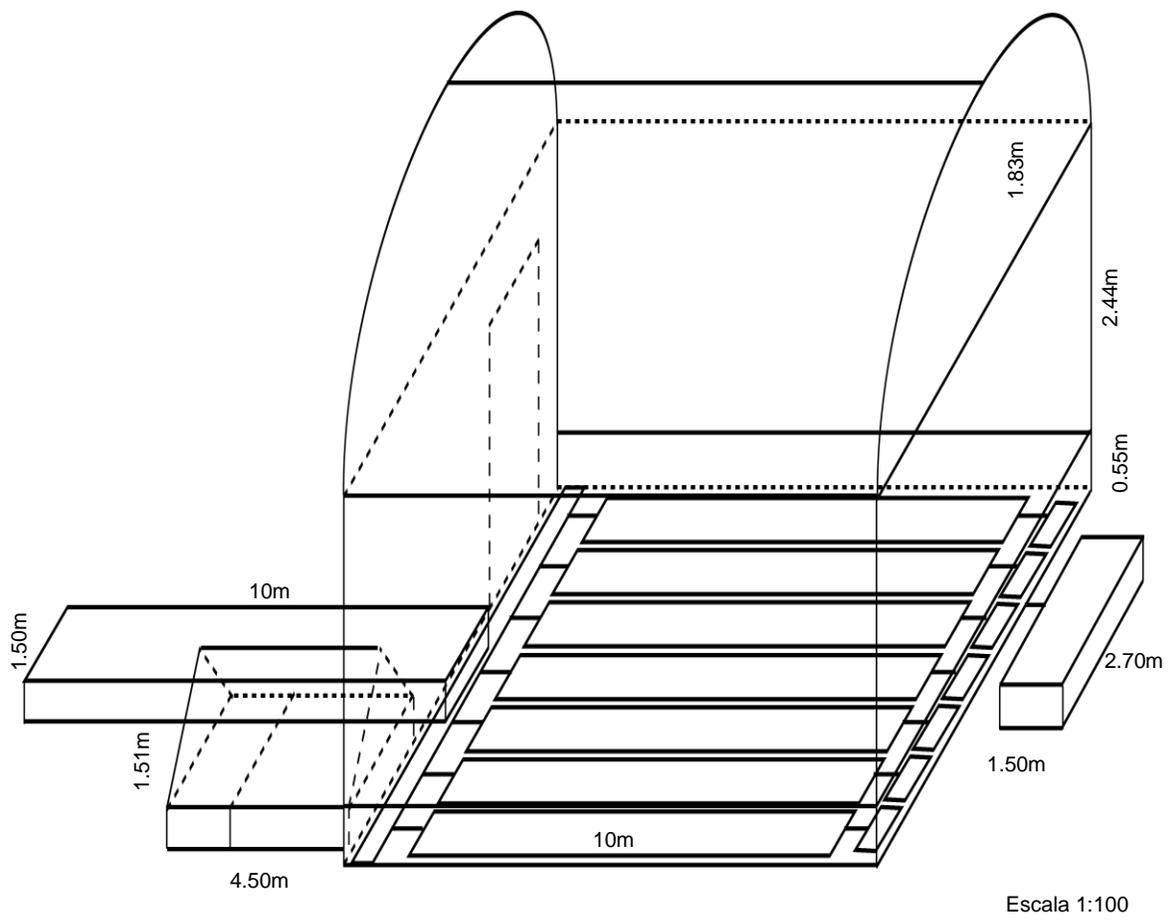


FIGURA 27. PLANO DEL SUTRANE DESPUÉS DE LAS MODIFICACIONES REALIZADAS PARA MEJORAR SU FUNCIONAMIENTO

14. Referencias

Akaratos, C.S., Tsihrintzis, V.A. (2007) Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. Ecol. Eng.

Álvarez S (2005) La descomposición de materia orgánica en humedales: la importancia del componente microbiano. Ecosistemas. Madrid.

Atlas, R.M. y Bartha, R (2002) Ecología Microbiana y Microbiología Ambiental Prentice Hall. 4ª Edición.

Anzaldo C, Prado M (2007) Índice de marginación a nivel localidad 2005. Consejo Nacional de Población. 1ª Edición. México.

APHA (1992) Métodos normalizados para el análisis de agua potables y residuales. American Public Health Association. 17ª Edición. Madrid.

Arango R.,A y Garces G.,L.F. (2007) Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. Medellín

Axler R et al (2000) Residential subsurface flow treatment wetlands in northern Minnesota, 7th international conference on wetland systems for water pollution control.

Belmont MA, Cantellano E, Thompson S, Williamson M, Sanchez A, Metcalf CD (2004) Treatment of domestic wastewater in a pilot-scale natural treatment system in central Mexico.

Centro Nacional deDesarrollo Municipal (1999) Enciclopedia de los Municipios de México. Gobierno del estado de Puebla 10 de Agosto de 2010. <http://www.emexico.gob.mx/work/E MM 1/Puebla/Mpios/21015a.htm>.

CONAGUA (2003) Subdirección Técnica de la CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. México.

CONAGUA (2008) Estadísticas del Agua en México 2008. Comisión Nacional del Agua. México.

Crites R, y Tchobanoglous G, (1998) Small and decentralized wastewater management systems. McGraw-Hill. Florida

Davison L. et al. (2000) On-site wastewater treatment by reed bed in the moist subtropics 7th international conference on wetland systems for water pollution control.

De La Orta RA, Muñoz RL (2011) Evaluación de la fenología y la calidad del agua residual en el CBTA n° 176 del municipio de Apaxtla de Castrejon Guerrero tratada en un humedal construido de flujo subsuperficial. Servicio social para obtener el grado de biólogo. México

Fernández GJ, De Miguel BE, DE Miguel JM y Curt FM (2010) Manual de fotodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Proyecto LIFE.

Fotch y Verstraete (1977) Biochemical ecology of nitrification. *Advances in Microbial Ecology* 1:135-214

Google Eart, Europa Technologies Image, Digital Glob, INEGI (2010) Mapa: 19°02'56,07" N y 98°04'02,39" O elevación 2,296m.

García de la Cruz, G (2007) Evaluación multicriterio de Organizaciones No Gubernamentales: Su desarrollo y aplicación al caso Mateo Quinto A.C., Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias, Colegio de postgraduados, Puebla, 191 pag.

García E (1988) Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México.

García J, Morató J, Bayona JM (2002) Depuración con sistemas naturales: humedales construidos. Sección de ingeniería sanitaria y ambiental, departamento de ingeniería, marítima y ambiental. Universidad de Catalunya. Barcelona.

García SJ, Corzo HA (2008) Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad Politecnica de Catalunya. Catalunya.

Garcia T, (2005) Diseño, construcción y evaluación preliminar de un humedal de flujo subsuperficial, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Ghosh, D., Gopal, B., 2010. Effect of hydraulic retention time on the treatment of secondary effluent in a subsurface flow constructed wetland. School of Environmental Science, Jawaharlal Nehru University, New Delhi, IndiaSci.

Hernandez HE (2013) Guía básica del cultivo de alcatraz (*Zantedeschia sp.*) y nociones para su propagación. Trabajo de experiencia recepcional. Universidad Veracruzana. Facultad de ciencias agrícolas.

Hernández MA (1992) Depuración de aguas residuales, Colegio de Ingenieros de caminos, canales y puertos, Servicio de publicaciones de la escuela de ingenieros de caminos de Madrid (U.P.M.), 2ª Ed. Madrid

Hobbie JD, Daley RJ, Jasper S (1977) Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl Environ Microbiol* 22: 1225-1228.

Hooper, A.B, (1990). Biochemistry of the nitrifying lithoautotrophic bacteria. En H.G. Schlegel y B. Bowien (eds.). *Autotrophic Bacteria*. Springer-Verlag, Berlín.

Hunt, PG & Ponch, ME, (2000). State of art for animal wastewater treatment in constructed wetlands. 7th International Conference on Wetland System for Water Pollution Control. (1):29-36

INEGI (2006) Estadísticas a propósito del día mundial del agua. Datos nacionales. México.

INEGI (2010) Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática 07 de Marzo de 2011. - <http://cuentame.inegi.gob.mx/poblacion/habitantes.aspx>.

Kuehl OR (2001) Diseño de experimentos, principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. International Thomson Editores. México.

Lahora A (2002) Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: la Edar de los Gallardos (Almería). Gestión de aguas del Levante Almeriense S. A. Almería.

Lara-Borrero J.A. (1999). Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Llagas WAC, Gómez EG (2006) Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*. Facultad de Ingeniería Ecológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima.

Loferer- Krößbacher M, Klima J, Psenner R (1998) Determination of bacterial cell dry mass by transmission electron microscopy and densitometric image analysis. *Appl Environ Microbiol* 64: 688-694

Lopez MS, (2011) Diseño, construcción y mantenimiento de humedales de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales en los municipios de Apxtla de Castrejon y Tetipac Guerrero, Informe de Servicio Social para obtener el grado de Biologo. México

Marín SLE, (2003) El Agua en México: Retos y oportunidades. Universidad Nacional Autonoma de México.México.

Martín GI, Betancort RJR, Salas RJJ, Peñate B, Pidre J, Sardon N (2006) Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Mejora la calidad de los efluentes. Instituto Tecnológico de Canarias, S.A., Canarias.

Metcalf L, Harrison PE, (1981) Tratamiento y depuración de las aguas residuales, Labor, 2ª ed, Barcelona.

Nakamura K. (2000) Compact wetland system for urban area in Japan 7th international conference on wetland systems for water pollution control.

Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluentes: recurso agua de la Republica de Ecuador.

Norma Oficial Mexicana, NOM-001-SEMARNAT (1996) Que establece los límites maximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

Norma Oficial Mexicana, NOM-003-SEMARNAT (1997) Que establece los límites maximos permisibles para contaminantes para aguas residuales tratadas que se reusen en servicio al público.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-004-SCFI (2000) Análisis de agua, determinación de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-007-SCFI (2000) Análisis de agua, determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-008-SCFI (2000) Análisis de agua, determinación del pH. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-093-SCFI (2000) Análisis de agua, determinación de la conductividad electrolítica. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-012-SCFI (2001) Análisis de agua, determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-026-SCFI (2001) Análisis de agua, determinación de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-028-SCFI (2001) Análisis de agua, determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (BDO5) y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-034-SCFI (2001) Análisis de agua, determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana, NMX-AA-079-SCFI (2001) Análisis de aguas, determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. México.

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-042 (2005) Calidad del agua, determinación del número más probable (NMP) de coliformes totales, coliformes fecales (Termotolerantes) y *Escherichia coli* Presuntiva. México.

Norma Oficial Mexicana NMX-AA-099 (2006) Análisis de agua, determinación de nitrógeno de nitritos en aguas naturales y residuales. México.

Organización de las Naciones Unidas (2003) Agua para todos. Agua para la vida. Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo. Ediciones Mundi Prensa, Madrid.

Porter KG, Feig YS (1980) The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnol Oceanogr* 25: 943-948.

Posch T, Krößbacher LM, Gao G, Alfreider A, Pernthaler J, Psenner R (2001) Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes, and of allometric and linear volume-to carbon conversion factors. *Aquat Microb Ecol* 25: 55-63.

Psenner R (1993) Determination of size and morphology of aquatic bacteria by automated image analysis. In: Kemp, PF, Sherr, BF, Sherr EB, Cole, JJ (Eds.),

Handbook of Methods in Aquatic Microbiology. Lewis Publishers, Boca Raton, FL., pp. 339-345.

Quirós QJ (1985) El conjunto ecológico autosuficiente. Guía de su opertividad, Edición Privada, México.

Ramsar Convention (1971) Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Ramsar Coonvention Bureau, Ramsar.Reed, S.C., Crites, R.W., Middlebrooks, E.J., 1995. Natural Systems for Wastemanagement and Treatment, 2nd ed. Mc Graw Hill Professional, New York.

Reynolds KA (2002) Tratamiento de aguas residuales en Latinoamérica. Identificación del problema. Universidad de Arizona. Arizona.

Rodríguez PC (2003) Humedales construidos. Estado del arte (I), Ingeniería hidráulica y ambiental, Habana.

Salati E, et al. (2000) Assessment of the efficiency of wetland system-pilot plan-for tertiary treatment 7th international coference on wetland systems for water pollution control.

Salgado-Ugarte IH (1992) El análisis exploratorio de datos biológicos, fundamentos y aplicaciones. ENEP Zaragoza, UNAM. Ediciones Marc. México.

Schroeder, E. D. (1997) Water and Wastewater Treatment. McGraw-Hill, Nueva York.

Un Wáter, UNEP, FAOWATER (2010) Agua limpia para un mundo sano. Coordinación del Día Mundial del Agua UNEP. Identidad visual y campaña de comunicación del Día Mundial del Agua. FAOWATER.

US EPA (1993) Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment A new technology assesment. Washington, D.C.

US EPA (2000) Folleto informativo de tecnología de aguas residuales humedales de flujo subsuperficial.

Vymazal J. (2000) Constructed wetland for wastewater treatment in Czech Republic, 7th international coference on wetland systems for water pollution control.

Vymazal J. (1993) Constructed wetlands for wastewater treatment in Czechoslovakia: state of the Art. En Constructed wetlands for water quality improvement, Lewis, USA.

Zambrano X, Saltos X, Villamar F (2004) Diseño del Sistema de Tratamiento para la Depuración de la Población San Eloy en la Provincia de Manabí por medio de un sistema de tratamiento natural compuesto por un humedal artificial de flujo libre. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil.

Zúñiga J (2004) Influencia del soporte y tipo de macrófita en la remoción de materia orgánica y nutrientes en humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Bioquímica, Chile.