



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE BIÒLOGIA

ÁREA: CIENCIAS AMBIENTALES

DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN LA GRANJA DIDÁCTICA “DOS PUERTAS” TAXCO EL VIEJO, GUERRERO.

TESIS PROFESIONAL QUE PARA
OBTENER EL TÍTULO DE BIÒLOGA
PRESENTA:

ALVARADO ORTIZ MARIBEL

DIRECTORA DE TESIS:

BIÓL. MARICELA ARTEAGA MEJIA

CDMX

NOVIEMBRE 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
 "ZARAGOZA"
 DIRECCIÓN

JEFE DE LA UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 PRESENTE.

Comunico a usted que la alumna **ALVARADO ORTIZ MARIBEL**, con número de cuenta **410059973**, de la carrera de Biología, se le ha fijado el día **08 de noviembre de 2016** a las **09:00 hrs.**, para presentar examen profesional, el cual tendrá lugar en esta Facultad con el siguiente jurado:

- PRESIDENTE** M. en C. RAMIRO RÍOS GÓMEZ
- VOCAL** Biól. MARICELA ARTEAGA MEJÍA
- SECRETARIO** Biól. ELVIA GARCÍA SANTOS
- SUPLENTE** M. en C. GERMÁN CALVA VÁSQUEZ
- SUPLENTE** Dr. JUSTO SALVADOR HERNÁNDEZ AVILÉS

El título de la tesis que presenta es: **Diseño de un humedal artificial en la granja didáctica "dos puertas" Taxco El Viejo, Guerrero.**

Opción de titulación: Tesis.

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

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
 Ciudad de México, a 06 de octubre de 2016



DR. VÍCTOR MANUEL MENDOZA NÚÑEZ
 DIRECTOR

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES "ZARAGOZA" DIRECCIÓN

RECIBI
 OFICINA DE EXÁMENES
 PROFESIONALES Y DE GRADO


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

Dedicado a mi familia

*No te acobardes corazón mío:
allí en medio de la llanura deseo la muerte
a filo de obsidiana.
Solo quieren nuestros corazones muerte en guerra,
de modo que allí junto a la guerra
estoy deseando la muerte a filo de obsidiana.*

Poema Náhuatl.

Agradecimientos

A dios por darme la dicha de existir y poner en mi camino a seres especiales que me guían por el buen camino.

A mis padres José Felix y Carmen Guadalupe:

¡Lo logre! Por fin pueden dejar de preocuparse jajaja, con este proyecto culmino mis estudios a nivel profesional. Estaré eternamente agradecida por acompañarme en este largo camino, sé que algunas veces dudaron de mis anhelos y aspiraciones, pero al final del día creyeron y permanecieron a mi lado. Gracias por ser parte de mi vida, por darme la oportunidad y ese voto de confianza, por guiarme y escucharme en todo momento, los amo con todo mi corazón.

A mis hermanas Evelin y Carmen:

Por su apoyo incondicional, por afrontar conmigo cada obstáculo, por esas palabras alentadoras cada vez que caía, por escucharme, por compartirme sus experiencias de vida, por ser mi más grande ejemplo, por sus consejos, por todos esos buenos y malos momentos que hemos compartido desde niñas. ¡Estoy muy orgullosa de ustedes hermanitas sin duda son unas mujeres maravillosas!!! Mil gracias por siempre estar ahí, también las amo.

A Julián y Julieta:

Pues que te digo cuñado!! Sabes que eres un lujo de persona, muchas gracias por todos esos consejos de hermano, por escucharme, comprenderme y guiarme en los momentos más difíciles, por siempre creer en mí, te quiero mucho. A mi niña hermosa, que con sus ojitos radiantes iluminabas mis días y siempre sacabas una sonrisa en mis peores momentos.

A mis profesores:

A todos y cada uno de ustedes por aportar vastos conocimientos, así como experiencias personales que contribuyeron a mi formación académica, en especial a mi directora de tesis la profesora Maricela Arteaga por darme la oportunidad de compartir con ella más allá de una relación docente-alumno. Es

una mujer excepcional, con un gran corazón y una excelente calidad humana, gracias por su apoyo incondicional y sus consejos, la quiero mucho.

A ti homes:

Por todas esas experiencias irrepetibles, por esa onírica insomnia que vivimos, por ser mi maestro en la escuela de la vida, por reventar esa burbuja (mi fantasía) y aterrizar en mi realidad fortaleciendo mi interior para poder soportar las adversidades, por ser parte de una historia, por ser nubes con la mente. De coraza gracias! Se feliz vale la pena!!

A mis amigos:

Por ser parte de este libro de aventuras, cada salida al campo, tokines, congresos, conferencias, ofrendas y banderillas en CU, por todas esas mal pasadas, risas, preocupaciones, lagrimas, experiencias y ustedes saben que más jajaja, gracias por ser parte de mi vida los quiero mucho amiguitos. En especial al amiguito "borre", ya que fuiste pieza clave en mi camino, estaré eternamente agradecida contigo. A Eli Mont por el verano horrible jaja que jamás olvidare porque nos ayudó a madurar, isí o no mana! A Manuel y Araceli por ese desarrollo y crecimiento espiritual, por su humildad, por su sencillez y por su apoyo incondicional.

A mis compañeros de laboratorio:

Flaca!! Muchas gracias te luciste, te quiero mucho nena y sabes que siempre estaré pendiente. A María, Enrique, Orly, Jess y Andy, por esas salidas al campo, por siempre pedir postre, por esas tardes interminables de chetos, esperando a que estuviera el nitrógeno, por lo vivido en el congreso en Puebla y por todos esos momentos agradables. A mis arpías favoritas teresa, dorita, mama fany y brytani por ese inolvidable congreso en Acapulco. A Massiel, Carlos y Cesar, por esas prácticas de campo en Oaxaca verdaderamente las mejores noches llenas de risas.

A compañeros de trabajo de las áreas verdes:

Al ingeniero Francisco Javier por ser tan insistentemente con la culminación de la tesis y por todos sus consejos. A ese artesano (Horacio) por enseñarme compartirme sus experiencias y su autenticidad. A Monse Vera por recordar que en la vida hay que tener fortaleza y tenacidad. A Roberto "el largo" por enseñarme a ser líder, por hacer valer esa equidad social.

A mis compañeros de Obra

Al "charro negro" por confiar en mí, por brindarme la oportunidad de tener ese crecimiento profesional. Al arquitecto Carlos Mera por enseñarme que solo con constancia y perseverancia se logran los objetivos, ah!!! Y por modelar mi humedal te rifaste. A chofis por enseñarme (con su ejemplo) a confiar en mí, por recordarme que en la vida no hay obstáculos, solo los que uno mismo se pone, al niño por su apoyo incondicional y muy especialmente agradezco al biólogo flaco sexy por sus conocimientos, su paciencia y por esas platicas tan profundas que me llevan a fuertes introspecciones.

Espero no haber olvidado a nadie y si lo hice no se lo tomen muy a pecho estaba nerviosa jajaja, gracias a todos y cada uno de ustedes porque fueron, siguen y seguirán siendo parte de esta aventura, por ahora solo se cierra un capítulo, pero sé que vendrán más, mientras tanto continuare disfrutando de su compañía esperando ver que me depara el tonalli.

¡POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU!

CONTENIDO

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÒN	2
3. MARCO TEÒRICO	3
3.1 Disponibilidad de agua a nivel mundial.....	3
3.2 Disponibilidad de agua en Mèxico	3
3.3 Disponibilidad de agua en el estado de Guerrero	4
4. CALIDAD DEL AGUA.....	5
4.1 Indice de Calidad del agua	5
4.2 Indicadores de Calidad del agua	6
5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	9
5.1 Tratamiento de aguas residuales en Mèxico	9
5.2 Tratamiento de aguas residuales en Guerrero	9
6. HUMEDALES ARTIFICIALES.....	10
6.1 Clasificasion de humedales.....	11
6.2 Componentes de los humedales artificiales.....	12
7. DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.....	13
8. PROBLEMÀTICA.....	15
9. JUSTIFICACIÒN.....	15
10. OBJETIVOS.....	16
10.1 General	16
10.2 Particular	16
11. DESCRIPCIÒN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	17
11.1 Ubicacion	17
11.2 Hidrografia.....	17
11.3 Clima.....	18
11.4 Geologia.....	18
11.5 Uso de suelo y vegetaciòn	18
11.6 Fauna.....	19
11.7 Indicadores economicos.....	19
12. METODOLOGIA	20
12.1 Gabinete.....	20
12.2 Campo	22

12.3 Laboratorio	24
13. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
13.1 Índice de Calidad del Agua (ICA)	37
13.2 Parámetros de diseño	39
13.3 Proceso de construcción	40
14. CONCLUSIONES	46
15. BIBLIOGRAFIA	47

INDICE DE FIGURAS

1. Disponibilidad natural media por habitante por región hidrológica-administrativa ...	4
2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado	9
3. Clasificación de sistemas de depuración por macrófitas	11
4. Ubicación del Río San Juan Taxco El Viejo, Guerrero	17
5. Comportamiento de DQO – DBO ₅	25
6. Comportamiento de oxígeno disuelto.....	27
7. Porcentaje de Saturación de Oxígeno en el agua	28
8. Comportamiento de temperatura.....	29
9. Comportamiento de pH	30
10. Comportamiento nitrógeno	31
11. Comportamiento nitratos y nitritos.....	32
12. Coliformes totales y fecales	33
13. Comportamiento de los tipos de fósforo y SAAM	34
14. Comportamiento de las diferentes formas de sólidos	36
15. Comportamiento de grasas y aceites	37
16. Porcentaje de agua pura durante los meses de muestreo	38
17. Diseño del humedal artificial	40
18. Conexiones y descargas del humedal artificial.....	40

INDICE DE CUADROS

1. Parámetros para evaluar ICA.....	6
2. Indicadores de calidad del agua.....	8
3. Parámetros que se determinaron en campo	24
4. Parámetros que se determinaron en laboratorio	24
5. Rangos de clasificación del ICA.....	39
6. Resultados para el dimensionamiento del humedal artificial	39

1. RESUMEN

Al norte del municipio de Taxco de Alarcón Guerrero, se encuentra Taxco El Viejo, localidad que descarga vertidos de las actividades primarias y secundarias sin ningún tratamiento previo a los cuerpos superficiales de agua.

En el presente trabajo se determinó la calidad del agua residual que la granja didáctica “dos puertas” vierte al río San Juan. Se realizaron muestreos compuestos en septiembre, octubre y noviembre de 2014, marzo, agosto, octubre y noviembre de 2015, los resultados obtenidos se compararon con el Índice de Calidad del Agua (ICA) propuesto por CONAGUA, los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Posteriormente se adoptó la alternativa de diseñar y construir un humedal artificial para tratar el agua residual que se genera en la granja didáctica, antes de ser descargada en cuerpos superficiales.

Los resultados muestran que la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) rebasó los LMP establecidos en la NOM-001- SEMARNAT-1996, sin embargo, de acuerdo con el ICA la DBO_5 y DQO presentan valores elevados, el principal problema es la presencia de materia inorgánica, al comparar la relación que guarda la DQO con respecto a la DBO_5 , se observa presencia importante de compuestos inorgánicos. Fósforo y Sustancia Activas al Azul de Metileno (SAAM) que sobrepasan los valores establecidos en los CE-CCA-001/89 durante septiembre y noviembre 2014 y en marzo, octubre y noviembre del año 2015. En septiembre y octubre del 2014, se presentaron concentraciones de coliformes fecales mayores a las establecidas en los CE-CCA-001/89 de 1000 NMP, solamente en octubre de 2015, sobrepasó lo establecido, por lo que el líquido no era apto para ser utilizado en servicios al público con contacto indirecto u ocasional por riesgo sanitario. Los resultados comparados con el ICA, indican que el sitio del vertido de la granja didáctica, es un cuerpo superficial contaminado (color anaranjado). Se estableció el diseño con base al parámetro de DBO_5 y se construyó un humedal artificial de flujo subsuperficial; en noviembre del 2015 inició su funcionamiento, el sistema comprende un área de 21 m² y su tiempo de residencia hidráulica es de 15.6 hrs para obtener la calidad de agua esperada.

2. INTRODUCCIÓN

La disposición inadecuada de las aguas residuales domésticas, industriales y/o agrícolas ha repercutido directamente en el medio ambiente, ocasionando problemas graves de contaminación, especialmente en países como México, con una economía emergente (Ramírez *et al.*, 2009). En la actualidad muchos ríos sirven de cuerpos receptores a descargas, tal que va más allá de su capacidad de asimilación y dilución, con el consecuente incremento en la materia orgánica en ellos (CONAGUA, 2007). Con el objeto de preservar la calidad del agua, se construyen plantas para su tratamiento antes de su descarga a cuerpos de agua superficiales.

Para el tratamiento de aguas residuales, el estado de Guerrero dentro de su sistema de saneamiento, cuenta con 47 plantas tratadoras, con una capacidad instalada de 3,481 L/seg, se ubican en 24 municipios de la entidad y benefician a cerca de un millón ochocientos mil habitantes (INEGI, 2013). Sus ríos se encuentran contaminados; el río Taxco recibe los vertidos líquidos de la cabecera municipal, que están contaminados con ácidos utilizados en el proceso de fabricación de artesanía en plata, desechos del rastro municipal, agua de la industria minera y escurrimiento de los jales mineros. Taxco no cuenta con ninguna planta tratadora de aguas residuales, actualmente se lleva a cabo la construcción de la primera planta combinada con humedales artificiales, sin embargo, se encuentra aún en proceso y con frecuencia se detienen las actividades por falta de recursos y fines políticos. Se han invertido alrededor de 40 millones de pesos para tratar los vertidos residuales que se generan en la cabecera municipal y sus principales comunidades con la finalidad de sanear los ríos San Juan y Taxco.

La granja didáctica “dos puertas” se ubica en el municipio de Taxco “El Viejo”, en las márgenes del río San Juan, por ello surge la necesidad de construir un humedal artificial, para tratar las aguas residuales que se generan a partir de todos los servicios que ofrece y el mantenimiento de la granja (limpieza de corrales tanto en seco como por lavado con agua, uso de sanitarios y domésticos, principalmente).

La eficacia de un humedal artificial y la calidad de agua esperada dependen principalmente de un diseño adecuado, ya que favorece los procesos biogeoquímicos que se llevan a cabo

dentro del sistema, el parámetro de diseño se seleccionará de acuerdo a la caracterización previa del agua residual.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Disponibilidad de agua a nivel mundial

El estrés hídrico y la escasez de agua son desafíos globales de gran alcance económico y social, trascendencia impulsada por aumento de la población, la creciente urbanización, el cambio de estilos de vida y el desarrollo económico, la demanda total del agua está incrementando en los centros urbanos, de la agricultura y de las industrias.

Las reservas de agua en el mundo consideran el volumen disponible total acumulado en el manto subterráneo y superficial, su disponibilidad en una región o país depende del balance hídrico. A nivel mundial, la disponibilidad por habitante ha disminuido significativamente en unas cuantas décadas. En 1960, a cada ciudadano del mundo le correspondían 11 300 m³/hab/año, los cuales se redujeron a sólo 5 mil m³/hab/ año para el 2010, cuando la población mundial fue de aproximadamente 6 900 millones de personas (FAO, 2012).

3.2 Disponibilidad de agua en México

En México la precipitación media anual es de 760 mm equivalente a 1 489 km³; de los cuales 331 km³ escurren a través de los ríos, 1 065 km³ corresponden a la evapotranspiración y 93 km³ recargan los acuíferos (CONAGUA, 2013). A nivel nacional la disponibilidad también se ha reducido de manera importante, el Consejo Nacional de Población (Conapo) estima que al 2050 México tendrá 150.8 millones de habitantes, lo que representará mayor presión sobre los recursos hídricos. La disponibilidad natural media por habitante de agua en México era en 1950 de 18 035 m³/hab/ año y en 2013 pasó a 3 982 m³/hab/año, cifra calificada como baja por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

La disponibilidad de agua por habitante en México es mucho menor que la de países como Canadá (84 633 m³/hab/año), Panamá (42 577 m³/hab/año) o Estados Unidos (9159 m³/

hab/año), y en general de toda América del Sur, pero ligeramente superior al promedio de muchos de los países europeos (FAO, 2012).

3.3 Disponibilidad de agua en el Estado de Guerrero

La región hidrológica del Balsas es una de las más extensas e importantes de México, su superficie es de aproximadamente 119 248 km², constituye una depresión con dirección este-oeste en la parte centro sur de México, en la que están comprendidas porciones de los estados de Guerrero, Jalisco, Distrito Federal, Michoacán, Oaxaca, Puebla, Tlaxcala y Morelos. Sin embargo, hoy día dicha cuenca está considerado como una de las más contaminadas a nivel nacional (CONAGUA, 2013).

Uno de los ríos más importantes de la localidad de Taxco el Viejo es el río San Juan, el cual pertenece en su totalidad a dicha región hidrológica y a las subcuencas río Iguala o Cocula y río Amacuzac, que de acuerdo a la NOM- AA-159-SCF-2012 en la que se establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas, éstas se encuentran bajo una gran presión y su importancia ecológica es muy alta. Además, la disposición por habitante de la cuenca del Balsas se considera muy baja ya que oscila entre los 1000-2000 m³/hab/año y dichas subcuencas presentan un déficit de disponibilidad de agua (CONAGUA, 2010), (figura 1).

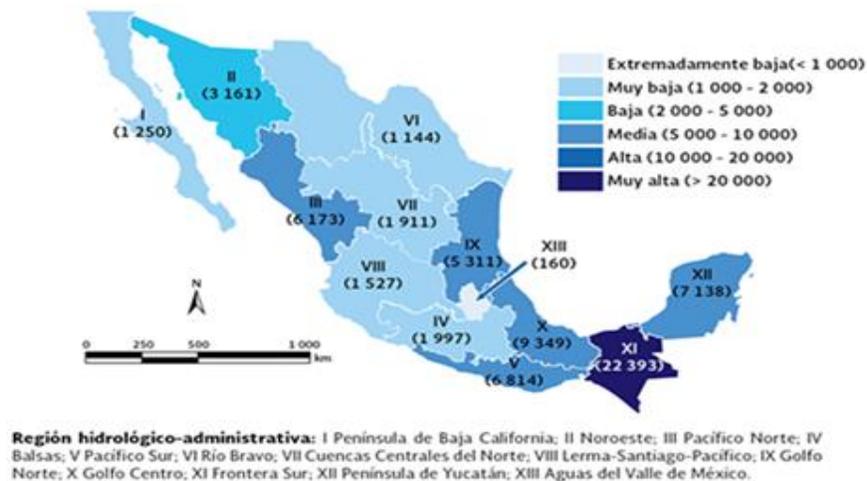


Figura 1. Disponibilidad natural media por habitante por región hidrológico-administrativa (CONAGUA, 2012).

Los valores nacionales por habitante pueden enmascarar situaciones de estrés hídrico a nivel regional. México presenta todo el espectro de categorías de disponibilidad de agua en sus regiones hidrológico-administrativas, que van desde la muy alta, alta, media, baja, muy baja, hasta la extremadamente baja (menor a 1 000 m³/hab/año), (CONAGUA, 2012).

4. CALIDAD DEL AGUA

La calidad del agua no es una característica absoluta, sino que depende del uso al que vaya a destinarse. Factores como los usos del suelo, la cantidad de agua utilizada por las poblaciones humanas, las industrias asentadas en la cuenca y el tratamiento que se le da antes de ser vertida, influyen en la calidad del agua de los ríos y lagos; el escurrimiento hacia la parte baja de las cuencas hidrológicas acarrea nutrimentos y contaminantes procedentes de superficies agrícolas en su mayoría. Estos compuestos, junto con los aportados en las descargas de aguas residuales, contribuyen a que se deteriore la calidad del agua de ríos y lagos (kazi *et al*, 2009).

4.1 Índice de Calidad del Agua (ICA)

Para evaluar la calidad o grado de contaminación del agua se han desarrollado diversos índices tanto generales como de uso específico. En México se emplea el llamado Índice de Calidad del Agua (ICA), que agrupa de manera ponderada diferentes parámetros del deterioro de la calidad del líquido, y es aplicado por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) a través de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

El ICA se define como el grado de contaminación existente en el agua a la fecha de un muestreo, expresado como un porcentaje de agua pura. Así, agua altamente contaminada tendrá un ICA cercano o igual a 0% y de 100% para el agua en excelentes condiciones.

Éste índice consideró 18 parámetros para su cálculo con distintos pesos relativos (W_i), según la importancia que se le concedía a cada uno de ellos en la evaluación total.

Parámetro	Peso (W _i)	Parámetro	Peso (W _i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

Cuadro 1. Parámetros para evaluar el ICA

El cálculo del ICA se realiza aplicando la ecuación siguiente:

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Dónde:

I_i = Índice de calidad para el parámetro i

W_i = Coeficiente de ponderación del parámetro i

N = Número total de parámetros

4.2 Indicadores de Calidad del Agua

El crecimiento poblacional y principalmente el crecimiento industrial ha impactado los cuerpos de agua con sus descargas, las cuales vierten una serie de contaminantes tóxicos, tales como los metales pesados y los compuestos orgánicos, que no estaban considerados

en el ICA, por lo que la evaluación que se hace actualmente con dicho índice es parcial y no necesariamente corresponde a la realidad.

Para evaluar la calidad del agua se ha decidido utilizar tres parámetros indicadores de la misma, que muestran la influencia antropogénica desde el punto de vista de la afectación por la presencia de centros urbanos e industriales que por sus características producen desechos líquidos de calidad diferenciable.

Para ello se ha considerado utilizar la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST). La DBO_5 y la DQO se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal.

La DBO_5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad total de materia orgánica. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas acuáticos. Por otro lado, el aumento de la DQO indica presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales.

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana; hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipal, así como áreas con deforestación severa.

CRITERIO (mg/l)	CLASIFICACIÓN	COLOR
DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)		
DBO ₅ ≤ 3	EXCELENTE No contaminada	AZUL
3 < DBO ₅ ≤ 6	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable	VERDE
6 < DBO ₅ ≤ 30	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
30 < DBO ₅ ≤ 120	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
DBO ₅ > 120	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO
DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)		
DQO ≤ 10	EXCELENTE No contaminada	AZUL
10 < DQO ≤ 20	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable y no biodegradable	VERDE
20 < DQO ≤ 40	ACEPTABLE Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración o con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente	AMARILLO
40 < DQO ≤ 200	CONTAMINADA Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal	NARANJA
DQO > 200	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales	ROJO
SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST)		
SST ≤ 25	EXCELENTE Clase de excepción, muy buena calidad	AZUL
25 < SST ≤ 75	BUENA CALIDAD Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto	VERDE
75 < SST ≤ 150	ACEPTABLE Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido	AMARILLO
150 < SST ≤ 400	CONTAMINADA Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido	NARANJA
SST > 400	FUERTEMENTE CONTAMINADA Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces	ROJO

Cuadro 2. Indicadores de calidad del agua (SEMARNAT, 2015).

5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

5.1 Tratamiento de aguas residuales en México

México cuenta con 2 342 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación (procesan un caudal de 99.8 m³/s) es decir el 47.5% de los 210.2 m³/s recolectados en los sistemas de alcantarillado y 2 530 plantas para tratamiento de aguas residuales industriales lo que indica que la industria trató un 60.5m³/s del caudal residual (CONAGUA, 2012). Los principales tipos de tratamiento que usan estas plantas se muestran en la figura 2.

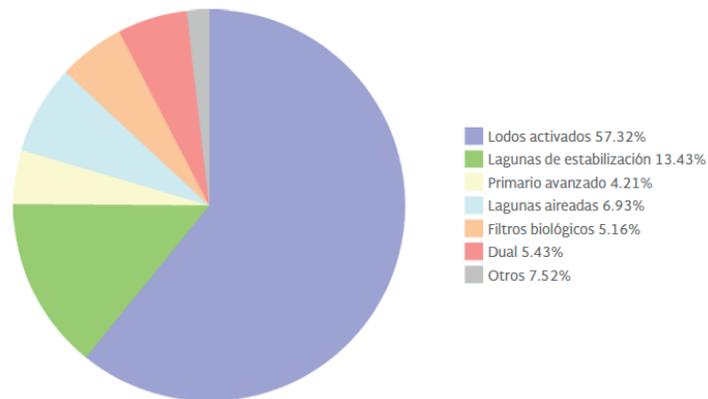


Figura 2. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales por caudal tratado (CONAGUA, 2014).

5.2 Tratamiento de aguas residuales en Guerrero

Para el tratamiento de aguas residuales, el estado de Guerrero, cuenta con 47 plantas, que tienen una capacidad instalada de 3 mil 481 litros por segundo, están ubicadas en 24 municipios de la entidad y benefician a cerca de un millón ochocientos mil habitantes (INEGI, 2013).

En 23 municipios de Guerrero el total, o al menos una fracción, de las aguas residuales recibe tratamiento. Esta depuración de carga contaminante se realiza en 44 plantas o sitios, donde en su mayoría (61%) se realizan procesos de los denominados de tipo secundario o

convencional, como: filtros biológicos, lodos activados y sistema dual, principalmente; y el 39% correspondientes a tratamientos de tipo primario. Se registraron 64 puntos de descargas de aguas residuales sin tratamiento en la entidad; el 39% de éstos se localiza en ríos y arroyos (INEGI, 2010).

6. HUMEDALES ARTIFICIALES

La idea de tratamiento de aguas residuales en los sistemas de humedales artificiales y naturales se ha desarrollado durante los últimos 30 años. En Europa existen alrededor de 10 000 humedales construidos (HC), como sistemas de tratamiento. En Alemania unos 3 500, Dinamarca 200-400, en Gran Bretaña 400-600 y en Polonia 1000, se encuentran en operación. La mayoría de los sistemas existentes sirven como tratamiento doméstico, local o individual (Obarska-Pempkowiak *et al.*, 2015)

Actualmente en México se encuentran registradas 71 plantas de tratamiento que utilizan los humedales artificiales como proceso depurador. Para el estado de Guerrero solo Zihuatanejo de Azuela cuenta con un humedal construido (CONAGUA, 2014)

La FES Zaragoza ha implementado esta tecnología en algunos municipios del estado obteniendo resultados exitosos, ejemplo de ello se encuentran en **Apaxtla de Castrejón y Tetipac**.

Los humedales artificiales son una tecnología para el tratamiento de aguas residuales, consisten en lechos poco profundos (normalmente menor a 1m de profundidad), pozos o canales que se han sembrado con plantas acuáticas, y que dependen de procesos naturales, tales como los biológicos, microbianos, físicos y químicos para tratar el agua residual (Lara y Vera, 2011). Debido a las condiciones específicas que permiten el desarrollo de hidrófitas, la intensificación de los procesos oxido-reducción, acompañados con sorción, sedimentación y asimilación, se pueden observar los procesos de eliminación de la mayoría de los contaminantes de las aguas residuales (Obarska-Pempkowiak *et al.*, 2015). Es decir, los humedales eliminan la materia orgánica y nutrientes a través de una combinación de factores biológicos, físicos y químicos (Stottmeister *et al* 2003., Sundaravadivel y Vigneswaran, 2010, en, Mancilla *et al.*, 2013).

6.1 Clasificación de humedales

Existen distintos tipos de humedales artificiales; estos hacen referencia no solo al arreglo del medio acuático, sino de los tipos y la disposición de las plantas que se utilizan para ellos, según (Delgadillo *et al.*, 2010).

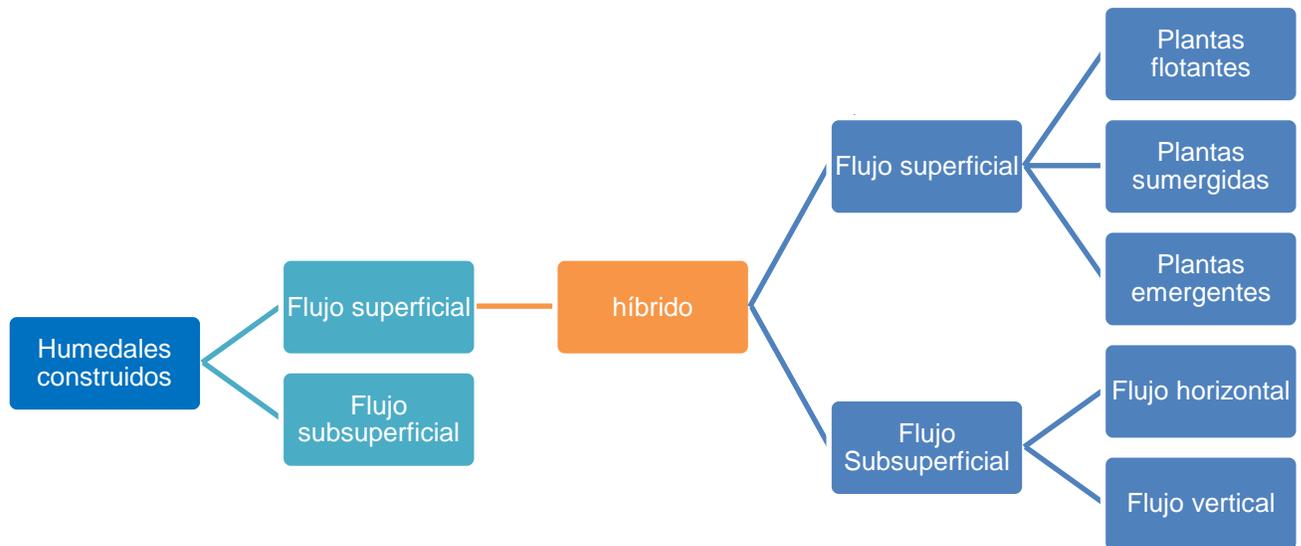


Figura 3. Clasificación de sistemas de depuración por macrófitas (Kadlec y Wallace 2009, Delgadillo *et al.*, 2010).

Dentro de la clasificación de humedales, destacan los de flujo sub superficial (FWS CW) por su eficiente eliminación de compuestos orgánicos por la degradación microbiana y asentamiento de partículas coloidales. Los sólidos en suspensión se eliminan de manera efectiva por sedimentación y filtración a través de la densa vegetación. El nitrógeno se elimina principalmente por la nitrificación (en la columna de agua) seguida de la desnitrificación (en la capa de hojarasca) y la volatilización de amoníaco bajo los valores de pH altos causados por la fotosíntesis de las algas. La retención de fósforo es generalmente baja debido a un contacto limitado de agua con partículas de suelo que adsorben y/o precipitan fósforo (Vymazal, 2011).

6.2 Componentes de los humedales construidos.

Sustrato (medio granular)

En los humedales, el sustrato está formado por arena, grava, roca, sedimentos y vegetación que se acumula en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar sustratos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con poros finos.

El sustrato, sedimentos y restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones, entre las que destacan:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el sistema
- 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.
- 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, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999).

El sustrato es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas).

Vegetación

La vegetación que se introduce en los humedales construidos es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración de aguas residuales. Su papel está determinado por las raíces y rizomas enterrados, tienen como función principal absorber energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Además, tiene

la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos lo utilizan para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y para el proceso de nitrificación (Delgadillo *et al.*, 2010).

Microorganismos

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004). Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y diversos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara, 1999).

Para que se lleven a cabo estos procesos, la superficie y el tiempo de contacto entre el sustrato y el vertido residual son determinantes; por lo que un diseño adecuado permitirá alcanzar la calidad deseada del agua residual.

7. DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL.

Las diferencias en el funcionamiento de los humedales son el resultado de los procesos físicos, químicos y las condiciones biológicas, que influyen en conjunto directamente en las transformaciones de la matriz de la planta. Los humedales son resistentes a las fluctuaciones de cargas hidráulicas, pero depende de la cantidad de carga orgánica que entra al sistema y la tasa de los procesos biológicos para que los contaminantes puedan ser removidos y / o retenidos en el sistema. Por lo tanto, el humedal debe ser diseñado y

operado de tal de manera que se garantice la mayor eliminación de contaminantes vertidos (Obarska-Pempkowiak *et al.*, 2015), para ello debe seleccionarse el parámetro de diseño (DBO₅, DQO, SST, Nitrógeno, etc).

Para el dimensionamiento de un humedal artificial deben considerarse parámetros físicos, como:

- Carga hidráulica: es la capacidad de almacenamiento del sistema por diferentes tipos de entradas (precipitaciones, afluente y producto recirculador) y salidas (evaporación, efluente, evapotranspiración, infiltración y consumo propio en la constitución de los tejidos de las biocenosis presentes) de agua al sistema. Esta carga condiciona la velocidad de paso a través del material, y por lo tanto el tiempo de retención, que es el factor del que depende, en condiciones normales, la eliminación de la DBO₅, y el rendimiento del sistema. Por ello este es un parámetro fundamental para el control del funcionamiento.
- Tiempo de retención hidráulica: se refiere al tiempo necesario que deba permanecer el afluente en el sistema para ser depurado. Depende de la carga orgánica, climatología, flujo de diseño, geometría del sistema y el sistema del humedal aplicado.
- Profundidad del humedal: La profundidad tiene un intervalo entre 0.30 a 0.90 m, el más común es de 0.60m, esta altura se requiere para el buen funcionamiento del sistema, ya que la entrada de oxígeno es importante para llevar a cabo los procesos bioquímicos de depuración.
- Temperatura del agua y del aire
- La aeración para mantener y desarrollar la vida aeróbica, sea esta aireación conseguida de forma natural o forzada.
- Carga orgánica: Depende del contenido de O₂ y su capacidad para transformar la materia orgánica.

(Hernández, 1994)

8. PROBLEMÁTICA

México cuenta con 2 456 municipios, de los cuales solo 1 470 sitios reciben algún tipo de tratamiento para reducir la carga contaminante. La descarga de grandes volúmenes de aguas residuales no tratadas, afecta la calidad del agua de cuerpos superficiales; el 39% de los puntos de descarga se localizan en ríos y arroyos (INEGI, 2013), lo que disminuye su capacidad de dilución y autodepuración.

Actualmente la cuenca del Balsas es una de las más contaminadas a nivel nacional (CONAGUA, 2015). La subcuenca del río San Juan, pertenece a esta región hidrológica, se ubica entre los municipios de Taxco de Alarcón, Buenavista de Cuéllar, Iguala, Teloloapan y Cocula, y cuenta con una superficie de 373.1 km², lo que representa el 0.058% del territorio estatal (Almazán *et al.*, 2004). El municipio Taxco de Alarcón es uno de los principales vertederos de residuos líquidos del Estado de Guerrero (INEGI, 2013). El río San Juan absorbe los escurrimientos de las aguas sin tratamiento, que provienen de diferentes localidades, una de ellas es la granja didáctica “Dos Puertas”, originando el ingreso de aguas residuales con características de origen doméstico; aunado a los asentamientos irregulares y prácticas habituales que se desarrollan en los márgenes del río, esto contribuye al deterioro de la calidad del agua y el paisaje natural, contaminando a los bienes nacionales.

9. JUSTIFICACIÓN

La región hidrológica 18 perteneciente a la cuenca del Balsas es una de las más contaminadas a nivel nacional (CONAGUA, 2015), de acuerdo a la NOM- AA-159-SCF-2012 sus subcuencas se encuentran bajo una gran presión y su importancia ecológica es alta, por ello es importante contribuir al tratamiento de los vertidos líquidos, previo a su descarga en el río San Juan producto de las diversas actividades que se realizan en la granja didáctica “Dos Puertas”. La construcción, rehabilitación y mantenimiento de las plantas de tratamiento convencionales son de altos costos y necesitan de energía eléctrica y reactivos químicos para la operación, por lo que una opción viable son los humedales artificiales, biotecnología de bajo costo y fácil mantenimiento.

10. OBJETIVOS

10.1 General

10.1.1 Determinar la calidad del agua del río San Juan en el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos Puertas” para desarrollar una propuesta de diseño y construcción de humedales artificiales que permitan su depuración para reutilizarla en riego de áreas verdes.

10.2 Particular

10.2.1 Diseñar un plan de muestreo para monitorear la calidad del agua del sitio de vertido de la granja didáctica “Dos Puertas”, de acuerdo con lo establecido en las NMX-AA-014-1980 y la NMX-AA-003-1980.

10.2.2 Determinar la calidad del agua del sitio de vertido de la granja didáctica “Dos Puertas”, para comparar con límites máximos permisibles de las NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-002-SEMARNAT-1996, respectivamente.

10.2.3 Determinar la contaminación del río mediante el cálculo del Índice de Calidad del Agua (ICA) y los Criterios Ecológicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89) establecidos por CONAGUA, para obtener el porcentaje de agua pura.

10.2.4 Seleccionar los parámetros físicos, químicos o biológicos, que rebasen los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996, para usarlos como parámetro de diseño del humedal artificial de la granja didáctica “Dos Puertas”.

10.2.5 Determinar caudal, carga orgánica, carga hidráulica, tiempo de residencia hidráulica, porosidad del sustrato, temperatura del ambiente y pendiente del terreno, para la propuesta de dimensionamiento en el diseño y construcción del humedal.

11. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

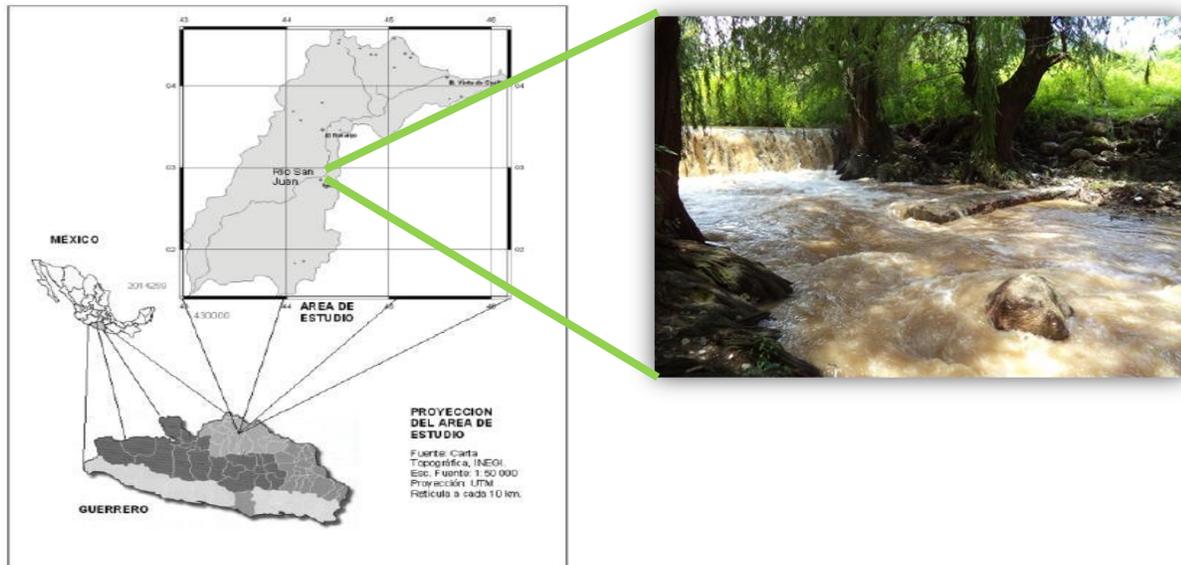


Figura 4. Ubicación del Río San Juan Taxco El Viejo, Guerrero (Almazán, 2004)

11.1 Ubicación

La localidad de Taxco El Viejo se localiza al norte del municipio de Taxco de Alarcón a 1,302 msnm, y se encuentra en las coordenadas $18^{\circ} 29' 08''$ LN y $99^{\circ} 35' 04''$ de LO sus colindancias son: Al norte con los Municipios de Tetipac y Pilcaya y el estado de Morelos, al este con el Estado de Morelos y el Municipio de Buenavista de Cuellar, al sur con los Municipios de Buenavista de Cuellar, Iguala de la Independencia, Teloloapan e Ixcateopan de Cuauhtémoc, al oeste con los Municipios de Ixcateopan de Cuauhtémoc; Pedro de Ascencio Alquisiras y Tetipac.

11.2 Hidrografía

Granados, San Juan, Plan de Campos, Las Huertas y Acatlán y los cuerpos de agua Laguna Grande, que es intermitente a lo largo del año, y la presa San Marcos sobre el arroyo Landa, se une posteriormente al sur de Taxco el Viejo (INEGI, 2009).

11.3 Clima

Rango de temperatura 12 – 26°C, rango de precipitación 800 – 1 500 mm. Clima Templado subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (26.42%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (25.45%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de menor humedad (20.86%), cálido subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (15.93%), semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (11.27%) y semicálido subhúmedo con lluvias en verano, de mayor humedad (0.07%) (INEGI, 2009).

11.4 Geología

Cretácico (57.75%), N/D (19.77%), Paleógeno (16.79%), Neógeno (2.65%) y Cuaternario (0.41%) Roca Metamórfica: meta sedimentaria (14.6%) y metavolcánica (5.18%) Ígnea extrusiva: toba ácida (12.91%), brecha volcánica básica (0.3%) y basalto (0.1%) sedimentaria: caliza (47.18%), lutita arenisca (10.56%), conglomerado (3.89%) y arenisca-conglomerado (2.65%) minería: plata, mercurio, plomo y zinc (INEGI, 2009).

11.5 Uso del suelo y vegetación

Agricultura (31.11%), zona urbana (2.63%), bosque (35.35%), selva (24.09%) y pastizal (6.82%) (INEGI, 2009).

La vegetación que cubre y predomina en el municipio de Taxco de Alarcón, guerrero es principalmente la selva baja caducifolia, caracterizada por el cambio de follaje en la temporada de secas. Se tienen registrados:

Guamúchil (*Pithecellobium dulce*), tepehuaje (*Lysilomaacapulcensis*), ceiba (*Ceiba pentandra*), sabino (*Taxodium huegelii*), casahuate (*Ipomoea arborea*), vara dulce, (*Eysenhardtia polystachya*), mezquite (*Prosopis glandulosa*), espino blanco (*Crataegus oxyacantha*), guacima (*Guazuma ulmifolia*), copal (*B. copallifera*), copaljiote (*Pseudosmodium perniciosum*) cubata (*Acacia cochliacantha*), palo amarillo (*Phyllostylon rhamnoides*), chapulixtle (*Dodonaea viscosa*), huizache (*Acacia farnesiana*), amates (*Ficus insípida*); además de especies de pastizal: navajita (*Bouteloua gracilis*), zacate (*Buchloedactyloides*) y zacatón (*Muhlenbergia macroura*); plantas medicinales:

cuachalalate (*Amphipterygium adstringens*), parota (*Enterolobium cyclocarpum*), prodigiosa (*Kalanchoe pinnata*), timbre (*Acacia angustissima*), jarilla (*Larrea cuneifolia*) y margarita (*Bellis perennis*) (INEGI, 2009).

11.6 Fauna

Con relación a la fauna aún subsisten variadas y delicadas especies como: Venado (*Odocoileus virginianus*), águila (*Aquila chrysaetos*), gavilán (*Accipiter nisus*), iguana (*Iguana iguana*), conejo (*Oryctolagus cuniculus*), tejón (*Meles meles*), mapache (*Procyon lotor*), víbora de cascabel (*Crotalus*), lagartija (*Psammotromus hispanicus*), rata (*Rattus norvegicus*), alacrán (*Centruroides elegans*), paloma (*Columba livia*), zopilote (*Coragyps atratus*), armadillo (*Dasypus novemcinctus*), tórtola (*Streptopelia turtur*) (INEGI, 2009).

11.7 Indicadores económicos

De acuerdo con cifras al año 2000 presentadas por el INEGI, la población económicamente activa del municipio se presentaba en el sector primario (agricultura y ganadería) de 7.62%, secundario (minería, industria manufacturera, petróleo, construcción y electricidad) 46.87%, terciario (comercio, turismo y servicios) 43.91% y otros 1.60% (INAFED, 2015).

Los indicadores muestran que la agricultura en Taxco dispone con una superficie de uso agrícola que representa el 31.11% del total municipal. En la localidad de Taxco El Viejo destaca la producción de maíz, cacahuate, estropajo, frijol y tomate (PMD 2012-2015).

La compañía industrial más importante que existe en el municipio es la Industrial Minera México S.A., que se encarga de la extracción de los minerales (INAFED, 2015).

La platería es la artesanía representativa de Taxco El Viejo. En la localidad también se utiliza la palma para tejer monederos, bolsas, petacas, belices y juguetes, pigmentándolas para darle mayor colorido (PMD 2012-2015).

12. METODOLOGÍA

12.1 Gabinete

Se consultó diferente cartografía a una escala de 1:250000 del estado de Guerrero, y la localidad de Taxco “El Viejo” en el municipio de Taxco de Alarcón. Entre las cartas que se consultaron destacan las de: geología, hidrología, vegetación, suelo, demografía, actividades económicas, entre otros. Se revisaron fuentes relacionadas a los antecedentes correspondientes con las actividades productivas, entre ellas la minera, así como sus consecuencias al paso del tiempo en la región. También se buscó información bibliográfica sobre humedales artificiales, tanto los parámetros que deben de tomarse en cuenta para el diseño y construcción, así como los diferentes tipos que existen según la composición de las aguas a las que serán aplicados.

Las muestras colectadas en campo se registraron en una cadena de custodia, para preservar su integridad y asegurar un buen plan de muestreo. Además, que permitió llevar un orden de los materiales y reactivos, todo ello para realizar de manera correcta los parámetros en campo y laboratorio.

Para la propuesta de diseño y construcción del humedal artificial, se utilizaron las siguientes fórmulas y se tomaron en cuenta diversos parámetros para la elección de aquel que favorezca la calidad el agua esperada de acuerdo al área proporcionada de acuerdo a:

Carga orgánica

$$Ch = DE - 0.192DA / 0.097$$

Dónde:

Ch= carga hidráulica (en cm/día)

DA= DQO del afluente (en mg/L)

DE= DQO del efluente (en mg/L)

(Seoáñez, 1999)

Tiempo de Residencia Hidráulica

$$THR = V/Q$$

Dónde:

$$Q = m^3 \text{ Día}^{-1} V = \text{volumen real}$$

(Seoáñez, 1999)

Área superficial del humedal

Por habitante

$$As = Qt/nd$$

Dónde:

$$Q = \text{caudal } t = \text{tiempo } n = \text{porosidad } d = \text{profundidad}$$

Parámetro de diseño N

$$As = Q (\ln Ca - \ln Ce) / kt y n$$

Dónde:

$$Q = \text{caudal } \ln Ca = \text{concentración de N en el afluente mg/L}$$

$$\ln Ce = \text{concentración de N en el efluente mg/L } Kt = \text{Constante de reacción}$$

$$y = \text{profundidad } n = \text{porosidad}$$

(Sherwood, 1998)

Parámetro de diseño DBO₅ y DQO

$$As = Q \ln (Ce/Ca) / kt h n$$

Q= caudal In Ca= concentración de N en el afluente mg/L

In Ce= concentración de N en el efluente mg/L Kt= Constante de reacción

h= profundidad n= porosidad

Constante de reacción Kt= 1.104 x 1.06 (t- 20)

(Sherwood, 1998)

Índice de Calidad del Agua (ICA)

$$ICA = \frac{\sum_{i=1}^n I_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Dónde:

li= Índice de calidad para el parámetro i

Wi= Coeficiente de ponderación del parámetro i

N= Número total de parámetros

(CONAGUA, 2010)

12.2 Campo

Se realizó el muestreo en el cuerpo receptor de acuerdo con lo establecido en la NMX-AA-014-1980, con el fin de determinar sus características físicas, químicas y bacteriológicas. Se realizaron siete muestreos compuestos de 24 horas correspondientes a los meses de septiembre, octubre y noviembre 2014 marzo, agosto, octubre y noviembre 2015. Se calculó el caudal medio de la descarga y durante la temporada de lluvias y secas se recolectaron muestras simples para conformar tres muestras compuestas, en diferentes horas para una mejor representación del caudal, se conservaron para su transporte a 4 °C.

Para medir el caudal del río San Juan en el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos Puertas”, se ocuparon las NOM-001-SEMARNAT-1996. A partir de ello se calcularon los volúmenes de muestras simples para obtener las muestras compuestas, que representen adecuadamente cada uno de los caudales. El uso de dicha norma permitió diseñar un adecuado plan de muestreo.

El volumen de cada muestra simple para formar la muestra compuesta, se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$VMSi = VMC \times (Qi / Qt)$$

Dónde:

VMSi = volumen de cada una de las muestras simples “i”, litros.

VMC = volumen de la muestra compuesta necesario para realizar la totalidad de los análisis de laboratorio requeridos, litros.

Qi = caudal medido en la descarga en el momento de tomar la muestra simple, litros por segundo.

Qt = Qi hasta Qn, litros por segundo.

(NOM-001-ECOL-1996)

En campo se determinaron los siguientes parámetros de acuerdo a su respectiva NOM.

Parámetro	Norma Oficial Mexicana	Conservador
DBO ₅	NMX-AA-028-SCFI-2001	Sin conservador
Oxígeno Disuelto	NMX-AA-012-SCFI- 2001	Sin conservador
Coliformes fecales	NMX-AA-042-SCFI-2015	Tiosulfato de sodio
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011	Sin conservador
Temperatura	NMX-AA-007-SCFI-2000	Sin conservador

Cuadro 3. Parámetros que se determinaron en campo

12.3 Laboratorio

Para evaluar la calidad del agua se determinaron los siguientes parámetros:

Parámetro	Norma analítica	Método
DQO	APHA, 1992	Espectrofotométrico
Coliformes fecales y totales	NMX-AA-042-SCFI-2015	Número Más Probable (NMP)
Fósforo orto e hidrosoluble	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008	Espectrofotométrico de molibdato de amonio
Fósforo total	PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008	Espectrofotométrico de molibdato de amonio
Nitratos	Blancas A. 2011. Manual de análisis de aguas naturales y su aplicación a microescala	Ácido fenoldisulfónico
Nitritos	Blancas A. 2011. Manual de análisis de aguas naturales y su aplicación a microescala.	Ácido sulfanílico
Nitrógeno amoniacal y orgánico	NMX-AA-026-SCFI-2010	Kjeldahl
SAAM	NMX-AA-039-SCFI-2001	Espectrofotométrico
Sólidos volátiles y totales	NMX-AA-034-SCFI-2001	Gravimétrico
Sólidos sedimentables	NMX-AA-004-SCFI-2013	Volumétrico
Sólidos suspendidos	NMX-AA-034-SCFI-2001	Gravimétrico
Grasas y aceites	NMX-AA-005-SCFI-2000	Gravimétrico
Metales pesados	APHA, 1992	Absorción atómica

Cuadro 4. Parámetros que se determinaron en laboratorio

13. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Durante los meses septiembre, octubre y noviembre concentraciones de DBO_5 fueron de 142, 113 y 129 mg L^{-1} respectivamente, dichos valores se encuentran dentro de los LMP de la NOM-001-SEMARNAT-1996, que establece valores entre 75-150 mg L^{-1} (uso público y riego agrícola), sin embargo, para los meses de marzo, agosto, octubre y noviembre del año 2015, los resultados obtenidos sobre pasan el LMP arrojando concentraciones de 172, 344, 210 y 240 mg L^{-1} respectivamente por lo que no se recomienda el reusó de este tipo de aguas.

Para octubre de 2014 la DBO_5 es de 113 mg L^{-1} , valor que se encuentra dentro del límite establecido por el ICA que es de 120 mg L^{-1} , para los demás meses se considera que son aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales. Los valores obtenidos fueron 142 y 129 mg L^{-1} para septiembre y noviembre 2014. En el 2015 se obtuvieron 172 , 344 , 210 y 240 mg L^{-1} para marzo, agosto, octubre y noviembre respectivamente teniendo un agua fuertemente contaminada.

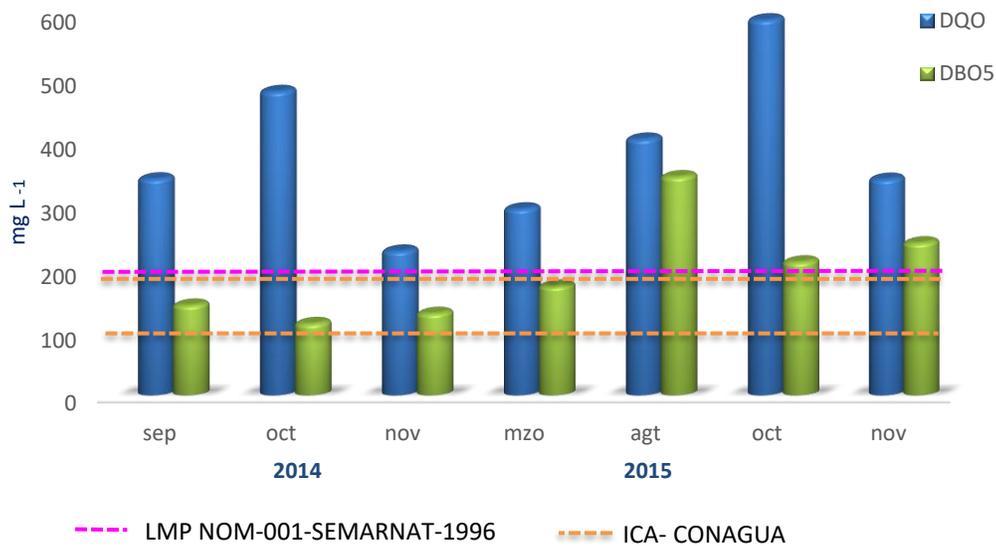


Figura 5. Comportamiento de DQO – DBO₅

Los valores obtenidos DQO durante los meses de muestreo fueron de 340.54 , 478.01 y $227.027 \text{ mg L}^{-1}$ septiembre, octubre y noviembre de 2014. Para marzo, agosto, octubre y noviembre del 2015 los valores obtenidos fueron 293.4 , 403.1 , 590.6 y 340 mg L^{-1} , de acuerdo con lo establecido en el ICA muestreos con valores mayores a 200 mg L^{-1} se consideran aguas fuertemente contaminadas, con gran impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales (figura 5) (CONAGUA, 2013).

El río San Juan muestra una diferencia importante en el comportamiento de DBO_5 y DQO en los dos años de muestreo esto se puede atribuir a una reducción de oxígeno disuelto en el sistema. El comportamiento muestra que la contaminación del cuerpo superficial es debido a la presencia principalmente de compuestos inorgánicos, a diferencia de aguas residuales urbanas donde los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en equilibrio (Sánchez, 2011). El aumento considerable en el mes de octubre para ambos años 2014 y 2015, se puede atribuir a una mayor actividad artesanal ya que en este río son vertidas las aguas de la cabecera municipal y el centro de Taxco, arrastrando compuestos que aumenten la parte inorgánica del sistema, o bien resultado de la fuerte actividad minera que se ha realizado durante años en este lugar. La materia orgánica que ingresa al cuerpo receptor y que aporta la granja didáctica no es elevada, se estabiliza lentamente, debido que la corriente de agua se desoxigena con rapidez y no hay fuente de oxígeno que lo reemplace, dando lugar a condiciones anaerobias.

De acuerdo con Cartró (2003; citado en Delgadillo *et al.*, 2010) el agua generalmente tiene una concentración de OD de 8 mg L^{-1} , y el recomendado por la EPA en los ríos es de 5 mg L^{-1} . Los valores obtenidos fueron de 4.2, 3.54 y 3.09 mg L^{-1} para los meses de septiembre, octubre y noviembre de 2014, en el año 2015 de 4.65, 3.58, 3.52 y 3.9 mg L^{-1} para marzo, agosto, octubre y noviembre respectivamente.

Los resultados obtenidos durante el tiempo de muestreo se encuentran por debajo de los niveles óptimos, sin embargo, esto no es una limitante para llevar a cabo procesos de oxidación, las reacciones dentro del sistema se llevan a cabo más lentamente y para acelerarlas se necesita de un mayor aporte de este elemento, lo que favorece que se completen los ciclos biogeoquímicos. En la figura 6 se observa que el comportamiento del oxígeno durante los meses de muestreo va disminuyendo esto puede deberse al curso más lento del río San Juan reduciendo la aireación por turbulencia lo que favorece la acumulación de sedimentos y materia orgánica agotando el oxígeno existente.

La presencia de carga orgánica en el cuerpo receptor requiere grandes cantidades de oxígeno para su degradación que utilizan las bacterias en reacciones oxidativas. Ante una elevada carga de residuos, los procesos anaerobios sustituyen a los aerobios, que dan origen a las sustancias inestables tales como los ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas, metanos, sulfuro de hidrogeno etc., obteniéndose una corriente maloliente (característica

observada en el mes de septiembre y noviembre) que se considera totalmente contaminada. En el mes de marzo se obtuvo 4.65 mg L^{-1} este ligero aumento en el oxígeno se puede atribuir a que se presentaron lluvias atípicas incorporando oxígeno al cuerpo de agua.

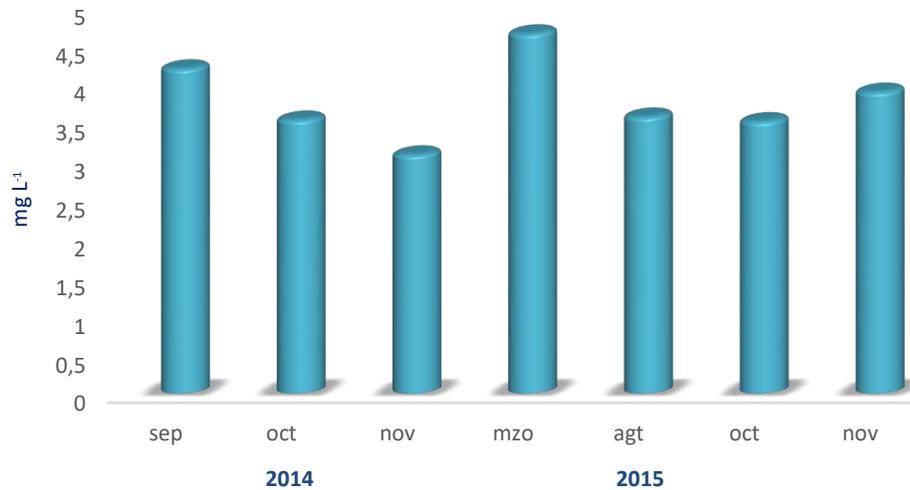


Figura 6. Comportamiento de oxígeno disuelto

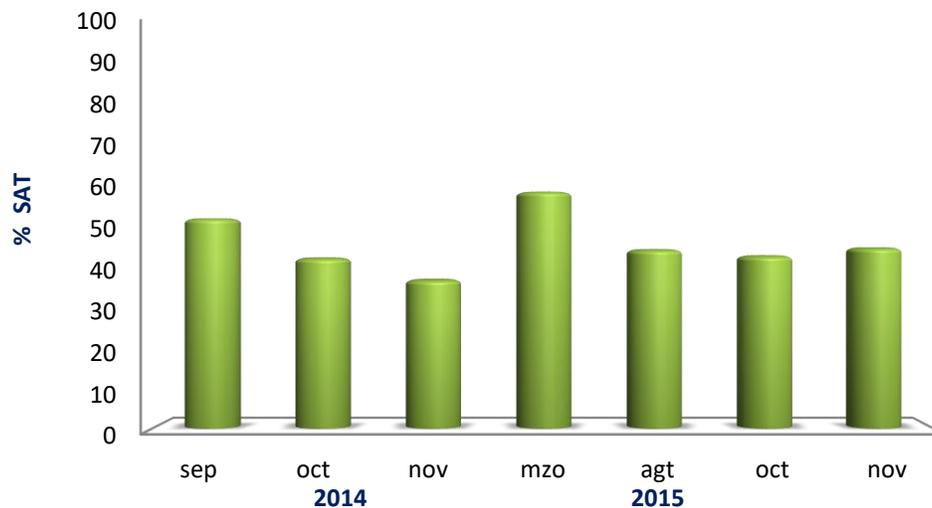


Figura 7. Porcentaje de Saturación de Oxígeno en el agua

La concentración de oxígeno disuelto se puede expresar también en términos del porcentaje de saturación en el agua (figura7), por lo cual dicho parámetro es utilizado a menudo para describir cualitativamente la calidad de cuerpos de agua, siempre y cuando no estén presentes compuestos tóxicos como metales pesados y pesticidas.

El porcentaje de saturación depende de parámetros como la temperatura y la presión atmosférica del cuerpo de agua, se considera que el agua esta sobresaturada si el porcentaje de O₂ es mayor a 100% (Roldan- Ramírez *et. al* 2008), en el Rio San Juan de acuerdo a los resultados obtenidos, el sistema no se considera sobresaturado, puesto que en ninguno de los meses de muestro para ambos años rebasó el 60%.

La temperatura en el agua es importante debido a que esta influye en la solubilidad de sales y gases y en general a todas sus propiedades, tanto químicas como a su comportamiento microbiológico, procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración (figura 8).



Figura 8. Comportamiento de temperatura

Las reacciones enzimáticas, ciertas oxidaciones y la degradación de materia orgánica suelen ser más rápidas o más lentas, mostrando una dependencia hacia este factor. Los valores obtenidos de temperatura durante los meses de muestreo fueron de 24.2, 22.2 y 23.3 °C para los meses de septiembre, octubre y noviembre 2014. En marzo, agosto, octubre y noviembre del 2015 los valores obtenidos fueron 25.1, 24.3, 23.8 y 20.2°C

respectivamente. Estos valores que no impiden que se lleven a cabo las reacciones químicas como la nitrificación, oxígeno disuelto y degradación de materia orgánica por acción bacteriana (Gilón, 2014).

El pH de los sistemas naturales y artificiales, así como el agua residual doméstica, en general, es ligeramente alcalino por la presencia de bicarbonatos, carbonatos y metales alcalinos (Jiménez, 2000). Los resultados para El río San Juan en el sitio de vertido de la granja didáctica registraron valores de pH de 8.39, 8.33 y 8.11 para los meses de septiembre, octubre y noviembre 2014. Para el 2015 los valores fueron 7.9, 8.42, 7.6 y 8.15 en los meses de marzo, agosto, octubre y noviembre, respectivamente. Estos valores indican que el agua es ligeramente alcalina y las cifras se encuentran dentro de los LMP (5.0 - 10) señalados en la NOM-001-ECOL-1996 y en los CE-CCA-001/89 que establecen un intervalo de 4.5-9 para riego agrícola (figura 9). Cuando el pH es básico, algunos iones metálicos precipitan como carbonatos e hidróxidos; si el pH es inferior a 6, el agua residual tiende a ser corrosiva, como resultado del exceso de iones hidrógeno. Además, los microorganismos presentan una tolerancia muy pequeña en cuanto a variaciones en el pH, si se rebasan los límites comienza a existir una dificultad para degradar la materia orgánica y por ende el cuerpo acuático pierde la capacidad de autodepurarse (Delgadillo *et al.*, 2010). La importancia de vigilar el pH se debe a su variación determinada de disponibilidad de los nutrientes, afectando mecanismos de adsorción y la especiación de los metales en el suelo.



Figura 9. Comportamiento de pH

El nitrógeno en las aguas residuales urbanas se encuentra fundamentalmente en forma de amoníaco y también como nitrógeno orgánico, no suele ser habitual encontrar concentraciones importantes de nitratos y nitritos. El proceso nitrificación es influenciado por la temperatura, pH, concentraciones de oxígeno disuelto y nitrógeno amoniacal (figura 10). La temperatura ideal para su desarrollo está entre los 30 – 40 °C, bajas temperaturas disminuyen la velocidad de reacción siendo el valor mínimo para que la nitrificación ocurra 4°C. El rango de pH óptimo para la nitrificación está entre 7,5 y 8,6 unidades y aproximadamente se requieren 4,3 mg L⁻¹ de oxígeno para oxidar hasta nitratos 1 mg L⁻¹ de nitrógeno amoniacal (Paredes y Kusch, 2001).



Figura 10. Comportamiento de nitrógeno

El nitrógeno amoniacal presente en el Río San Juan es de 4.7, 1.7 y de 1.6 mg L⁻¹ respectivamente durante los meses del año 2014, los valores para el 2015 fueron 1.3, 1.6, 2.9 y 1.6 mg L⁻¹ (figura 10), lo que refiere una concentración menor a la esperada en aguas residuales la cual es de 12 mg L⁻¹ (Sánchez, 2011), lo que indica que el problema no solo es por nitrógeno sino también algunos otros compuestos que pueden ser de origen industrial. La cantidad de nitritos en el sistema fue de 0.002, 0.00089 y 0.0024 mg L⁻¹ en el

año 2014, para 2015 se obtuvieron concentraciones de 0.00082, 0.000156, 0.00486 y 0.00001 mg L⁻¹ respectivamente.

En cuanto a nitratos se tienen concentraciones de 0.108, 0.00017 y 0.00059 mg L⁻¹ para el año 2014, en los meses de 2015 los resultados del muestreo fueron 0.00041, 0.00059, 0.011 y 0.0462 mg L⁻¹ para marzo, agosto, octubre y noviembre respectivamente, ninguno de los resultados anteriores rebasa el límite establecido por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

De acuerdo a los valores de pH el proceso de nitrificación en el sistema se lleva a cabo adecuadamente pues no rebasan el límite superior que es de 8.6. En cuanto a la temperatura, no es un factor que limite determinadamente el proceso, sólo hace que se lleve de manera más lenta. Sin embargo, el oxígeno del sistema si es la principal limitante para el proceso.

Durante septiembre el (OD) fue de 4.2 mg L⁻¹ y la concentración de NH₃ de 4.7 mg L⁻¹ fueron los óptimos para que los nitritos se oxidaran a nitratos, siendo estas formas las asimilables por las plantas y así completar el ciclo. Pero durante los meses de octubre y noviembre en ambos años se ve una disminución de oxígeno limitando la actividad bacteriana volviendo más lento el proceso para completar el ciclo biogeoquímico (figura 11).

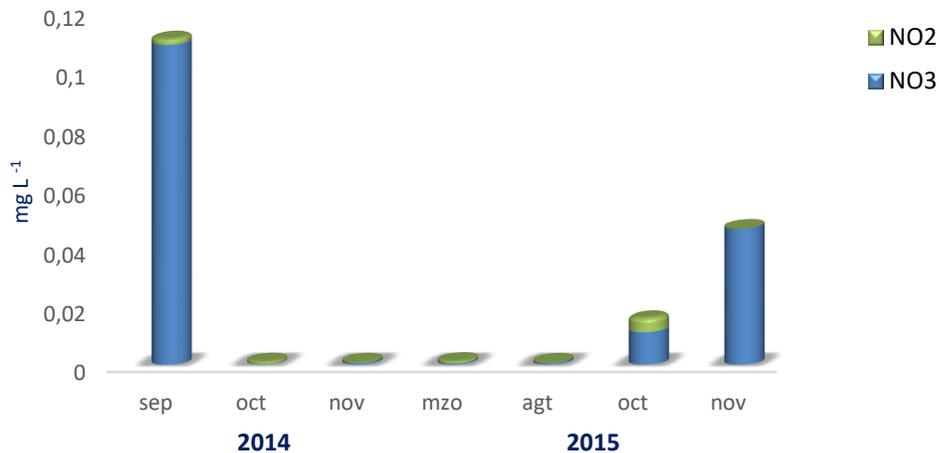


Figura 11. Comportamiento de nitritos y nitratos

Generalmente, las bacterias coliformes se encuentran en mayor abundancia en la capa superficial del agua o en los sedimentos del fondo (Munn, 2004). La contaminación fecal ha sido y sigue siendo el principal riesgo sanitario en el agua, ya que supone la incorporación de microorganismos patógenos que pueden provocar enfermedades en la salud humana. Por ello, el control sanitario de riesgos microbiológicos es tan importante, y constituye una medida sanitaria básica para mantener un grado de salud adecuado en la población (Marín *et al.*, 2004). Concentraciones mayores a 1 000 NMP/100 mg L⁻¹ de coliformes fecales promedio, es el LMP-NOM-001-SEMARNAT-1996 por lo que estas aguas ya no se consideran como cuerpo de agua fuente de abastecimiento de agua potable o para que el líquido sea utilizado en servicios al público con contacto indirecto u ocasional (CONAGUA, 2010).

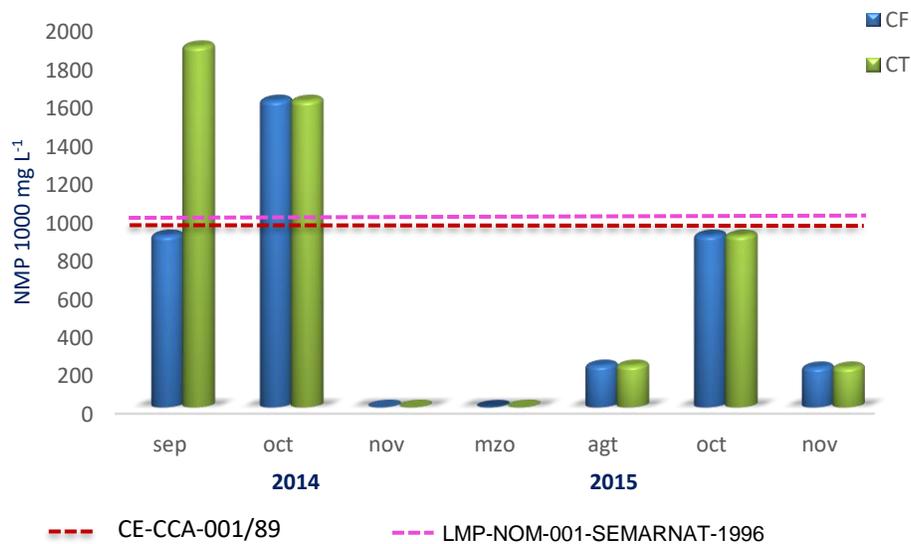


Figura 12. Coliformes totales y fecales

La presencia de bacterias coliformes totales y fecales durante los meses de septiembre y octubre del año 2014 fue mayor a los 1600 NMP/100mL sobrepasando el límite de 1000 NMP/100mL de los CE-CCA-001/89 y los LMP-NOM-001-SEMARNAT-996, el comportamiento de este aumento se atribuye a la influencia por las lluvias, aumentando la corriente, generando turbulencia que remueve los sedimentos que precipitan en meses anteriores junto con las bacterias, lo que hace que se encuentren en mayor proporción

dentro del sistema en esas temporadas, se observa una drástica disminución para el mes de noviembre del 2014 y marzo de 2015 a sólo 2 NMP/100mL, donde las condiciones del medio pasaron de ser oxidantes a reductoras y el caudal del río San Juan disminuyó notoriamente (figura 12). Aunado a esto la temperatura y la carga orgánica dan las condiciones óptimas para el desarrollo de la actividad bacteriana. En agosto y noviembre del 2015 se mantienen dentro del rango establecido y para octubre se ve un aumento, pero sin sobrepasar el límite.

Los fosfatos provienen principalmente de compuestos que se aplican como fertilizantes en las zonas agrícolas y de los detergentes que se emplean en actividades de limpieza, también se generan por la materia orgánica en descomposición. Aun cuando no se consideran tóxicos para los humanos y los animales, pueden tener efectos negativos indirectos a través de la eutrofización de los cuerpos de agua superficial lo que implica el posterior abatimiento de oxígeno.

Cuando se descargan aguas con alta concentración de DBO_5 a un cuerpo de agua, las bacterias y otros microorganismos disponen de una fuente rica en alimentos lo que permite que se reproduzcan con rapidez.

En la (figura 13) se observa las diferentes formas de fósforo, donde el ortosoluble se encuentra en muy pequeñas cantidades de 0.041, 0.034 y 0.012 mg L^{-1} para el mes de septiembre, octubre y noviembre 2014, para marzo, agosto, octubre y noviembre de 2015 los resultados fueron 0.019, 0.021, 0.029 y 0.009 mg L^{-1} , respectivamente.

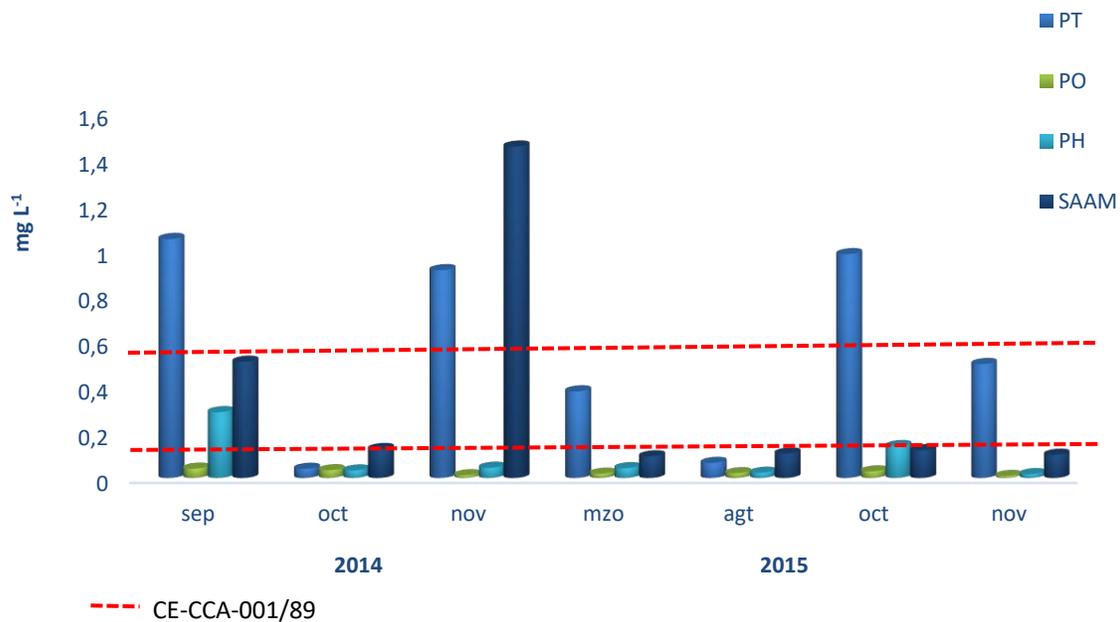


Figura 13. Comportamiento de los tipos de fósforo y SAAM

El fósforo activo en forma de ortofosfato es principalmente absorbido por las plantas y en menor parte por los suelos, el fósforo insoluble bajo ciertas condiciones precipita o se transforma en soluble. Sin embargo, los procesos de absorción como de almacenamiento de fósforo en la biomasa son saturable, por lo que se tiene una capacidad finita de eliminación (ShubaiWu *et al*, 2012). En los resultados de la determinación analítica se puede observar que la forma asimilable para las plantas es muy escasa y que predominan las formas insolubles que pueden estar precipitando por intercambio de cationes. El fósforo orgánico absorbido está relacionado con la cantidad de minerales (Al, Fe o cal), la precipitación ocurre cuando los iones de fosfato reaccionan con los cationes de algunos metales, formando sólidos amorfos o cristalinos, estas reacciones ocurren para altas concentraciones de fosfato o metales. La NOM-001-SEMARNAT-1996 indica que los valores máximos permitidos de PT son de 5 mg L⁻¹, como promedio mensual y de 10 mg L⁻¹ como promedio diario, susceptibles de ser descargados en ríos, destinados a la protección de la vida acuática y en embalses naturales y artificiales para uso público urbano. De acuerdo con nuestros datos ninguno rebasa dicha norma.

La concentración de fósforo total en el mes de octubre de 2014 es menor a la que se obtuvo en octubre de 2015, esto se puede atribuir a que no se está precipitando el fósforo, así

como a la disminución de microorganismos que toman parte de este elemento para incorporarlo a sus células.

En cuanto a SAAM los valores para los meses de septiembre y noviembre de 2014 muestran un aumento superando los 0.5 mg L^{-1} establecidos en los CE-CCA-001/89, provocando la formación de espumas a causa de la alta concentración de detergentes, esto se atribuye a la disminución de microorganismos y al abatimiento de oxígeno, ya que al ser compuestos orgánicos requieren de estos dos elementos para poder ser biodegradados y convertirse en cadenas simples. En las aguas, la concentración de tensoactivos suele ser inferior a 0.1 mg L^{-1} , pero, si esta fuera mayor de 0.5 mg L^{-1} existe el riesgo de toxicidad del agua. Las sustancias tensoactivas son incorporadas a la corriente del río principalmente por las descargas de agua residual que por la descarga industrial.

Los resultados obtenidos en los diferentes tipos de sólidos no rebasan los 50 mg L^{-1} para uso agrícola nivel máximo determinado por CE-CCA-001/89, del mismo modo no sobrepasan el LMP de 200 mg L^{-1} en sólidos suspendidos totales que establece la NOM-001-SEMARNAT-1996. En comparación con los criterios propuestos por los indicadores de calidad del agua, todos se encuentran menores a 25 mg L^{-1} por lo que se considera como agua de excelente calidad para este parámetro.

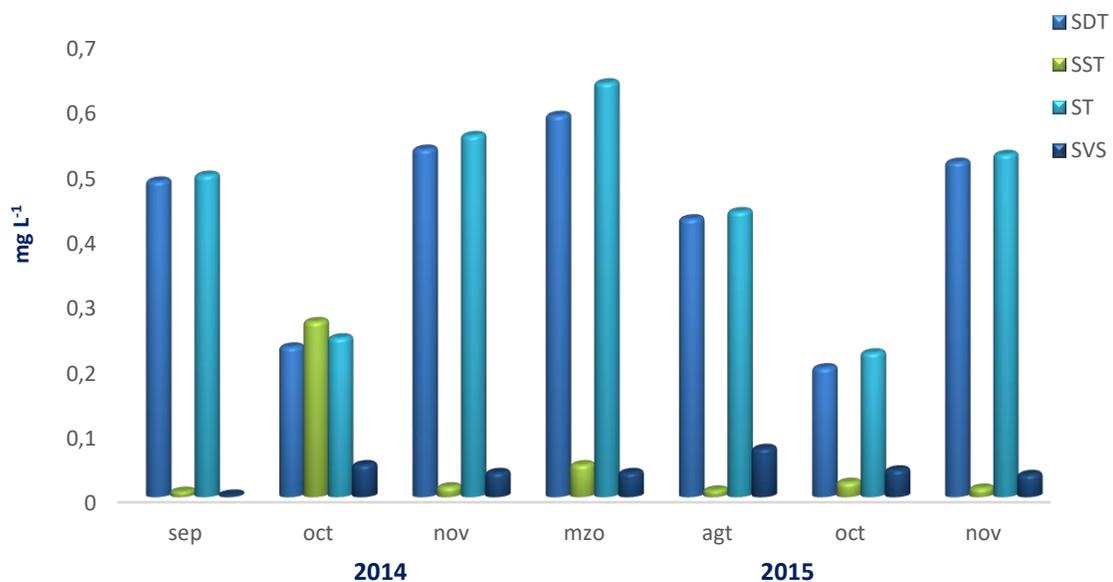


Figura 14. Comportamiento de las diferentes formas de sólidos

En marzo del 2015 se registró la concentración más alta de ST y SDT, sin que el sistema se vea afectado por este ligero aumento. Los sólidos pueden afectar adversamente la calidad de un cuerpo de agua o un efluente de varias formas, también son importantes como indicadores de la efectividad de tratamientos biológicos y físicos, sin embargo, el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos puertas” no presenta irregularidades por la presencia de los diferentes sólidos.

Las grasas y aceites son compuestos orgánicos, constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal y vegetal, así como los hidrocarburos del petróleo, se clasifican teniendo en cuenta su origen, pueden ser animales o vegetales. En la calidad del agua residual, se considera que la concentración de grasas es baja cuando son igual o menores a 50 mg L^{-1} y alta cuando son mayores a este valor, debido a que no permiten el libre paso del oxígeno hacia el agua, ni la salida del CO_2 del agua hacia la atmósfera; en casos extremos pueden llegar a producir la acidificación del agua junto con bajos niveles del oxígeno disuelto, además de interferir con la penetración de la luz solar (Marín, 2013). Como se puede observar en la figura 14, las concentraciones durante los meses de muestreo de 2014 y 2015 no rebasan los valores establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-002-SEMARNAT-1996 que son 25 mg L^{-1} y 50 mg L^{-1} respectivamente, indicando que este parámetro no representa un problema dentro del sistema y por lo tanto no limita la oxigenación del sistema y la incidencia de luz para llevar a cabo procesos fotosintéticos (figura 15).

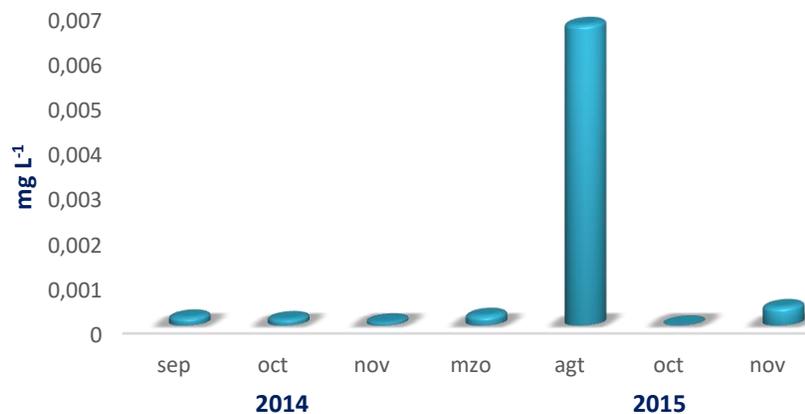


Figura 15. Comportamiento de grasas y aceites

13.1 Índice de Calidad del agua (ICA)

Una herramienta para monitorear el deterioro de las fuentes de abastecimiento de agua y que brinda un panorama del estado ecológico y biológico del medio ambiente son los ICA; los cuales indican el grado de contaminación del agua y están expresados como porcentaje de agua pura, es decir, si el valor del índice se encuentra cercano al cero por ciento, significa que el agua se halla altamente contaminada; pero si por el contrario oscila entre valores cercanos al cien por ciento, significa que el fluido se encuentra en excelentes condiciones (Flores, 2014).

La valoración del agua tratada depende del uso que se le dé o el destino que tenga, por ello, la calidad del agua puede también ser definida simplemente como la aptitud del líquido para sostener varios usos o procesos. La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA,) recomienda el uso de los siguientes parámetros para establecer la calidad del agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) Demanda Química de Oxígeno (DQO) Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Para evaluar el ICA se tomaron en cuenta los siguientes parámetros: Demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, coliformes fecales, nitratos, fosforo total, solidos disueltos totales y pH.

Los resultados obtenidos a partir de la ponderación que se dio a los parámetros antes mencionados fueron 22.57 y 28.26 % para los meses de septiembre y octubre del año 2014. Para el año 2015 se obtuvieron 28.89, 22.84 y 28.52 de porcentaje de agua pura en agosto, octubre y noviembre respectivamente, al compararlos con el cuadro de rangos de clasificación se considera que el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos puertas” está fuertemente contaminado (figura 16).

Para el mes de noviembre 2014 se obtuvo 37.54 % de agua pura y para marzo del año 2015 el resultado fue de 43.5%, los valores indican que el agua del sitio de vertido está contaminada, esto se puede atribuir a que en esos meses se tiene registrado un aumento de caudal lo cual contribuyó a diluir los compuestos presentes, por las descargas residuales que se aportan al sitio.

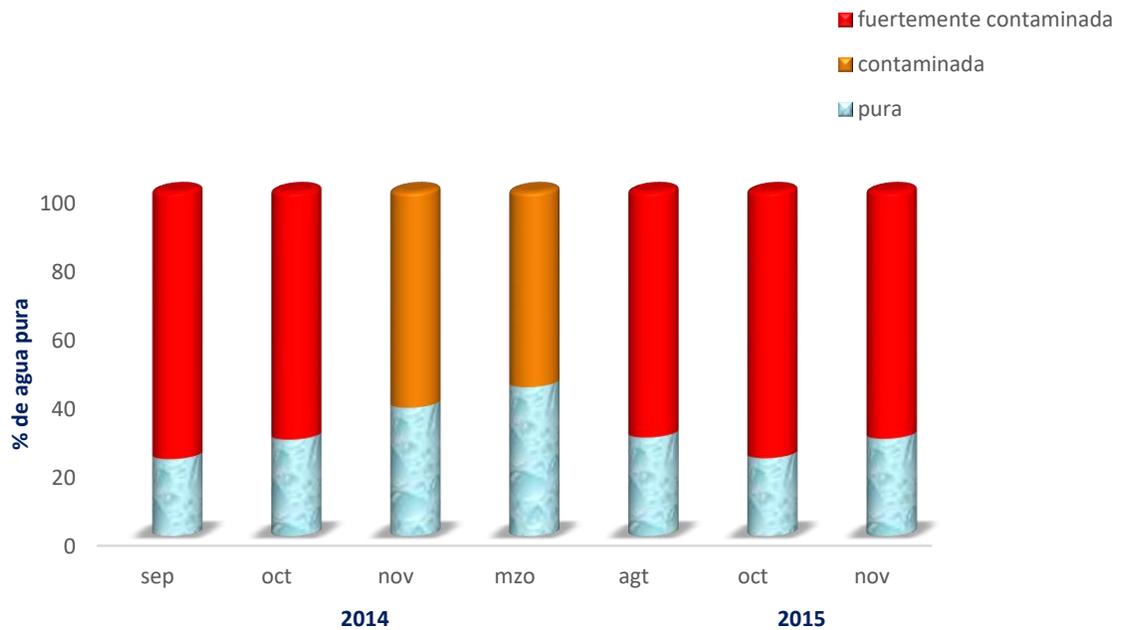


Figura 16. Porcentaje de agua pura durante los meses de muestreo

Promediando los resultados obtenidos durante los dos años de muestreo y comparando con el cuadro de rangos de clasificación del ICA, la calidad del río San Juan en el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos puertas” se considera contaminada. Dicho resultado se atribuye a los altos niveles de DQO, DBO₅ y coliformes; el incremento de estos parámetros refleja una reducción de oxígeno provocando que los procesos de biotransformación se observen limitados por este elemento.

CRÍTERIO GENERAL	ICA
Excelente	85-100
Aceptable	70-84
Poco contaminado	50-69
Contaminado	30-49
Fuertemente contaminado	0-29

Cuadro 5. Rangos de clasificación del ICA

13.2 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño y dimensionamiento fueron calculados a partir de los valores teóricos de DBO_5 para el humedal artificial que se construyó en la Granja Didáctica “Dos Puertas” los resultados fueron los siguientes:

Caudal (m ³ /día)	Porosidad (%)	Profundidad (m)	Pendiente (%)	Carga orgánica (mg L ⁻¹)	Carga hidráulica (cm/día)	Área superficial (m ²)	Tiempo de residencia (hr)
1.4	0.38	0.60	1	478	57.73	21	15.6

Cuadro 6. Resultados para el dimensionamiento del humedal artificial

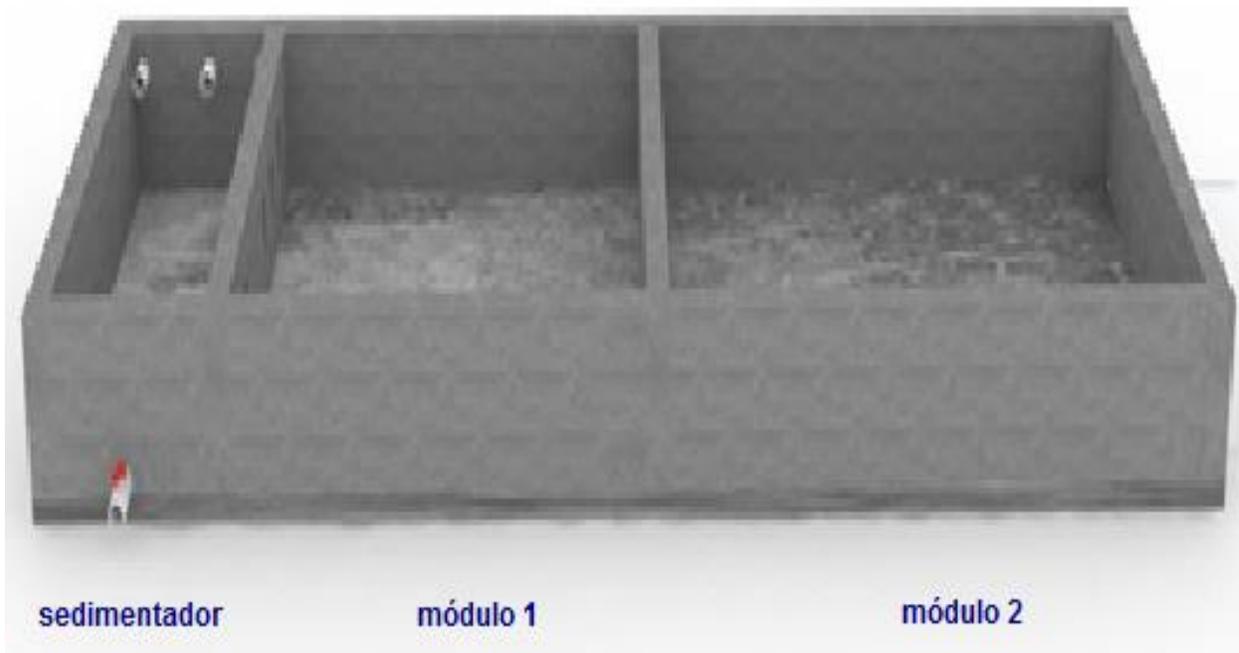


Figura 17. Diseño del humedal artificial

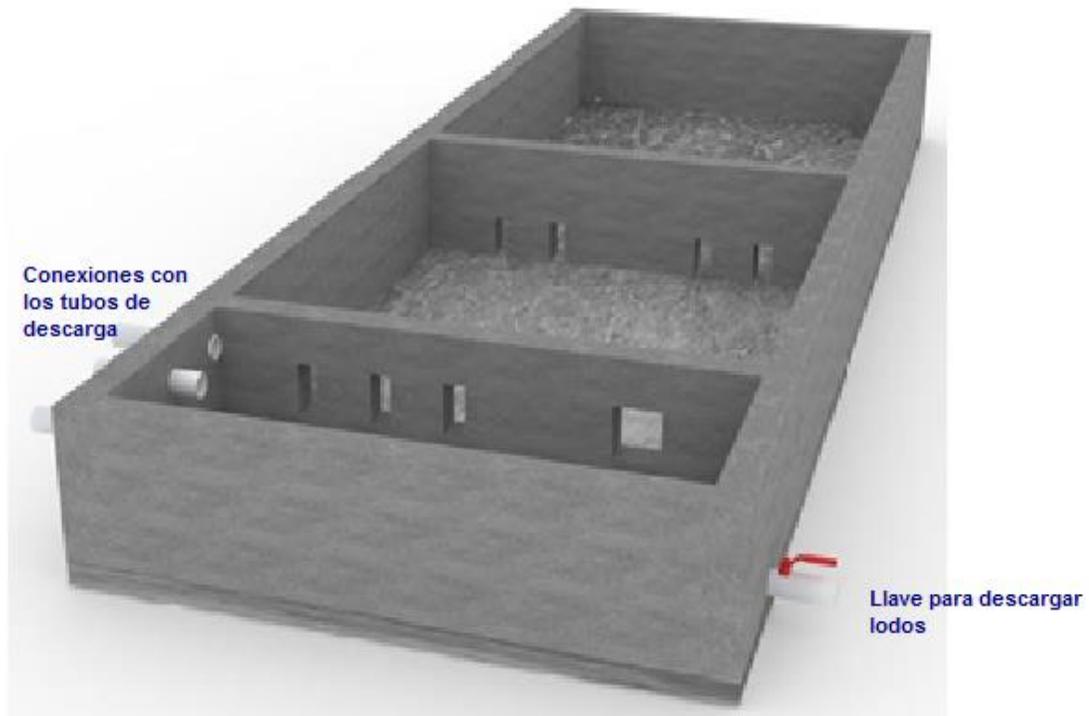


Figura 18. Conexiones y descargas del humedal artificial

13.3 Proceso de construcción



Durante este período se estableció y delimitó el área del proyecto la cual comprende 21m² definiendo el diseño del sistema, considerando las dimensiones para un sedimentador y dos módulos.



Para el diseño se consideraron cuatro aberturas entre el sedimentador y el primer módulo, otras cuatro aberturas entre el módulo uno y módulo dos, esto con el fin de regular la fluidez del líquido dentro del sistema. En el sedimentador se colocó una llave para descargar los lodos generados producto de la mineralización de la materia orgánica.



La imagen muestra la estructura del diseño (sedimentador y los dos módulos), además de las conexiones con los tubos de descarga.



En este periodo se procedió a limpiar el sistema, para poder introducir el sustrato (roca de río).



Se procedió a la construcción del humedal artificial, por lo que se contrató a personal para establecer la colocación del tabicón, impermeabilizante y el aplanado de la estructura del sistema.

Es importante destacar que se consideró una pendiente de 1% para favorecer el tiempo de residencia hidráulica del líquido y con ello garantizar una buena depuración para obtener la calidad esperada.



Se colocó el sustrato dentro del sistema, este tipo de material presenta las características físicas y químicas, así como el diámetro necesario para llevar a cabo los procesos dentro del humedal artificial.



Se rellenó el primer módulo con el sustrato seleccionado, el cual se dispersó de manera uniforme para posteriormente introducir la vegetación.



Se introdujeron totora (*Typha angustifolia*), hoja elegante (*Xanthosoma robustum*) en el primer módulo, esto como parte del proceso de aclimatación y establecimiento de la vegetación en el sistema.



Se cubrió provisionalmente el sedimentador con una lona de vinil, esto para monitorear el humedal artificial mientras se establece y madura el sistema, posteriormente el diseño contempla cubrir esa área, con tapa de cemento.



En este período se procedió a introducir el sustrato al módulo dos y a colocar las plantas, así como las llaves para regular el agua tratada.



Ramos M.A., Taxco El viejo Guerrero, 2015

La imagen muestra la introducción del sustrato en el sistema. También se puede observar que las plantas de uno de los módulos comienzan a establecerse.



Alvarado O. M., Taxco El Viejo Guerrero, 2015

Se introdujeron plantas en ambos módulos y se dio un ligero riego.



Alvarado O. M., Taxco El Viejo Guerrero, 2015

Las plantas comienzan a establecerse y se realizaron las últimas conexiones con los tubos de descarga.



En la imagen se aprecia el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial ya en funcionamiento.



14. CONCLUSIONES

- La calidad del agua del río San Juan en el sitio de vertido de la granja didáctica “Dos Puertas” es considerada como fuertemente contaminada del acuerdo al ICA.
- De acuerdo al plan de muestreo se obtuvo una muestra compuesta en cada salida al campo, partir de ellas se realizaron los análisis físicos, químicos y biológicos para obtener la calidad del agua del río San Juan.
- El porcentaje promedio de agua pura obtenido durante los meses de muestreo fue de 30.30.
- La DBO y DQO rebasan las concentraciones establecidas en NOM-001-SEMARNAT-1996 y el ICA.
- Los coliformes totales y fecales sobrepasan el LMP establecido en la NOM-001-SEMARNAT-1996 y los CE-CCA-001/89, en los meses de septiembre y octubre de 2014 y para el año 2015 en agosto y noviembre se rebasaron.
- Fósforo y SAAM sobrepasan los valores establecidos en los CE-CCA-001/89 en septiembre y noviembre 2014 y en marzo, octubre y noviembre del año 2015.
- El parámetro seleccionado para diseñar el humedal artificial fue DBO.
- Los resultados de los parámetros de dimensionamiento son: caudal de 1.4 m³/día, carga orgánica: 478 mg L⁻¹, carga hidráulica: 57.73 cm/día, tiempo de residencia hidráulica: 15.6 hr, porosidad del sustrato: 0.60, temperatura: 23.3 y pendiente: 1%.



15. REFERENCIAS

- Almazán J., González R., Urbán G., Tapia J., Villerías S., Beltrán E. y Almazán M., (2004). Diagnóstico ambiental y propuestas de ordenamiento para la Subcuenca del Río San Juan del estado de Guerrero. Serie Técnico Científica No. 17, UAG. Fundación Produce de Guerrero–SIBEJ. Chilpancingo, Guerrero, México. 180 p.
- APHA-AWWA-WPCF (1992). American Public Health Association - American Water Works Association - Water Pollution Control Federation. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. Ediciones Díaz de Santos, S. A. Madrid, España. 4:192-197.
- Aquastat is FAO's global water information system (2012). Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y medio rural de la FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/2012FAO-Aquastat>.
- Arias T. O., (2004). Estudio de la Biodegradación de la materia orgánica en humedales construidos de flujo subsuperficial. Tesis. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Blancas A.G., Constanzo C.E., Cervantes S.A., Gómez M.J., (2011). Manual de análisis de aguas naturales y su aplicación a microescala, UNAM.
- Comisión Nacional del Agua (2007). Estadísticas del Agua en México. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales Eds. Rodríguez, T. J., Jaimes, M. O. México, 263 pp.
- Comisión Nacional del Agua (2009). Estadísticas del Agua en México. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/.CONAGUA07/Noticias/intro_ma pas. pdf (15-07-2009). f. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Comisión Nacional del Agua (2010). Estadísticas del Agua en la cuenca del rio Balsas. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Estad%C3%ADsticas%20del%20Agua%20en%20la%20cuenca%20del%20R%C3%ADO%20Balsas,%202010.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua 2011. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre



2011. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTRIO%202011%20FINAL.pdf>.

- Comisión Nacional del Agua (2012). Atlas Digital del Agua en México. Recuperado de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/>.
- Comisión Nacional del Agua (2013). Estadística básica sobre medio ambiente datos de Guerrero. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/español/prensa/Boletines/Boletín/Comunicados/Especiales/2013/Abril/comunica30.pdf>.
- Comisión Nacional del Agua 2014. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación. Diciembre 2014. Recuperado de: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/Inventario_Nacional_Plantas1.pdf.
- Delgadillo, O.; Camacho, A.; Pérez, L.F.; And Trade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la gestión y uso del agua. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia: Facultad de Agronomía.
- Dirección General de Estadística e Información Ambiental, noviembre, 2015, con base en: SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua, octubre 2005. Comisión Nacional del Agua, Sistema Nacional de Información del Agua, SINA. Recuperado de: <http://201.116.60.25/sina/Default.aspx>, 5- 11-2015.
- Hernández A. (1994). Depuración de aguas residuales. edición Paraninfo, S.A de C. V, Magallanes 25- 28015 Madrid. 987 paginas.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2009). Prontuario de información geográfica municipal Taxco de Alarcón, Guerrero. Recuperado de: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/12/12055.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). Catálogo de Localidades. Disponible en: <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=12&mun=055>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013). Estadística básica sobre medio ambiente datos de Guerrero. Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Boletines/Boletín/Comunicados/Especiales/2013/Abril/comunica30.pdf>.



- Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal (2015). Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México, Guerrero-Taxco de Alarcón. Recuperado de: <http://www.inafed.gob.mx/%2Fwork%20Fenciclopedia%20FEMM12guerrero%2Fmunicipios%2F12055a.html>.
- Kadlec, R. H. y Wallace, S., (2009). Treatment wetlands (2.^a ed.). Boca Ratón, FL: Lewis Publishers.
- Kazi T.G., Arain M.B., Jamali M.K., Jalbani N., Afridi H.I., Sarfraz R.A., Baig J.A., Shah Abdul Q., (2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: A case study. Elsevier 72, 301- 309
- Lara B., J.A., (1999). Depuración de aguas residuales urbanas mediante humedales artificiales, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña -Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona.
- Lara B. J. A., Vera P. I. L., (2011). Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en COGUA, Cundinamarca. Colombia: Ingeniería y Universidad.
- Obarska-Pempkowiak H., Gajewsk M., Wojciechowska E., Pempkowiak J., (2015). Treatment Wetlands for Environmental Pollution Control. Springer International Publishing Switzerland.
- Majul G. S., (2012-215) Plan Municipal de Desarrollo H. Ayuntamiento Municipal Taxco de Alarcón Guerrero, México.
- Mancilla R., Zuñiga j., Salgado E., Schiappacasse M y Maggi R., (2013). Constructed wetlands for domestic wastewater treatment in a Mediterranean climate region in Chile. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=173328145005>.
- Marín B., Garay J., Ramírez G., Betancourt J., Troncoso W., Gómez M., (2004). Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Diagnóstico Nacional y Regional 2004. INVEMAR; 2004b.
- Munn. C.B., (2004). Marine Microbiology: ecology and applications. New York: BIOS Scientific Publisher.





- Ramírez, E., Robles E., Sainz M., Ayala R. Campoy, E., (2009). Calidad microbiológica del acuífero de Zacatepec, Morelos, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental. 25(4):255-274 Universidad Nacional Autónoma de México.
- Roldan P.G., Ramírez R.J., (2008). Fundamentos de limnología neotropical. Segunda edición, Editorial Universidad de Antioquia. Página 185.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-028- SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de la demanda bioquímica de oxígeno en aguas naturales, residuales (DBO₅) y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-028-1981). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 13 de diciembre de 1989.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-012-SCFI- 2001. Análisis de agua - Determinación de oxígeno disuelto en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-012-1980). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 13 de diciembre de 1989.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-008-SCFI-2011. Análisis de agua - Determinación del pH - método de prueba- (cancela a la NMX-AA-008- scfi-2000). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 3 de enero del 2012.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-005-SCFI-2013. Análisis de agua - Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la nmx-aa-005-1980). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 11 de abril de 2014.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - Medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - (cancela a la nmx-aa-026-scfi-2001). Publicado en el diario oficial de la federación México, D.F., a 23 de enero de 2014.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-007-SCFI-2000. Análisis de agua – Medición de la temperatura en aguas naturales, residuales y



- residuales tratadas - método de prueba (cancela la NMX-AA-007-SCFI-2000). Publicado en el diario oficial de la federación México, D.F., a 23 de enero de 2014.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-042-SCFI-2015. Análisis de agua - enumeración de organismos coliformes totales, organismos coliformes fecales (termotolerantes) y escherichia coli – método del número más probable en tubos múltiples (cancela a la nmx-aa-42-1987). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 11 de agosto del 2014.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). PROY-NMX-AA-029/1-SCFI-2008. Análisis de agua - determinación de fósforo total en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba-(las partes de esta NMX cancelan la NMX-AA-029-scfi-2001) Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., septiembre del 2009.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-026-SCFI-2010. Análisis de agua - Medición de nitrógeno total kjeldahl en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba - (cancela a la NMX-AA-026-scfi-2001). Publicado en el diario oficial de la federación México, D.F., a 5 de abril de 2013.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-039-SCFI-2001. Análisis de aguas - Determinación de sustancias activas al azul de metileno (SAAM) en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-039-1980). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 13 de diciembre de 1989.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-034-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a las NMX-AA-020-1980 y NMX-AA-034-1981). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., 13 de diciembre de 1989.
- Secretaria de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-004-SCFI-2013. Análisis de agua – Medición de sólidos sedimentables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-004-scfi-2000). Publicado en el diario oficial de la federación México D.F., a 13 de noviembre de 2013.



- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-014-1980, Cuerpos receptores -muestreo. Dirección general de normas fecha de publicación y aprobación: México D. F., 25 marzo 1980.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-003-1980, Aguas residuales-muestreo. Dirección general de normas fecha de publicación y aprobación: México D. F., 25 marzo 1980.
- Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (SCFI). NMX-AA-005-SCFI-2000. Análisis de agua - Determinación de grasas y aceites recuperables en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - método de prueba (cancela a la NMX-AA-005-1980). Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 13 de diciembre de 1989.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-001-SEMARNAT-. 1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las aguas residuales y en bienes nacionales. Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 23 de abril de 2003.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. NOM-002-SEMARNAT-. 1996, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano y municipal. Publicado en el diario oficial de la federación México D. F., a 23 de abril de 2003.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales / Comisión Nacional del Agua (1989). Criterios Ecológicos de Calidad del Agua CE-CCA-001/89. Diario Oficial de la Federación, miércoles 13 de diciembre de 1989.
- Stottmeister U., Wiener A., Kusch P., Kappelmeyer U., Kastner M., Bederski O., Muller R., y Moormann H., (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, vol. 22, no. 1-2, p. 93-117.
- Sundaravadivel M. y Vigneswaran S., (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 31, no. 4, p. 351-409.
- Seoáñez M., (1999). Aguas Residuales: Tratamiento por Humedales Artificiales, fundamentos científicos, tecnologías y diseño. Ediciones Mundi - Presa.



- Sherwood C. Reed, Crites, Ronal y E.Joe., (1998). Natural Systems for Waster Management and Treatment. Editorial McGraw- Hill Professional. ISBN. 433 paginas.
- Vymazal J., (2011). Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Environmental Sciences, Department of Landscape Ecology. RepublicaCheca :NáměstíSmiřických.

