

REMEDIACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA DEL RÍO TURBIO MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES

H. Baltazar Campos, D. Orona Tamayo, E. Kato Miranda y J.A. Arcibar Orozco*.

C. CONACYT – CIATEC, A.C. Centro de innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas.
Omega #201, Col. Industrial Delta, C.P. 3754 León Gto, México.

* jarcibar@ciatec.mx

RESUMEN

El Río Turbio es un cuerpo receptor de aguas domésticas y residuales del sector industrial del municipio de León, Guanajuato, principalmente el curtido. De acuerdo a un estudio de CONAGUA [1], su índice de calidad de agua lleva 10 años siendo catalogado como “fuertemente contaminado”. Una problemática muy local en el municipio de León y en el río se debe a la presencia de compuestos azufrados, mayormente sulfuros y sulfatos. La transformación bioquímica más importante de estos compuestos por su alto impacto ambiental y a la salud es la reducción del sulfato (SO_4^{2-}) para producir ácido sulfhídrico (H_2S). El H_2S es un gas altamente corrosivo y tóxico que se produce de forma natural debido a la descomposición anaerobia de la materia orgánica que contiene azufre, así como de la reducción bacteriana anaeróbica de sulfatos [2]. Entre los problemas que acarrea el H_2S están los efectos adversos en el sistema respiratorio, neurológico y la muerte. Además, se comporta como una fitotoxina para la vegetación, deteriorando su crecimiento e inhibiendo su reproducción. El H_2S liberado se acumula en el concreto y las tuberías de las industrias dañando su estructura, al oxidarse y combinarse con agua forma ácido sulfúrico que acidifica progresivamente, provocando así la formación de fisuras y picaduras en las estructuras [3].

El motivo de esta investigación es reducir el impacto ambiental que la actividad industrial ha provocado en el agua del Río Turbio. Para esto se propone el uso de humedales artificiales, los cuales tienen el potencial de ser aplicados en zonas de entarquinamiento y representar alternativas viables, ambientalmente económicas y eficientes de mitigación ambiental. Los humedales artificiales son espacios sinérgicos que se componen de plantas, sustrato y microorganismos; con esta sinergia se procesan y transforman compuestos químicos y biológicos, ayudando a estabilizar los ecosistemas acuático-terrestres y depurando aguas contaminadas mediante procesos de sedimentación, absorción, adsorción y metabolismo bacteriano [4]. En el caso particular del Río Turbio, un humedal podrá incrementar simultáneamente: la oxigenación del agua promoviendo procesos de sulfatoxidación, secuestro de metales pesados y disminución de DQO.

Para llevar a cabo el proceso, se fabricó y operó un humedal a nivel laboratorio, que consiste en recipientes de plástico de 25 L, piedra tezontle como sustrato y medio filtrante. Los humedales fueron plantados con especies nativas de la zona, tal como *Typha spp.* Se monitoreó los siguientes parámetros del agua: concentración de sulfatos, sulfuros, compuestos nitrogenados, DQO, pH, $T(^{\circ}\text{C})$, turbiedad y cromo. Adicionalmente se llevó a cabo una caracterización de las plantas para determinar la posible acumulación de elementos de origen contaminante. Los resultados indican que, en un periodo de 5 días, fue posible disminuir en un 70% la concentración de DQO, e incrementar la concentración de sulfatos. Actualmente se analiza la especiación del agua para determinar posibles mecanismos de transformación y acumulación de contaminantes. El presente proyecto representa una excelente alternativa con un enorme potencial de escalamiento para llevar a cabo una remediación integral de la cuenca del Río Turbio, después de más de 40 años de impacto ambiental.

INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua mantiene una estrecha relación con el crecimiento económico y poblacional; indudablemente, el incremento en estas actividades provoca una serie de impactos negativos, particularmente en la calidad de las aguas superficiales. Son las actividades urbanas, rurales y principalmente las industriales quienes generan fuertes cantidades de residuos contaminantes que posteriormente son descargados en los ríos. Según la UNESCO, el 80% de las aguas residuales que se generan son vertidas a estos ecosistemas sin recibir un tratamiento o

reutilización [5]. En la actualidad, el deterioro de los cuerpos de agua superficiales utilizados como receptores de sustancias contaminantes, merma la disponibilidad de su uso y trae consigo un riesgo global sobre la mala calidad del agua y un estrés hídrico. Es bajo esa premisa que la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha estimado que para el 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas de escasez de agua [6].

Normalmente, las aguas residuales descargadas en los ríos son de composición variada, ya que han sido sometidas a un proceso o alteración que modificaron sus propiedades físicas y químicas [7]. La complejidad para determinar la calidad del agua o bien su nivel de contaminación, así como los parámetros necesarios para su monitoreo dependerá del tipo de agua que recibe y el uso para el que está destinada. Uno de los indicadores más difundidos, es el índice de calidad del agua (ICA), mismo que ha sido adoptado y modificado por muchos países para su uso específico.

El ICA es una herramienta matemática que permite identificar la calidad de agua de un cuerpo superficial o de cualquier otro origen. El cálculo incorpora los parámetros físicos, químicos y biológicos que mejor representen al sitio de estudio y el objetivo de la investigación [8]. Para el cálculo se emplea una ecuación de tipo aditivo ponderada, donde cada parámetro seleccionado posee un cierto peso o ponderación (W_i) que dependerá de su importancia en el estudio. El resultado de esta evaluación expresa el porcentaje de contaminación del cuerpo de agua; aguas altamente contaminadas tendrán un ICA cercano o igual al 0% y aguas en buenas condiciones será cercano o igual a 100% [9].

En México, se ha reportado que aproximadamente el 70% de los cuerpos de agua superficiales exhiben síntomas de contaminación considerable [5]. Según un estudio, en el país se generan alrededor de 443.76 m³/s de aguas residuales y solamente se trata el 49%, el resto termina siendo liberado en cuerpos superficiales, principalmente ríos [5]. Un ejemplo sobresaliente de cuerpo natural receptor de efluentes industriales es el río Turbio, que está ubicado en la ciudad de León, Guanajuato. A través de los años se ha convertido en un colector de aguas residuales de los 43 sitios industriales que atraviesa. Tal es su nivel de contaminación, que la CONAGUA lo ha catalogado, durante más de 10 años, como un cuerpo de agua en estado fuertemente contaminado [10][1].

El municipio de León es ampliamente conocido por su intensa actividad industrial en el sector del cuero y calzado. Una problemática muy local por las empresas curtidoras que se concentran en parques industriales. Ese es el caso del Parque Industrial de León; la mayoría de las industrias instaladas se dedican al curtido de piel y algunas de ellas tienen descarga directa de efluentes contaminados al río Turbio. Se sabe que la industria del curtido produce aproximadamente 50 m³ de agua residual por cada tonelada de piel tratada [11]. Estas descargas están fuertemente concentradas con sulfuros y sulfatos, además de otros contaminantes tales como materia orgánica, cromo, amonio, NaCl y efluentes de pH variado. Diversos estudios han reportado que los valores de estos parámetros en una descarga de agua residual de curtiduría pueden encontrarse entre 300-400 mg⁻¹ para sulfatos, 5000 a 10000 mg⁻¹ para sulfuros, 3000-15000 mg⁻¹ para DQO, 1500-4000 mg⁻¹ para cromo y 500-3000 mg⁻¹ para amonio [12][13][14]. Un problema muy particular en este cuerpo de agua es la contaminación con compuestos de azufre tales como sulfatos (SO₄²⁻) y sulfuros (S²⁻). El azufre al ser un elemento con un amplio rango de estados de oxidación suele participar en muchos procesos redox mediados por microorganismos y ciertas características del medio. En el río Turbio, son estas características las que están promoviendo un ambiente en el que los compuestos del azufre se están transformando en ácido sulfhídrico (H₂S) [15].

El H₂S es un gas altamente corrosivo y tóxico [16]. Es un producto de la descomposición anaerobia de la materia orgánica que contiene azufre, así como de la reducción bacteriana anaeróbica de sulfatos. Este gas es liberado a la atmósfera donde persiste, desde un día en temporadas cálidas, hasta 42 días en temporadas frías, siempre y cuando el medio acuoso donde se encuentra tenga un pH menor a 6 [17]. Se ha reportado que la exposición a concentraciones altas de H₂S por inhalación, lo convierte en una sustancia letal para la salud poblacional y la fauna del entorno, ya que causa efectos adversos en el sistema respiratorio, neurológico y en algunos casos la muerte [15][17]. Además, se comporta como una fitotoxina para la vegetación pues provoca lesiones necróticas a las hojas, deterioro del crecimiento, inhibe la reproducción y modifica su morfología [3]. El H₂S liberado

se acumula en el concreto y las tuberías de las industrias dañando su estructura, al oxidarse y combinarse con agua forma puede formar ácido sulfúrico que corroe, provocando así la formación de fisuras y picaduras en las estructuras

Existen algunos tratamientos utilizados para remover sulfuros en agua. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que, al hablar de un cuerpo superficial, los volúmenes de agua a tratar son elevados. Una tecnología no convencional que tiene mucho potencial para el tratamiento de agua superficial y además combina la remoción de sulfuros y los grandes volúmenes de agua son los humedales artificiales (HA) [18][19].

Los humedales artificiales son un tratamiento natural para aguas contaminadas que, a través de procesos físicos, químicos y biológicos mediados por la acción de las plantas, el sustrato y los microorganismos, logran disminuir, degradar y transformar contaminantes presentes en el agua. Estos sistemas de ingeniería ecológica se utilizan debido a su alta eficiencia de remoción y costos relativamente bajos tanto de construcción como de mantenimiento [20]. Hay casos documentados donde se han empleado humedales para tratar agua residual con diversos contaminantes, incluyendo: compuestos azufrados [21], metales pesados [22], nutrientes [23], cromo [24], arsénico [25], de granjas porcícolas [26], entre otros. Al ser el Río Turbio un efluente con bajas tasas de oxigenación, con una considerable actividad reductora por parte de los microorganismos y poseer altas cantidades de sulfatos y sulfuros; el mecanismo de los humedales puede beneficiar en la degradación, estabilización y transformación de contaminantes orgánicos e inorgánicos. Además, tienen la capacidad que pueden suministrar oxígeno al medio a través de la actividad fotosintética de las plantas y de proliferar bacterias que favorezcan las reacciones de oxidación de compuestos reducidos del azufre [27][28].

En el presente estudio se diseñó y construyó un sistema de HA a escala laboratorio usando *Typha spp.* soportada con tezontle [29]. Se estudió su potencial para disminuir la concentración de sulfuro y el incremento en el índice de calidad del agua adaptado de la CONAGUA [10] y la National Sanitation Foundation [30]. Los humedales se alimentaron con agua del Río Turbio diluida en una relación 1:1 con agua del grifo. Se consideran como variables para el funcionamiento efectivo el tipo de planta, la concentración contaminada de agua y el tiempo de retención hidráulica (TRH). Se espera que los resultados obtenidos en este estudio puedan proporcionar las bases o criterios para su aplicación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las descargas por parte de la industria curtidora, liberan en el río Turbio compuestos azufrados y otros contaminantes en concentraciones tales que afectan la calidad de vida de la población, la fauna, la vegetación y al sector industrial. La carga contaminante ha sido tan extensa en términos de concentración y tiempo, que el río ha perdido la capacidad de autodepuración [31].

Son las reacciones por parte de los compuestos azufrados mediadas por la actividad de los microorganismos reductores de sulfato, y la suma de otras condiciones potenciadas por la alta carga de materia orgánica, la variabilidad en el pH y el ambiente anóxico, lo que está provocando la emisión de compuestos volátiles tóxicos en el aire, como el sulfuro de hidrógeno [32]. Es decir, los compuestos azufrados normalmente llegan al río en forma de sulfuros que es la forma más reducida del azufre y en forma de sulfatos que es la más oxidada. Se ha determinado que la cantidad de oxígeno en esta zona del río Turbio es muy nula por lo que la mayoría de las reacciones químicas que hay en el río son de reducción [33]. Dicho esto, al no haber oxígeno o algún otro aceptor de electrones, el sulfato es reducido hasta sulfuros por acción de los microorganismos para poder realizar sus actividades metabólicas. Los sulfuros, a diferencia de los sulfatos, son menos solubles, su solubilidad y forma depende del pH. Cuando el pH del río baja a 6 estos sulfuros se convierten en ácido sulfhídrico, mismo que es emitido en forma de gas a los alrededores del río [21][32]. No obstante, en condiciones con agua bien aireada, el sulfuro de hidrógeno se oxida fácilmente a sulfatos y posteriormente se oxida biológicamente a azufre elemental, completando el ciclo del azufre y disminuyendo el impacto ambiental [2].

Es evidente que la remoción de estos contaminantes debe ser prioridad para que se pueda mejorar tanto la calidad del agua como la vida de las personas. Sin embargo, es un problema complejo ya

que no solo existen compuestos azufrados, también otros contaminantes como materia orgánica, cromo, compuestos nitrogenados, pH irregular, metales pesados, etc. [34]. Por lo tanto, el presente proyecto incluye un estudio cuyo propósito es producir condiciones contrarias a las que ocurren actualmente en el río mediante el uso de humedales artificiales. Se espera que estos proporcionen un mecanismo de aireación por acción de las plantas, y de oxidación por los microorganismos, lo que propiciará las condiciones necesarias para oxidar los sulfuros en el agua y evitar su emisión.

JUSTIFICACIÓN

El motivo de esta investigación es reducir el impacto ambiental que la actividad industrial ha provocado en el agua del Río Turbio. León, Guanajuato al ser un municipio con pocos cuerpos de agua naturales y una marcada escasez hídrica, requiere que sus fuentes de abastecimiento naturales puedan ser aprovechadas y a su vez disminuir el impacto ambiental que los contaminantes provocan en el ambiente. Si bien la finalidad de tratar el agua del Río Turbio es una propuesta válida, no es un trabajo fácil. Los volúmenes de agua que acarrea un río son muy grandes para que una planta de tratamiento convencional pueda soportarlos, eso sin tomar en cuenta la costosa inversión que esto demandaría tanto en la construcción, operación y mantenimiento. Esta situación obliga a plantear alternativas para tratar el agua que fluye en el río. Para ello se propone el uso de humedales artificiales. Esta ecotecnología se vuelve ideal ya que representa costos de construcción y operación muy por debajo de otros sistemas de tratamiento de agua. Tienen la capacidad de soportar grandes volúmenes de agua y generar pocos lodos residuales, además de que representa una alternativa verde para el tratamiento de efluentes.

Adicionalmente, la zona de estudio exhibe características ideales para la implementación de un humedal como lo es el amplio espacio terrestre y que el sitio se identifica como zonas de entarquinamiento [35] por lo que se vuelve una zona ideal para la implantación del proyecto. Debido a la sinergia formada por los elementos que componen a esta tecnología, se vuelve un atractivo potencial para implementar en el tratamiento del agua del Río Turbio ya que promoverá fenómenos como el incremento de la oxigenación en el agua, lo que favorecerá la oxidación de algunos elementos, promoverá las reacciones de sulfatoxidación, el acomplejamiento o precipitación de metales y la disminución de la carga orgánica.

HIPÓTESIS

Si se utiliza un sistema de humedales artificiales subsuperficial plantado con *Typha spp*, entonces se puede disminuir la concentración de compuestos sulfurosos y a su vez aumentar el índice de calidad del agua del río Turbio, debido a los procesos de oxigenación y remoción mediados por las plantas y los microorganismos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de uso de humedales artificiales como una herramienta para reducir los compuestos sulfurosos y aumentar la calidad del agua del río Turbio, comparando el desempeño de diferentes tipos de plantas en la remoción de los contaminantes del sistema.

METODOLOGÍA PARA RESOLVER EL PROBLEMA

Reactivos y materiales

Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico. Se empleó agua desionizada con una conductividad menor a 0.217 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en todos los experimentos. El agua que se analizó se obtuvo directamente del río Turbio. El punto de muestreo seleccionado para el estudio se localizó en la comunidad de San Roque, Gto, México. Las especies vegetales se recopilaron en diversos puntos sobre el perímetro del río que se mencionan en el apartado de Muestreo y recolección. El Sistema de humedales, en específico, son de elaboración propia y se especifican sus características en el apartado de Experimentación de los humedales.

Muestreo y recolección

Se realizó un muestreo preliminar para la recolección de especies vegetales que fueran acuáticas, endémicas y emergentes en sitios ubicados sobre el perímetro del río. Se visitaron cinco zonas de muestreo ubicadas en los puntos 21°00'27.3"N 101°48'14.9"W, 21°00'59.7"N 101°49'07.4"W, 21°03'59.6"N 101°43'39.2"W, 21°03'59.4"N 101°43'39.5"W, 21°04'47.9"N 101°42'37.7"W en el tramo desde Santa Rosa Plan de Ayala, hasta la cercanía a la comunidad de San Roque de Montes, Guanajuato. Se aseguró un procedimiento adecuado sobre las técnicas de recolección y preservación de las especies. Una vez recolectadas se colocaron en los reactores donde se mantuvieron durante 15 días bajo fotoperíodo natural y temperatura ambiente para ver su respuesta ante el tratamiento. Posteriormente se hizo una recolección de agua en la zona 21°00'59.7"N 101°49'07.4"W con base en los lineamientos de la NMX-AA-003-1980 y el Standard Methods of Water and Wastewater. Se seleccionó esta región geográfica como la más adecuada pues el agua ya presenta cierto grado de homogenización y son zonas identificadas de entarquinamiento. En campo, bajo las condiciones climatológicas se midió el pH, la temperatura y la CE con base en las normas NMX-AA-008-SCFI-2016, NMX-AA-007-SCFI-2000 y NMX-AA-093-SCFI-2000, respectivamente.

Experimentación en los humedales

Se construyó un sistema de humedales artificiales (HA) independientes en tanques de polietileno de 25 L de capacidad. Los reactores fueron alimentados a través de un sistema de tuberías de CPVC de ½ pulgada, que está conectada a un tanque de almacenamiento principal de 120 L de capacidad. Los humedales se empacaron con tezontle como material de sustrato. Los reactores se colocaron en un invernadero que se diseñó con paredes de plástico y techo de malla semitransparente con suficiente entrada de luz y aire. Los puntos de muestreo se colocaron al extremo contrario de la entrada del flujo. Se instaló una llave esfera a una altura de 9 cm de la superficie del suelo en cada reactor.

Los humedales se alimentaron con una mezcla de agua del río Turbio con agua de grifo 1:1 a través del tanque de almacenamiento. Posteriormente se hizo un seguimiento de la concentración de los contaminantes y del ICA utilizando cuatro réplicas (H1, H2, H3, H4) plantadas con la especie vegetal seleccionada y un blanco (sin tezontle, únicamente agua) (H5). Los humedales se monitorearon durante cinco días. Las muestras de agua se tomaron todos los días a la misma hora y para el caso del pH, la conductividad eléctrica y la temperatura se hará tanto en el día como en la noche y cada muestra se analizó por triplicado para fines de seguridad.

Determinación de los parámetros de la calidad del agua

El agua se caracterizó para determinar su DQO en base al método establecido por la NMX-AA-030/2-SCFI-2011 por el método dicromato de potasio. El contenido de sulfatos, nitratos, cloruros y amonio determinó por análisis cromatográfico en un equipo Dionex ICS-5000+ de Thermo Scientific. La concentración de sulfuros se determinó según la NMX-AA-084-SCFI-2005 por la técnica del método iodométrico. La determinación de cromo se determinará mediante espectrofotometría de absorción atómica por llama en ICE 3000 de Thermo Scientist, después de una digestión ácida con HNO₃. Las mediciones de pH, CE y temperatura se realizaron con un multímetro portátil marca HACH sension6. El electrodo se calibró antes de cada medición usando soluciones amortiguadoras de pH 4, pH 7 y pH 10.

En las plantas se analizó el contenido orgánico (C, H, N y S) utilizando un analizador elemental Flash 2000 de Thermo Scientist. Se determinó la concentración de cromo mediante espectrofotometría de absorción atómica por llama e ICE 3000 de Thermo Scientist, después de una digestión ácida con HNO₃. Se evaluó las tasas de crecimiento de las plantas analizando la altura de la planta, el número de brotes y área foliar. Para ello la altura de la planta se expresó como la suma de las alturas de las plantas de un reactor y se promedió. El área foliar se determinará midiendo y multiplicando el largo por el ancho de cada hoja y el resultado se deberá multiplicar por un factor de 0.75, se sumarán los valores obtenidos de cada hoja por planta para promediar los valores de un reactor.

Análisis de datos

Para realizar una medida homogénea de la calidad del agua se utilizó como herramienta el ICA. Para lo cual se definieron los parámetros que se emplearon en la ecuación, donde cada parámetro recibió un peso o ponderación (W_i). Los parámetros seleccionados para indicar el ICA del tratamiento se eligieron con base al objetivo del proyecto: Demanda Química de Oxígeno (DQO), sulfuros, sulfatos, nitratos, amonio, cloruros, cromo, pH, conductividad eléctrica y turbiedad.

Las ecuaciones utilizadas para determinar el ICA [3]:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde: W_i es el peso relativo; w_i es el peso de cada parámetro; n es el número de parámetros.

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 2.}$$

Donde: q_i es la calificación de calidad; C_i es la concentración de cada parámetro químico en cada muestra de agua en mg / l; S_i es el valor de la línea guía / límite deseable

$$S_i = W_i * q_i$$

$$WQI = \sum S_{i-n} \quad \text{Ecuación 3.}$$

Donde: S_i es el subíndice del parámetro i -ésimo; W_i es el peso relativo del i -ésimo parámetro; q_i es la clasificación basada en la concentración de i -ésimo parámetro y n es el número de parámetros.

En la Tabla 1 se muestran los valores para determinar el ICA estarán comprendidos en la siguiente escala:

Tabla 1. Valores ICA para la evaluación de cuerpos de agua [36][37]

Valor ICA	Clasificación	Color
90-100	Excelente	Azul
70-90	Buena Calidad	Verde
50-70	Aceptable	Amarillo
25-50	Contaminada	Naranja
0-25	Fuertemente contaminada	Rojo.

Para determinar si había un efecto de cada tratamiento se realizó un análisis de varianza por medio del programa MINITAB. El análisis de significancia se corroboró mediante el uso de la prueba p -value y una prueba Tukey para la comparación entre grupos. Fue relevante pues se necesitaba lograr que las réplicas de los humedales no mostraran una diferencia significativa entre ellas. Sin embargo, era importante que sí se lograra notar una diferencia significativa entre su comportamiento día con día en comparación con el blanco.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sistema de humedales artificiales se puede observar en la Figura 1. Los humedales se diseñaron del tipo subsuperficial ya que facilitan el uso de plantas emergentes, evita la formación de insectos (proliferación de mosquitos), malos olores y favorecen la aireación del sistema. La especie de vegetación emergente que se utilizó para la experimentación fue *Typha spp*, ambas provenientes del río Turbio. Esta especie se seleccionó debido a que al ser recolectada del mismo río posee un alto grado de adaptación a la contaminación del río, además, se ha reportado que son plantas muy utilizadas en humedales por su capacidad de resistir condiciones con alta carga de materia orgánica y concentraciones de metales pesados. El tezontle como sustrato se eligió por ser un material inerte con un alto índice de porosidad, ser de bajo costo y que abunda en el estado de Guanajuato, su estructura favorece la formación de películas bacterianas, los procesos de adsorción, la aireación y el flujo del agua. Tiene un alto porcentaje de hierro en su composición lo que beneficiará el proceso de remoción del sulfuro. Con el invernadero se buscó proteger las plantas sin evitar que tuvieran una buena aireación y entrada de luz, así se mantuvieron las condiciones similares a una aplicación real.



Figura 1. Humedales artificiales a nivel laboratorio.

En el muestreo preliminar se recolectaron cinco plantas, tres de ellas acuáticas y dos tomadas de la interfaz suelo-agua. Algunas de ellas se encontraban en la periferia del río y otras en ramificaciones de éste. Las plantas recolectadas se identifican en la Figura 2.

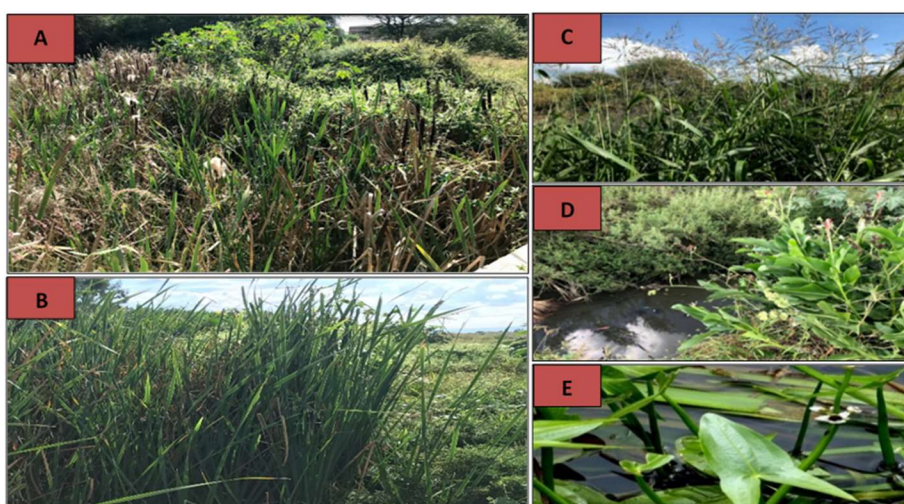


Figura 2. Fotografías de las especies vegetales recolectadas en el muestreo (A) *Typha domingensis*, (B) *Schoenoplectus acutus*, (C) *Panicum repens*, (D) *Canna indica*, (E) *Sagitaria sagittifolia*.

Tras el periodo de aclimatación y evaluación de las cinco plantas recolectadas, únicamente logró sobrevivir *Typha spp*, por lo que se decidió utilizarla para esta investigación. Cabe resaltar que esta planta crece en contacto directo con el agua del río, lo que nos indicó que una previa adaptación genera mecanismos de tolerancia para que la plantas soporte agua con características propias del sitio. En la Tabla 2 se muestra la caracterización para *Typha spp*.

Tabla 2. Caracterización de *Typha spp* del Río Turbio.

Parámetro	Valor	
	Raíz	Hoja
C	23.67	34.53
H	3.26	4.75
N	1.13	1.63
S	0.34	1.01
Cromo	----	
Altura de planta	35 cm	
Nº de brotes	4	

Se caracterizó el agua del Río Turbio que se recolectó en la localidad de San Roque de Montes, Guanajuato. Las determinaciones realizadas son las seleccionadas para evaluar el índice de calidad del agua. En la Tabla 3 se muestra la caracterización parcial del agua del Río Turbio.

Tabla 3. Caracterización de agua del Río Turbio.

Parámetro	Valor
DQO	7142.86 mgL ⁻¹
Sulfuros	-----
Sulfatos	476.02 mgL ⁻¹
Nitrato	0 mg ^{-L}
Cloruros	1211.16 mgL ⁻¹
Amonio	----
Turbiedad	----
Cromo	----
pH	8.12
CE	6.57 mScm ⁻¹
DQO mezcla 1:1	5031.20 mgL ⁻¹

Según las determinaciones, la concentración de la DQO disminuye hasta en un 71% en todos los humedales conforme avanzan los cinco días de TRH en comparación con el blanco, del que solo se presenta una variación de un 4.5% con base en el valor del día 0 (Figura 3.A). Mediante una prueba *p-value* y una prueba de Tukey, los resultados demostraron que entre los humedales (H1, H2, H3, H4) no hay una diferencia significativa en su comportamiento, es decir la permutación de los arreglos y las diferencias por microambientes desarrollados en cada reactor no son significativas, comparado con su capacidad de remover materia orgánica. Adicionalmente, la remoción de DQO alcanza una asíntota después de los 5 días, donde al parecer se alcanza un sistema estable y probablemente un máximo de remoción del 70% (Figura 3.B). La cantidad de materia orgánica residual en los reactores después de 4 días corresponderá con la necesaria para mantener el ecosistema.

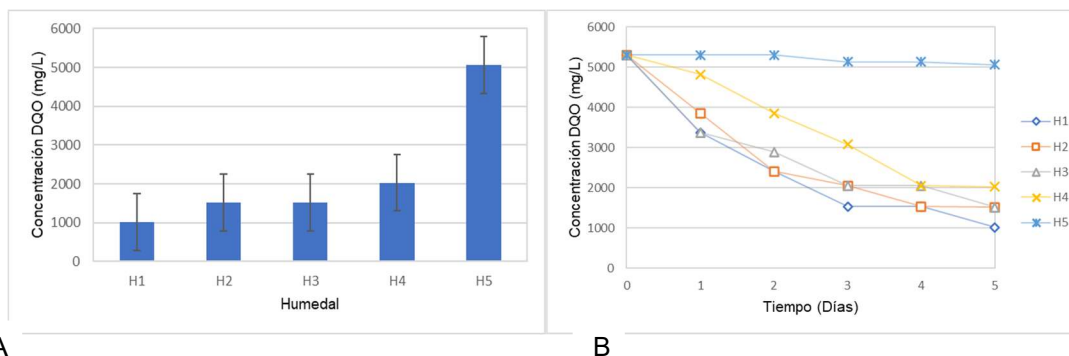


Figura 3. (A) Concentración final de la DQO en los humedales en el día 5. (B) Evolución de la DQO en los humedales durante 5 días.

Existió una mayor variación respecto a la evolución del sulfato con respecto al tiempo en los humedales y dada la gran movilidad de este elemento, una mayor variación entre humedales. Indicando que para la remoción de sulfato existen factores relacionados con microambientes que controlan su movilidad (Figura 4.A). Dicho esto, un análisis ANOVA indicó que existe una diferencia significativa del grupo de los humedales con respecto al blanco y que la tendencia después de los 5 días fue ligeramente al aumento, lo cual sugiere la oxidación del azufre por los humedales. Después de 5 días, la concentración de sulfato fue desde un 40% hasta un 53% mayor que el blanco, dependiendo el humedal (Figura 4.B).

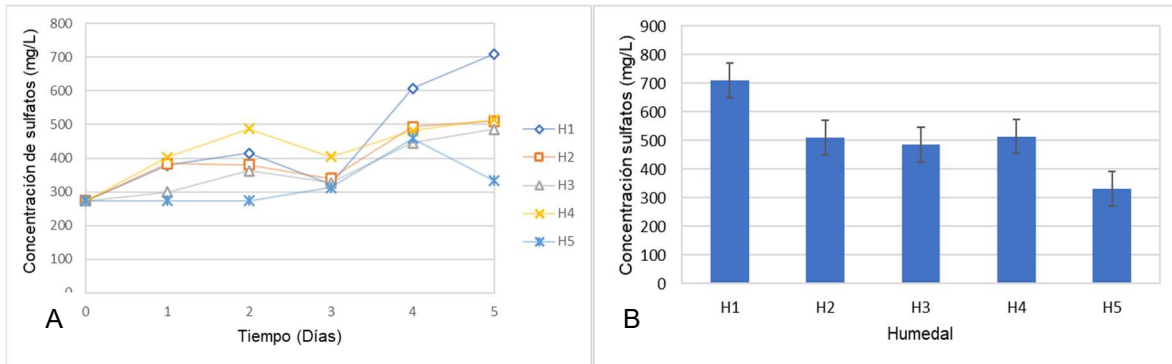


Figura 4. (A) Evolución del sulfato en los humedales durante 5 días. (B) Concentración final de sulfatos en los humedales en el día 5.

La medición del pH en los humedales demostró que el pH se comporta diferente en el día y la noche y, en cualquier caso, 1.2 unidades de pH menor en comparación con el blanco. El análisis demostró que entre el pH del humedal y el blanco sí existe una diferencia significativa. Por otro lado, el monitoreo de la temperatura demostró que no existe una diferencia significativa entre la temperatura de los tratamientos, pero si con relación al blanco. Los humedales siempre mantuvieron una temperatura mayor que el blanco en aproximadamente 3 °C. El análisis de la conductividad en los tratamientos demostró que la influencia de las plantas no provoca una diferencia significativa sobre la conductividad del agua de salida. Figura 5.

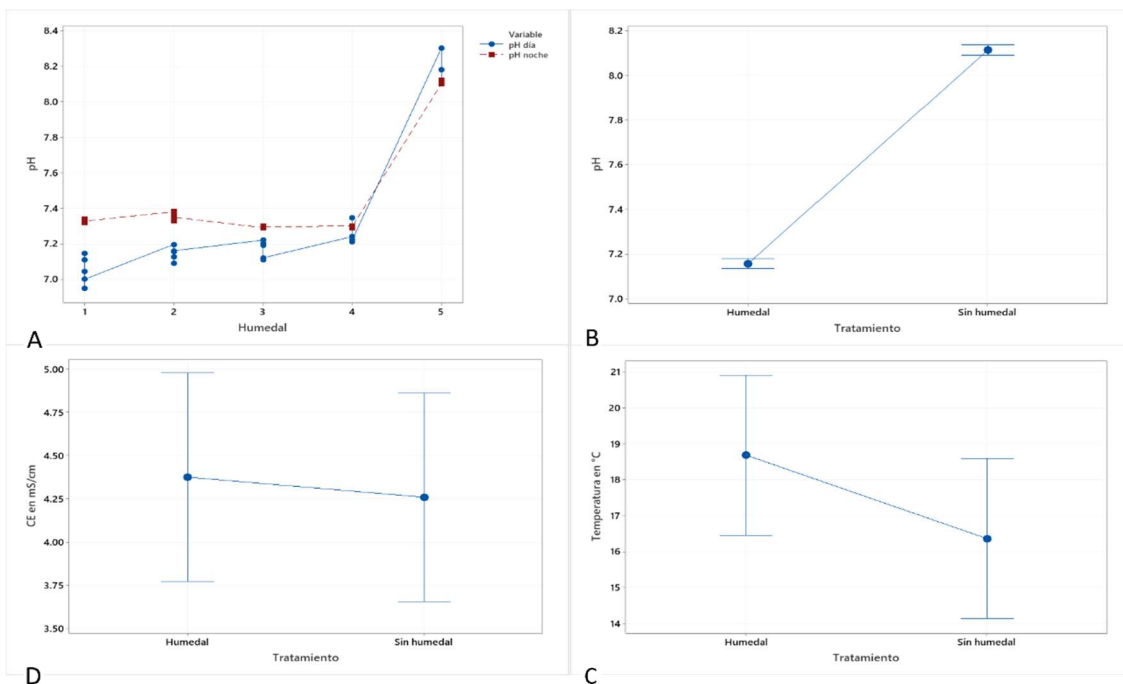


Figura 5. (A) Evolución del pH en los humedales durante 5 días (B) Efecto del pH con humedal y sin humedal (C) Efecto de la temperatura con humedal y sin humedal (D) Efecto de la CE con humedal y sin humedal.

Según los resultados obtenidos por el análisis de varianza, se puede inferir que las réplicas de los humedales trabajan en sintonía, es decir que pueden ser replicados, una prueba Tukey y *p-value* mostraron que entre ellos no hay diferencias significativas. La disminución de la DQO de hasta un 70% en los cuatro humedales demuestra que sí hay una influencia por parte de sus componentes en comparación con el blanco. Es probable que la disminución de la materia orgánica se haya llevado a cabo por la actividad metabólica de bacterias que proliferaron. El desarrollo de estos microorganismos está bastante ligado a las condiciones del medio, tales como pH y temperatura. Se ha reportado [38] que microorganismos degradadores de materia orgánica se desarrollan bajo condiciones de pH 5 a 9 y temperatura de 15 a 28 °C por lo que las condiciones monitoreadas durante los cinco días son ideales para el crecimiento de estos microorganismos. Además, de que el sustrato y las raíces de las plantas son la superficie perfecta para formar biopelículas activas, cosa que no sucedió en el blanco.

El pH del blanco durante el monitoreo se mostró fijo en un valor cercano a 8. El pH de los humedales durante el muestreo nocturno alcanza su punto más alto debido al proceso de fotosíntesis durante el día. Al amanecer, en el muestreo matutino se puede observar que el pH del agua llega a su punto más bajo debido al fenómeno de respiración de las plantas durante la noche. Un fenómeno similar pasa con la temperatura, durante la noche la temperatura del humedal disminuye y por el día aumenta. Sin embargo, los humedales normalmente se mostraron algunos grados más arriba que el blanco y esto se puede deber a la capacidad del tezontle para retener calor, ya que como recordaremos el humedal es de tipo subsuperficial, por lo que el sustrato es directamente incidido por la energía solar.

Un indicador importante en la investigación es la disminución en la concentración de sulfuros en el agua y un aumento a los sulfatos, es decir, favorecer las reacciones de oxidación. Los resultados de la evaluación durante los cinco días mostraron un aumento de sulfatos. El incremento de su concentración se liga directamente con las tasas de oxígeno suministrado por el proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las plantas. No puede ser por re-aireación ya que este es un proceso en el que el oxígeno del aire se disuelve en la superficie del agua, principalmente a través de las turbulencias, limitado al ser un reactor subsuperficial. A pesar de que el aumento de sulfatos era la intención, el incremento no fue el esperado. Creemos que esto se puede deber a lo siguiente, al haber sido días muy nublados, como se puede ver reflejado en la temperatura monitoreada, es posible que las tasas fotosintéticas se hayan reducido debido a una baja en la intensidad de luz proporcionada para excitar el proceso, lo que se traduce en menos oxígeno disponible. Por otro lado, el muestreo de este parámetro se realizó en un horario matutino. Al amanecer el agua posee menos concentración de oxígeno debido al proceso de respiración de las plantas durante la noche por lo tanto se desfavorecen las reacciones de oxidación. Y por último también se debe contemplar que pueda estar siendo adsorbido por el sustrato o las plantas. Es importante mencionar que el hecho de que las concentraciones de sulfatos no hayan disminuido es muy importante pues podría expresar que al menos esos aniones no se están reduciendo a sulfuros.

En el monitoreo diario sobre los valores de conductividad eléctrica, mostraron un ligero aumento en efluente de los humedales contra el blanco. Los valores medidos de conductividad eléctrica oscilaron entre 4 mScm⁻¹ y 5 mScm⁻¹ lo que no es extraño pues al ser agua que recibe descargas de las curtidurías, el cloruro de sodio es un contaminante común. Es posible que el ligero incremento esté relacionado con el aumento de iones en solución de los humedales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el análisis demostró que la influencia de las plantas no provoca una diferencia significativa sobre el agua de salida. Respecto al índice de calidad del agua del influente y el efluente, la ecuación no pudo ser concluida pues son diez los parámetros necesarios para obtener un valor representativo para la investigación.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha reforzado la hipótesis que se planteó en el proyecto, donde la concentración de sulfatos aumentó en el agua una vez que ésta atravesó el sistema de humedales. Debido a la capacidad de plantas para proporcionar oxígeno al medio, se favorecen las reacciones de oxidación y se provee el necesario para los microorganismos con vías metabólicas aerobias. Adicionalmente, la remoción de la DQO se favorece debido a la sinergia que ocurre entre planta-microorganismo,

mostrando a los cinco días un posible punto de establecimiento y probablemente un máximo de remoción del 70% que corresponde a lo publicado en la literatura. Será importante determinar e indagar qué compuestos están utilizando las bacterias como aceptor o donador de electrones para llevar a cabo estas funciones. Una decisión significativa fue seleccionar plantas endémicas del río pues ya presentan cierto grado de adaptabilidad a las características del agua de estudio, tales como concentradas cargas orgánicas, metales pesados y cambios físicos. Será necesario realizar todas las determinaciones para lograr un entendimiento completo del sistema y concluir si es que es posible replicarlo y controlarlo en un ambiente *in situ* del Río Turbio. Para la continuación del trabajo queda por discutir qué es lo que pasa con los sulfuros dentro del mecanismo del humedal, se espera entender de manera concreta cómo es que están funcionando los reactores y quiénes están realizando la mayor parte del trabajo. Además, queda pendiente la resolución de la ecuación del índice de calidad del agua para determinar en qué porcentaje cambia el influente del efluente una vez que se somete al tratamiento. El resultado se decretará cuando se concluyan las pruebas para determinar parámetros faltantes como sulfuros, cromo, turbiedad y otros iones.

REFERENCIAS

1. CONAGUA, "Datos de calidad del agua de 5000 sitios de monitoreo de CONAGUA," Energía Y Medio Ambiente," Available: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/monitoreo-de-la-calidad-del-agua-en-mexico>, 2017. Accesado el 9 de febrero de 2020.
2. M. Holmer y P. Storkholm, "Sulphate reduction and sulphur cycling in lake sediments: A review," *Freshw. Biol.*, vol. 46, no. 4, 2001, pp. 431–451.
3. M. Lisjak, T. Teklic, I. D. Wilson, M. Whiteman, and J. T. Hancock, "Hydrogen sulfide: Environmental factor or signalling molecule?," *Plant, Cell Environ.*, vol. 36, no. 9, 2013, pp. 1607–1616.
4. H. Wu et al., "A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation," *Bioresour. Technol.*, vol. 175, 2015, pp. 594–601.
5. CNDH, "Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos", 2018, pp. 313.
6. OMS/UNICEF, "Drinkin water.," <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>, 2019. Accesado el 20 de mayo de 2020.
7. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, "Norma Oficial Mexicana. NOM-001-SEMARNAT-1996. Límites Máximos Permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.," D. Of. la Fed. 23 abril 2003, pp. 1–33.
8. D. Gupta, G. Singh, A. K. Patel, and V. Mishra, "An Assessment of Groundwater Quality of Varanasi District using Water Quality An Assessment of Groundwater Quality of Varanasi District using Water Quality Index and Multivariate Statistical Techniques," vol. 7112, no. May, 2019.
9. A. K. Batabyal and S. Chakraborty, "Hydrogeochemistry and Water Quality Index in the Assessment of Groundwater Quality for Drinking Uses," *Water Environ. Res.*, vol. 87, no. 7, 2015, pp. 607–617.
10. Conagua, "Monitoreo de la calidad del agua en México. De los sitios muestreados por la Red Nacional de Monitoreo del 2012-2015.," Com. Nac. del Agua, 2016, pp. 9.
11. A. Pati, R. Chaudhary, and S. Subramani, "A review on management of chrome-tanned leather shavings: a holistic paradigm to combat the environmental issues," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, no. 19, 2014, pp. 11266–11282.
12. B. I. Islam, A. E. Musa, E. H. Ibrahim, S. A. A. Sharafa, and B. M. Elfaki, "Evaluation and Characterization of Tannery Wastewater," *J. For. Prod. Ind.*, vol. 3, no. 3, 2014, pp. 2325–4513.
13. P. Religa, A. Kowalik, and P. Gierycz, "Application of nanofiltration for chromium concentration in the tannery wastewater," *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, no. 1, 2011, pp. 288–292.
14. S. Sundarapandiyam, R. Chandrasekar, B. Ramanaiah, S. Krishnan, and P. Saravanan, "Electrochemical oxidation and reuse of tannery saline wastewater," *J. Hazard. Mater.*, vol.

- 180, no. 1–3, 2010, pp. 197–203.
15. OMS, “Guías para la calidad del agua potable (Introducción),” *Organ. Mund. la Salud*, vol. 1, 2004, pp. 11–26.
 16. D. S. Drozd, “Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals,” *N.A. Sciences*, vol. 9, 2010, pp. 173.
 17. D. Quality, “pH in Drinking-water Background document for development of,” *pH Drink.*, vol. 2, 1996, pp. 7.
 18. A. Hernández and J. Moreno, “Tratamiento de aguas residuales industriales en México: Una aproximación a su situación actual y retos por atender.,” *RINDERESU*, 2017 pp. 14.
 19. A. R. Fernández-alba, “Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales,” *CEIM*, 2006, pp. 137.
 20. C. Arias and H. Brix, “Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales Abstract,” *Cienc. e Ing. n Neogranadina*, no. 13, , 2003, pp. 17–24.
 21. S. Wu, C. Jeschke, R. Dong, H. Paschke, P. Kusch, and K. Knöller, “Sulfur transformations in pilot-scale constructed wetland treating high sulfate-containing contaminated groundwater: A stable isotope assessment,” *Water Res.*, vol. 45, no. 20, 2011, pp. 6688–6698.
 22. E. Osmá, V. İlhan, and İ. E. Yalçın, “Heavy metals accumulation causes toxicological effects in aquatic *Typha domingensis* Pers.,” *Rev. Bras. Bot.*, vol. 37, no. 4, 2014, pp. 461–467.
 23. M. Gophen, “Nutrient and plant dynamics in Lake Agmon Wetlands (Hula Valley, Israel): A review with emphasis on *Typha domingensis* (1994-1999),” *Hydrobiologia*, vol. 441, no. 1948, 2000, pp. 25–36.
 24. V. A. Papaevangelou, G. D. Gikas, and V. A. Tsihrintzis, “Chromium removal from wastewater using HSF and VF pilot-scale constructed wetlands: Overall performance, and fate and distribution of this element within the wetland environment,” *Chemosphere*, vol. 168, 2017, pp. 716–730.
 25. C. Aragón and T. Herrera, “Arsenic retention in a wetland constructed with *Eleocharis macrostachya* and *Schoenoplectus americanus*,” *Scielo*, vol. 2, 2014.
 26. Gonzalo., J. Salazar, S. Hernandez, Marta, Arias, F. Bentancur, and Gomez, “Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas,” *Inf. Técnico*, vol. 74, no. 0, 2010, pp. 12–22.
 27. R. Vidyalakshmi, R. Paranthaman, and R. Bhakayaraj, “Sulphur Oxidizing Bacteria and Pulse Nutrition-A Review,” *World J. Agric. Sci.*, vol. 5, no. 3, 2009, pp. 270–278.
 28. C. DuPoldt, R. Edwards, L. Garber, B. Isaacs, and J. Lapp, “A Handbook of Constructed Wetlands: General Considerations,” *Ecol. Eng.*, vol. 1, no. 1996, 1996, pp. 53.
 29. M. Martínez, “Manual para la identificación de Plantas Acuáticas Exóticas Invasoras en México” *IMTA*, 2018, pp. 63-65.
 30. M. Wills and K. N. Irvine, “Application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index in the Cazenovia Creek, NY, Pilot Watershed Management Project,” *Middle States Geogr.*, 1996, pp. 95–104.
 31. E. Claudio, “La contaminación del río Turbio: retos para el manejo sostenible de la cuenca hidrológica Lerma-Chapala.,” Available: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=498.>, 2018. Accesado el 11 de marzo de 2020.
 32. CONAGUA, “Tecnologías Más Limpias en la Industria de la Curtiduría en la ciudad de León, Gto.,” 2014, pp. 1–41.
 33. J. Álvarez and J. Arcibar, “Estimación del nivel de contaminación del río turbio y propuestas de atenuación química del efecto de gases corrosivos.,” *CIATEC*, 2019, pp. 30.
 34. CPML, “Manual de Buenas Prácticas Ambientales para el Sector MIPYME - Tenerife,” vol. 1, 2008, pp. 15-19.
 35. O. González Santana, “El reto de la gestión del agua en las regiones de México ante los efectos del cambio climático: el caso de la cuenca del río Turbio,” *Cuad. Geogr. Rev. Colomb. Geogr.*, vol. 22, no. 2, 2013, pp. 125–144.
 36. M. A. T. Koçer and H. Sevgili, “Parameters selection for water quality index in the assessment of the environmental impacts of land-based trout farms,” *Ecol. Indic.*, vol. 36, 2014, pp. 672–

- 681.
37. M. Castro, J. Almeida, J. Ferrer, and D. Díaz, "Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global," *Ing. Solidar.*, vol. 10, no. 17, 2014, pp. 111–124.
 38. A. Zárate and C. Durán-de-bazúa, "Remoción de contaminantes en un sistema modelo de humedales artificiales a escala de laboratorio," *Tecnol. Ciencia, Educ*, 2008, pp. 7.