

HUMEDALES ARTIFICIALES COMO UN MÉTODO VIABLE PARA EL TRATAMIENTO DE DRENES AGRÍCOLAS*

ARTIFICIAL WETLANDS AS A VIABLE TREATMENT METHOD FOR AGRICULTURAL DRAINS

Jaqueline García Hernández^{1§}, Carlos Valdés-Casillas², Lázaro Cadena-Cárdenas³, Socorro Romero-Hernández⁴, Susana Silva-Mendizábal⁵, Gamaliel González-Pérez⁶, Germán N. Leyva-García¹ y Daniela Aguilera-Márquez¹

¹Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C. (CIAD). Carretera al Varadero Nacional, km 6.6. Guaymas, Sonora, México. C. P. 85480. Tel. 01 622 2216533. (gleyva@ciad.mx), (daguilera@ciad.mx). ²Pronatura Noroeste. Núm. 10. Esq. Allende Centro, El Tesoro, Álamos, Sonora. C. P. 85760. Tel. 01 647 4280004. (cvaldes05@yahoo.com). ³University of Arizona. Geosciences Department. 1040 E. 4th Street. Gould-Simpson Building, Tucson, AZ. C. P. 85719. Tel. 00 520 6263323. (lcadenc@gmail.com). ⁴Instituto de Ingeniería. Universidad Autónoma de Baja California. *Campus* Mexicali. Calle de la Normal y Blvd. Benito Juárez s/n. Fraccionamiento Insurgentes Este, Mexicali, Baja California. C. P. 21280. Tel. 01 686 5664150. (romero@iing.mx). ⁵Instituto Tecnológico de Guaymas. Carretera al Varadero Nacional, km 4. Sector las Playitas, Guaymas, Sonora, México. C. P. 85480. Tel (622) 2216480. (anasus840@gmail.com). ⁶Instituto Tecnológico Superior de Cajeme. Carretera Internacional a Nogales, km 2. Obregón, Sonora. C. P. 85000. Tel. 01 644 4108650. (gama1771@hotmail.com). [§]Autora para correspondencia: jaqueline@ciad.mx.

RESUMEN

El presente trabajo presenta la evidencia generada por el grupo de trabajo en los últimos quince años, sobre concentraciones de contaminantes y nutrientes provenientes de drenes agrícolas que descargan en humedales y bahías de Sonora. Las investigaciones se han realizado en el valle agrícola de Mexicali con 60 puntos de muestreo, en el valle del Yaqui con 30 sitios de colecta y en costas rocosas de Sonora y Baja California con 30 puntos de colecta, se muestreo agua, sedimento y biota. Los resultados indican niveles por encima de las normas establecidas de: coliformes fecales, nutrientes, algunos metales pesados como mercurio, plomo y selenio y plaguicidas organoclorados como DDE y endosulfán. También hemos observado que drenes agrícolas que descargan en lagunas dominadas por vegetación acuática (i. e. tule), presentan concentraciones de contaminantes y nutrientes significativamente menores a sitios desprovistos de esta vegetación, siendo que ambos sistemas están expuestos a los mismos contaminantes. Por lo anterior, estamos proponiendo que se considere como una opción viable, el uso de humedales artificiales como

ABSTRACT

In this paper we present evidence generated by our working group in the last fifteen years on concentrations of pollutants and nutrients from agricultural drains that discharge into wetlands and bays of Sonora. Surveys were made in 60 sites of the Mexicali Valley, 30 sites in the Yaqui Valley and 30 sites in the rocky shores of Sonora and Baja California where samples of water, sediment, and biota were collected. Results indicate levels above established limits of: fecal coliforms, nutrients, organochlorine pesticides such as DDE and endosulfan, as well as heavy metals such as mercury, lead, and selenium. We have also observed that agricultural drains discharging in lagoons dominated by aquatic vegetation (i. e., cattail) present significant lower concentrations of contaminants and nutrients than sites lacking this kind of vegetation, considering that both systems are exposed to the same contaminants. Thus, we propose the use of constructed or artificial wetlands as a feasible option for the treatment of agricultural drains in the affected areas. This methodology has proven to be effective for the removal of nutrients, BOD, and total suspended solids in other countries. In Mexico, the

* Recibido: mayo de 2011
Aceptado: octubre de 2011

métodos para el tratamiento de drenes agrícolas en las zonas afectadas. Esta metodología ha probado ser eficiente para la remoción de nutrientes, DBO y sólidos suspendidos totales; en otros países y en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ya cuenta con casos de éxito utilizando humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales urbanas; por lo tanto, urgimos a la comunidad científica y gobierno de nuestro país a que se impulse esta tecnología en los drenes agrícolas de Sonora.

Palabras clave: descargas urbanas, drenes agrícolas, humedales artificiales, tratamiento de agua, valles agrícolas.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de riego constituye en el país 25% de la superficie total sembrada (4 millones de hectáreas), los estados que tienen mayor número de hectáreas de cultivo de riego son Sinaloa, Guanajuato y Sonora (SIACON, 2010). El uso de riego en Sonora y Sinaloa es indispensable para la producción agrícola; un componente importante en la agricultura de riego es el drenaje agrícola, el cual se utiliza para darle una salida a las aguas que se acumulan en las depresiones topográficas del cultivo, así como para controlar la acumulación de sales en el suelo.

En su trayecto los drenes agrícolas también son receptores de drenajes urbanos de comunidades rurales, que en muchas ocasiones ya no son tan pequeñas o incluso de algunas ciudades cercanas, también se acostumbra lavar fosas sépticas en los drenes o envases de plaguicidas y otros químicos tóxicos (Figura 1).

Los drenes descargan en la costa; por ejemplo, en el valle de Mexicali hemos registrado aproximadamente 40 drenes agrícolas, que descargan en los humedales y posteriormente en el alto Golfo y en el sur de Sonora, hemos identificado alrededor de 30 drenes agrícolas que descargan en las bahías de Algodones, Lobos, Tóbari, Moroncarit y Yavaros. Recientemente, la acuicultura ha ocupado mucha de la zona costera de estos dos estados y también contribuye con descargas al mar, y en ocasiones también es afectada por las descargas agrícolas.

Los principales aportes de los drenes agrícolas son sedimentos, sales, nutrientes y todos los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes en las tierras o aguas de

Mexican Institute of Water Technology (IMTA) already has successful cases using constructed wetlands for the treatment of urban sewage. Therefore, we urge to the scientific community and the government of Mexico to promote the development of this technology in agricultural drains of Sonora.

Key words: agricultural drains, urban discharge, artificial wetlands, Sonora, water treatment, agricultural valleys.

INTRODUCTION

The irrigated agriculture constitutes 25% of total cultivated areas in Mexico (4 million hectares); the states with the highest presence of irrigated agriculture are Sinaloa, Guanajuato and Sonora (SIACON, 2010). The use of irrigation in Sonora and Sinaloa is indispensable for agricultural production in these arid states. The important components of irrigated agriculture are agricultural drainage systems used for controlling water levels in crops' topographic depressions as well as accumulation of salts in the soil.

However, agricultural drains are also collectors of urban discharges of small and often mid-sized rural communities and nearby cities, as well as wastewaters resulting from washing septic tanks and containers of pesticides and other toxic chemicals (Figure 1).



Figura 1. Vista de un dren agrícola con aportes urbanos y presencia de residuos sólidos.

Figure 1. Agricultural drains with urban and solid waste.

Finally, agricultural drains discharge in coasts. For example, in the Valley of Mexicali we have registered about forty agricultural drains discharging in wetlands leading to the

cultivo. Cuando los drenes desembocan en bahías o esteros, todos estos contaminantes afectan de manera directa o indirecta a la vida marina y a los recursos de los cuales dependemos.

No hay un esfuerzo por tratar estas descargas antes que desemboquen a un cuerpo de agua; lo que hace la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es mantener los drenes limpios de sedimento y maleza, para que cumplan su función de drenaje. Sin embargo, nos parece urgente diseñar e implementar un plan nacional para el tratamiento de todos estos drenes agrícolas, que cada vez afectan más a los ecosistemas marinos y costeros, prueba de ello son las afloraciones de mareas rojas tóxicas en regiones donde no era común encontrarlas, la mortandad de peces de forma cíclica en algunos sitios como Yavaros, el asolve en bahías y los daños a la vegetación de manglar por sedimentación (i. e. Bahía del Tóbari). Por lo tanto, proponemos la utilización de métodos alternativos de tratamiento de agua a bajo costo y efectivos.

Uno de estos sistemas es el de humedales artificiales. México ya cuenta con la tecnología desarrollada y aplicada en algunos sitios como en el lago de Pátzcuaro (Urquiza-Marin *et al.*, 2006; Rodríguez-Miranda *et al.*, 2010) y en Texcoco (Arcos-Ramos *et al.*, 1999) en donde se han tenido excelentes resultados, con remociones de contaminantes y cumplimiento con las Normas Mexicanas en los efluentes. Sin embargo, hace falta un esfuerzo nacional coordinado para poder implementar un plan de tratamiento de agua de los drenes agrícolas con humedales artificiales. El presente trabajo es una revisión de los resultados que hemos obtenido en muestreos de agua, sedimento y biota en el noroeste de México en los últimos cinco años y es una justificación para la implementación de un programa nacional de tratamiento de agua de drenes agrícolas.

MATERIAL Y MÉTODOS

En el laboratorio de Ciencias Ambientales del CIAD-Unidad Guaymas, se ha estudiado los efectos de los contaminantes en los ecosistemas costeros del noroeste del país, principalmente en el alto Golfo de California y en el Sur de Sonora. En la Figura 2 se muestran los sitios de colecta que hemos realizado de algún tipo de matriz, ya sea agua, sedimento o biota. A continuación presentaremos resultados de contaminación de cada área dividida en: a) Alto Golfo; b) sur de Sonora; y c) Islas y costas rocosas.

upper Gulf, and in the south of Sonora we have identified thirty agricultural drains discharging wastewaters in the bays of Algodones, Lobos, Tobarí, Moroncarit, and Yavaros. Recently, aquaculture has occupied much of the coastal zone of these two states, contributing with discharges into the sea, and being affected by agricultural drains.

The main components of agricultural drains are sediments, salts, nutrients, and all organic and inorganic pollutants present in agricultural lands or waters. When drains are discharged into bays or estuaries, all pollutants directly or indirectly affect sea life and resources we are dependent upon.

Until now, there has been no effort to treat wastewaters before they are discharged into a water body. The National Water Commission (CONAGUA) keeps drains clean of sediments and weed so that they can work as drainages. However, it is urgent to design and implement a national plan for treating all these agricultural drains, as they are increasingly affecting the sea and the coastal ecosystems. Proof of this, are the toxic red tides in areas where they were previously uncommon, cyclical death of fish in places like Yavaros, sludge in bays, and damage to the mangrove swamp caused by sedimentation (for example the Tobarí Bay). It is thus that we are suggesting the implementation of low cost and effective alternative wastewater treatment methods.

One such system is artificial wetlands. Mexico has already developed and applied this technology in some areas, like the Patzcuaro Lake (Urquiza-Marin *et al.*, 2006; Rodríguez-Miranda *et al.*, 2010) and Texcoco (Arcos-Ramos *et al.*, 1999) with excellent results removing pollutants and fulfilling official legal standards for effluents. Nonetheless, a coordinated national effort is lacking to implement an agricultural drainage wastewater treatment plan with artificial wetlands. This work revises the results obtained in samples of water, sediment, and biota in the northeast of Mexico over the last five years; it constitutes sufficient justification for the implementation of a national program for agricultural drainage wastewater treatment.

MATERIALS AND METHODS

In the Laboratory of Environmental Sciences of the CIAD-Guaymas, the effects of pollutants in coastal ecosystems of the northeast of the country have been studied, mainly in the upper Gulf of California and the south of Sonora. The Figure



Figura 2. Estaciones de colecta del Laboratorio de Ciencias Ambientales del CIAD en la costa del Golfo de California.

Figura 2. Sample collecting sites of the Laboratory of Environmental Sciences-CIAD in the coast of the Gulf of California.

RESULTADOS

Alto Golfo de California y Delta del Río Colorado

El delta del Río Colorado se localiza al norte del alto Golfo de California, entre Sonora y Baja California, y es la histórica desembocadura del Río Colorado hacia el mar. Previo a 1900, el delta era un área con de grandes álamos, densos parches de sauces interconectados con canales y extensas lagunas de tule, carrizo y juncos, habitado por una fauna acuática y terrestre de carácter tropical incluyendo jaguares y numerosas especies de aves de marisma, patos y gansos, pelícanos y águilas.

Sin embargo, la construcción de las grandes represas en la parte alta y baja del Río Colorado (e. g. presas Hoover, Davis, Parker e Imperial), detuvo por completo el flujo natural del río, reemplazando los bosques de álamos y sauces del delta, por las grandes ciudades de la costa oeste de los Estados Unidos de América y de México y por los ricos valles agrícolas, como el de Imperial y Mexicali. No es hasta hace algunos años que hemos aprendido el valor de lo que se perdió en esta conquista, en términos de biodiversidad, funciones ambientales y riqueza cultural.

A pesar del control que se tiene del río, éste todavía puede ser impredecible, por lo que durante 1983-1985 (año Niño) por medidas de seguridad se tuvieron que abrir las

2 shows the sample collection sites for water, sediment or biota. In the following section, we will present the results of pollution for each area, divided as follows: a) upper Gulf; b) south of Sonora; and c) islands and rock coasts.

RESULTS

Upper Gulf of California and Colorado River Delta

The Colorado River delta is located at the north of the upper Gulf of California, between the states of Sonora and Baja California; it is the historical flow of the Colorado River into the sea. Before 1900, the delta was an area with high poplars, dense areas with willows interconnected to canals and lakes of typha and reeds, inhabited by an aquatic and terrestrial tropical fauna including jaguars and numerous marsh bird species, ducks, geese, pelicans and eagles.

However, the construction of big dams in the upper and lower basin of the Colorado River (Hoover, Davis, Parker, and Imperial dam) totally stopped the natural flow of the river, replacing the poplar forests and willows in the delta by the big cities of the west coast of the USA, and the rich agricultural valleys in Mexico, such as Imperial and Mexicali. It is not until recently that we have understood the value of the losses of this conquest in terms of biodiversity, environmental services and cultural richness.

Despite the control that this river has, it may still be unpredictable. During the year 1983-1985 (Niño year), due to security measurements, the dam sluice gates had to be opened (Lake Mead) to allow for a water flow into Mexico, similar to level previous to the year 1930. This period of flooding rapidly reestablished a poplar and willow riparian corridor in the banks of the old channels of the Colorado River in the agricultural valley of Mexicali. The ecological importance of this corridor was not recognized until approximately six years ago, when researchers of Sonora and Arizona made a preliminary study to map and incorporate all riparian ecosystems and wetlands in a Geographic Information System (GIS).

As a result of this study, we know now, that the riparian corridor is approximately 100 km long, with 14 000 ha and native vegetation (Zamora-Arroyo *et al.*, 2001). Diverse wetlands formed by agricultural drains in Mexicali, San Luis, and Yuma have also been described. The Cienega de Santa

compuertas de las presas (Lago Mead), para dejar pasar un flujo hacia México similar al que había antes de 1930. Este periodo de inundación reestableció rápidamente un corredor ripario de álamos y sauces a las orillas de los antiguos canales del Río Colorado en medio del valle agrícola de Mexicali. La importancia ecológica de este corredor fue reconocida hasta hace unos seis años, cuando investigadores de Sonora y Arizona realizaron un estudio preliminar, para mapear e incorporar en un Sistema de Información Geográfica (SIG), todos los ecosistemas riparios y humedales del área.

Como resultado de este estudio, sabemos que actualmente existe un corredor ripario de aproximadamente 100 km de largo y 14 000 ha⁻¹ con vegetación nativa (Zamora-Arroyo *et al.*, 2001). También se han descrito varios humedales que se han formado por los drenes agrícolas de Mexicali, San Luis y Yuma. La Ciénega de Santa Clara, es el humedal más grande de este tipo, el cual se creó a partir de 1977 con agua de drenaje agrícola sub-superficial de Yuma y tiene actualmente una superficie de 20 000 ha, de las cuales 4 500 ha están cubiertas por tule (*Typha domingensis*) (Glenn *et al.*, 1996).

Estudios recientes reportan que en la Ciénega de Santa Clara existe la población más grande del ave en peligro de extinción, palmoteador de Yuma (*Rallus longirostris yumanensis*), con 6 000 individuos anidando cada año en este sitio (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2001). Otros humedales de este tipo son el complejo del Río Hardy-El Mayor-Cucapá, que recibe drenes del valle de Mexicali, y tiene una vegetación dominante de pino salado, especie no nativa e invasiva, además de mezquites y carrizo, en donde también se encuentran algunas parejas de palmoteador de Yuma, aunque restringidas a pequeños parches de tule.

En total, el delta del Río Colorado cuenta con 60 000 ha de humedales y corredores riparios, con alrededor de 350 especies de aves y con cinco especies de fauna en peligro de extinción (vaquita marina, totoaba, palmoteador de Yuma, pez cachorrillo del desierto y gato montés). Sin embargo, muchos de los humedales sobreviven con agua de dren agrícola que en ocasiones también transporta drenaje urbano, por lo que ha habido gran interés por monitorear las condiciones de salud ambiental en esta región.

En 1977 se publicaron resultados sobre los análisis de muestras de almejas del valle de Mexicali, encontrando elevadas concentraciones de DDE en tejido (11 ppm) (Guardado-Puentes 1976), en 1988 se publicó un estudio sobre las concentraciones de mercurio (Hg), en moluscos y

Clara is the largest wetland of this type. It was created since 1977 with sub-surface agricultural wastewater in Yuma, and currently has an extension of 20 000 ha, of which 4 500 ha are covered by southern cattail (*Typha domingensis*) (Glenn *et al.*, 1996).

Recent studies report that, in the Ciénega de Santa Clara the biggest population of endangered birds Yuma Clapper Rail (*Rallus longirostris yumanensis*) can be found, with 6 000 individuals nesting every year on this site (Hinojosa-Huerta *et al.*, 2001). Other wetlands of this type are the Hardy-El Mayor-Cucapa River complex, receiving the runoff of the Mexicali Valley, with a dominant vegetation of salt cedars, invasive nonnative species, as well as mesquite and reed where some couples of Yuma clapper rail can be found.

In total, the Colorado River delta has 60 000 ha of riparian corridors and wetlands, with about 350 bird species and five endangered species (vaquita, razorback sucker, totoaba, Yuma clapper rail, pupfish, and bobcat). However, many wetlands survive with agricultural drainage wastewaters, usually also transporting urban wastewaters, making it imperative to monitor environmental health conditions in the region.

In 1977, the results of the samples of clam tissue in the Valley of Mexicali were published, finding high concentrations of DDE (11 ppm) (Guardado-Puentes, 1976). In 1988, a study about mercury (Hg) concentrations in mollusks and fish in Cerro Prieto (located in the Valley of Mexicali) reported that none of the samples exceeded or was near the maximum tolerance limit of 1 ppm (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1988). Mollusks were also analyzed to detect concentrations of chlorinated hydrocarbons in the Valley of Mexicali; the results showed low concentrations of DDE, DDT, and PCBs representing no risk for human health or the environment whatsoever (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1988).

Sometime after this, concentrations of selenium, boron, and heavy metals in birds in the Valley of Mexicali were analyzed as well (Mora and Anderson, 1995). The results indicated concentrations of selenium above standards in piscivorous birds; also, DDE concentrations in the Valley of Mexicali are higher than those in other agricultural valleys of the region like el Yaqui and Culiacan, with maximum concentrations of DDE at 11 ppm (Mora and Anderson, 1995).

The most recent studies in the Colorado River delta report that fifty percent of sediment samples collected in the Delta, exceed the mean levels of selenium found in similar arid

peces de Cerro Prieto (localizado en el Valle de Mexicali), donde se reporta que ninguna de las muestras se acercó ni excedió el límite de tolerancia de 1 ppm (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1988). También se analizaron moluscos para detectar concentraciones de hidrocarburos clorados en el Valle de Mexicali, sus resultados mostraron concentraciones de DDE, DDT y BPC's que no representan un riesgo para la salud humana y al ambiente (Gutiérrez-Galindo *et al.*, 1988).

Posteriormente, se analizaron las concentraciones de selenio, boro y metales pesados en aves del valle de Mexicali, encontrando concentraciones de selenio arriba de lo recomendado en aves piscívoras (Mora y Anderson, 1995), también se encontró que las concentraciones de DDE en aves del valle de Mexicali, son mayores a las encontradas en aves de otros valles agrícolas de la región, como el Yaqui y Culiacán con valores máximos de 11 ppm de DDE (Moray Anderson, 1995).

Los estudios más recientes en el delta del Río Colorado, reportan 50% de las muestras de sedimento colectadas en el delta exceden los niveles medios de selenio encontrados en regiones áridas similares y 20% de estas muestras pueden afectar a los organismos bentónicos y a la cadena alimenticia, también se encontró 20% de los peces colectados pueden afectar a las aves piscívoras. Un 86% de las muestras de peces e invertebrados colectados presentan DDE y 26% DDT. Las concentraciones eran bajas; sin embargo, 30% de las muestras excedieron los niveles recomendados para especies sensibles (García-Hernández *et al.*, 2001).

Con base en mapas digitalizados del área y fotos aéreas, se localizaron todos los drenes agrícolas que descargan sobre el Río Colorado o en los humedales, posteriormente se hicieron dos muestreos, uno en febrero y otro en junio de 2005, en donde se colectó agua, sedimento y biota (si había disponible) de cada dren agrícola en su desembocadura al río o al humedal. En total se muestrearon 60 puntos en el delta del Río Colorado.

Se localizaron un total de 40 descargas agrícolas y urbanas hacia los diferentes sistemas de humedales del Río Colorado, la mayor parte de las descargas se encuentran al sur de la zona agrícola del valle y solamente 4 se detectaron sobre el Río Colorado.

Los contaminantes que se presentaron en concentraciones que pudieran afectar a la vida silvestre, al ecosistema o a los usuarios fueron el selenio (Se), los plaguicidas DDE y endosulfán, alta salinidad y el indicador de contaminación

regions. Twenty percent of these samples can affect benthic organisms and the food chain as twenty percent of collected fish may affect piscivorous birds. Around 86% of samples of collected fish and invertebrates present DDE and 26% DDT. Even if the concentrations were generally low, thirty percent of samples exceeded the levels recommended for susceptible species (García-Hernández *et al.*, 2001).

Based on digital maps and aerial photographs, all agricultural drains discharging into the Colorado River or nearby wetlands were located. Afterwards, two sample collections were programmed; the first one took place in February and the second one in June 2005. At the discharge point into a river or wetland, of each agricultural drain, water, sediments, and biota (when available) were collected. In total, 60 different points in the Colorado River Delta were sampled.

A total of 40 agricultural and urban drains were located in the different wetlands surrounding the Colorado River, most discharge points were located to the south of the agricultural valley; only four discharge points were located directly in the Colorado River.

Pollutants found in concentrations that may affect wildlife, the ecosystem, and users were selenium (Se), pesticides DDE and endosulfan, high salinity, fecal pollution indicators, and *Escherichia coli*. The sites with the highest concentrations of sediments with selenium are the north of the Hardy River and the east bank. High concentrations of DDE in water were found in the Hardy River and the discharge point of the San Luis R.C. drainage. In sediments, DDE only concentrates in the Hardy River; in fish, concentrations are higher in the south, in a centralizing drainage located between the Hardy and Colorado River.

Taken together, water, sediment and fish, we identify ten points with high levels of DDE; five in the Hardy River, two in the south and one in San Luis. As a result of this analysis we may consider that the ecosystems of the Ciénega de Santa Clara, El Doctor, and the riparian corridor of the Colorado River present less problems of DDE bioaccumulation; this is good news for the restoration program currently underway at the Colorado River. Also, we believe the 4 500 hectares of cattail in the Ciénega de Santa Clara help filtrate pollutants from agricultural drains, making it desirable for future restoration projects to include emergent aquatic plants in order to improve environmental conditions.

fecal, *Escherichia coli*. Los sitios de mayores concentraciones de selenio en sedimento se observan en el sistema del Río Hardy norte y sobre el bordo este. Las concentraciones de DDE en agua se muestran altas en el Río Hardy y a la salida del dren San Luis Río Colorado. En sedimento, el DDE únicamente se concentra en el Río Hardy; y en peces, las concentraciones son mayores en organismos del dren del sur, un dren concentrador localizado entre el Hardy y el Colorado.

Si sobreponemos la capa de agua, sedimento y peces, se identifican 10 puntos con altos niveles de DDE, cinco sobre el Río Hardy, dos sobre el dren del sur y uno en el dren San Luis. Como resultado de este análisis podemos considerar que los ecosistemas de la Ciénega de Santa Clara, El doctor y el corredor ripario del Río Colorado presentan menores problemas debido a bioacumulación de DDE, lo cual es buena noticia para el programa de restauración que se está realizando en el Río Colorado. También creemos que las 4 500 ha de tule en la Ciénega de Santa Clara, ayudan a filtrar los contaminantes que pudieran estar llegando de los drenes de entrada, por lo que futuros proyectos de restauración podrían incluir plantas acuáticas emergentes para mejorar las condiciones ambientales.

Otro contaminante organoclorado persistente que detectamos en concentraciones altas fue el endosulfán, este plaguicida se utiliza principalmente en el algodón, por lo que las mayores concentraciones se encontraron en el muestreo de verano en sedimento. Los sitios de mayores concentraciones de endosulfán se encuentran en el dren perimetral y en un punto sobre el Río Hardy estos dos sitios pudieran presentar problemas en cuanto a bioacumulación de este compuesto en peces.

Las altas salinidades presentes en los suelos del delta del Río Colorado, son resultado de las concentraciones naturales de sales que acarrea el Río Colorado, desde su nacimiento en las montañas de Colorado en Estados Unidos, conforme aumenta la temperatura, el agua se evapora y la salinidad aumenta, por lo que el agua del Río Colorado llega a México con salinidades promedio anuales de 800 ppm, esta salinidad aumenta al pasar por los campos agrícolas y termina con un promedio diez veces mayor, 8 000 ppm en el Río Hardy, por ejemplo. En la parte de los humedales los puntos con mayores salinidades están sobre el Río Hardy norte y sobre el dren del sur.

El Río Colorado, los drenes del bordo y la Ciénega de Santa Clara tienen relativamente una salinidad menor; por lo tanto, en el Río Hardy es necesario asegurar agua de otra fuente,

Another persistent organochlorine pollutant detected in high concentrations was endosulfan. This pesticide is mainly used for cotton, accounting for higher concentrations found in summer samples in sediments. The places with highest concentrations of endosulfan were a point at the Hardy River and the perimeter drain; these two sites could present important problems of bioaccumulation of this compound in fish.

High salinity in the soils of the Colorado River Delta is a result of the natural concentration of salts carried by the Colorado River from its source in the Colorado Mountains in the USA; as temperature augments, water evaporates and salinity increases, which explains why waters from the Colorado River reach Mexico with an average annual salinity levels of 800 ppm. This salinity augments as it passes by agricultural fields and ends up with an average ten times as high, 8 000 ppm at the Hardy River, for example. In wetland areas, the points with highest salinity are north of the Hardy River and in the south.

In the Colorado River, the perimeter drain and the Cienega de Santa Clara have a relatively lower salinity level. Thus, in the Hardy River it is necessary to guarantee an alternative water source to decrease salinity levels and undertake restoration projects. An alternative source could be treated waters from Las Arenitas. Another problem detected were the concentrations of fecal coliforms in recreational sites at the Colorado River delta. Water samples were taken at the Hardy River, the Colorado River, and the Cienega de Santa Clara in 2006. The most affected out of the three was the Hardy River, with average levels of *Escherichia coli* at 900 MPN per 100 ml, which exceeds official standards set at 240 MPN per 100 ml in the norm NOM-003-ECOL-1997 for publicly reused waters (Romero *et al.*, 2010).

In the Hardy River we evaluated the effects of discharges from Las Arenitas treatment plant, where 50% of wastewaters from Mexicali are treated. The concentrations of *E. coli* decreased after waters were discharged into the Hardy River. However, it is noteworthy that there was a three months period when the treatment plant was not working properly and discharges reported concentrations of *E. coli* above 700 000 MPN per 100 ml. Fortunately, the treating system was enhanced and currently levels of fecal coliforms have decreased in the Hardy River.

como el agua tratada de las Arenitas, para poder disminuir la salinidad y poder realizar proyectos de restauración. Otro problema que detectamos, fueron concentraciones de coliformes fecales en sitios de recreación en el delta del Río Colorado, se han muestreado aguas del Río Hardy, Río Colorado y Ciénega de Santa Clara en 2006, y el ecosistema más impactado de estos tres es el Río Hardy, los niveles promedio de *Escherichia coli* encontrados en el Río Hardy fueron de 900 NMP por 100 ml, lo cual excede la NOM-003-ECOL-1997 de 240 NMP por 100 ml de agua para reúso público (Romero *et al.*, 2010).

En el Río Hardy evaluamos los efectos de la descarga de la planta de tratamiento Arenitas que trata 50% del drenaje de Mexicali. Las concentraciones de *E. coli* disminuyeron después de la incorporación de agua tratada al Río Hardy; sin embargo, cabe mencionar que hubo un periodo de tres meses en donde la planta no funcionó adecuadamente y las descargas rebasaron los 700 000 NMP por 100 ml de *E. coli*, afortunadamente, se trabajó para mejorar el sistema y actualmente los niveles de coliformes han disminuido en el Río Hardy.

Otro parámetro que ha mejorado con la entrada de agua tratada de Arenitas, es la salinidad; en promedio los sólidos disueltos totales (mg L^{-1}) han disminuido de $6\,000\ \text{mg L}^{-1}$ a $4\,000\ \text{mg L}^{-1}$, esta disminución permitirá el establecimiento de vegetación nativa en sitios de restauración. Sin embargo, los nutrientes se han incrementado con la entrada de la descarga de Arenitas, ha habido cambios en el color del agua, de café antes de la descarga a verde después de un tiempo de operar la planta, debido a la proliferación de algas y se ha observado eutrofización en algunos segmentos del río y varios eventos de mortalidad de peces, probablemente derivado de falta de oxígeno o concentraciones altas de amonio.

En el Cuadro 1, se observa que los metales pesados en el río no excedieron la NOM-001-ECOL-1996, para descargas a bienes nacionales en agua y sedimento; sin embargo, los niveles de plomo y arsénico en peces estuvieron por encima de lo recomendado en la norma NOM-027-SSA para productos de la pesca (U. S. EPA, 2000).

Another parameter that has improved with discharges of treated wastewaters from Las Arenitas is salinity. On average, Total Dissolved Solids (mg L^{-1}) have decreased from $6\,000\ \text{mg L}^{-1}$ to $4\,000\ \text{mg L}^{-1}$; this diminution will enable native vegetation to flourish in restoration sites. Nonetheless, levels of nutrients have increased with discharges of treated wastewaters from Las Arenitas. There have been changes in water color from brown to green after the plant operated for a while, due to the proliferation of algae; also, eutrophication has taken place in some river segments, and there have been various events of fish mortality probably due to lack of oxygen or high ammonium concentrations.

Table 1, the heavy metals in the river did not exceed official norm NOM-001-ECOL-1996 for discharges in water and sediments in national goods. However, levels of lead and arsenic in fish were above the norm NOM-027-SSA regulating fishery products (U. S. EPA, 2000).

The Cienega de Santa Clara is a wetland located in the eastern part of the Colorado River delta (Figure 3). It is covered with emerging vegetation up to eighty percent, mainly by *Typha domingensis*. Its main tributary is the Bypass drain, with a flow of approximately $5\ \text{m}^3\ \text{s}^{-1}$, coming from Arizona. It has a secondary affluent, the Riito-Santa Clara drain, generated in the valley of San Luis Rio Colorado in Sonora, representing 3% of the volume of the Bypass drain. Results of this research demonstrate that nutrients and contaminants have been consistently lower than those found in other ecosystems of the Colorado River Delta.

In 2007, levels of nitrates in the Bypass drain were analyzed, resulting in an average concentration of $5.6\ \text{mg L}^{-1}$, and $2.5\ \text{mg L}^{-1}$ in Riito. Within the zone with vegetation, nitrate concentrations were $2.7\ \text{mg L}^{-1}$ on average. Ammonium concentrations were $0.5\ \text{mg L}^{-1}$ at discharge points and in the zone with vegetation. Phosphates had an entry point concentration of 0.6 in Riito and 0.4 at the Bypass; in the zone with vegetation $0.3\ \text{mg L}^{-1}$ were detected. Thus,

Cuadro 1. Concentraciones de metales pesados en diferentes matrices colectadas en el Río Hardy en febrero 2010.
Table 1. Concentrations of heavy metals in different matrixes collected at the Hardy River in February 2010.

| Matriz | N | As | Cd | Cu | Hg | Pb | Se |
|---------------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Agua | 20 | 0.124 | 0 | 0 | 0.008 | 0.063 | 0.004 |
| Sedimento | 20 | 28.764 | 3.097 | 0.151 | 0.395 | 9.797 | 0.882 |
| Tejido de pez | 140 | 7.235 | 0.197 | 0.02 | 0.328 | 5.528 | 1.13 |

La Ciénega de Santa Clara es un humedal localizado en la parte este del Delta del Río Colorado (Figura 3), está cubierto en casi 80% con vegetación emergente, principalmente *Typha domingensis*, tiene una canal de entrada principal que es el dren Bypass con un flujo de aproximadamente $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, proveniente de Arizona y una entrada secundaria que es el dren Riito-Santa Clara, generado en el valle de San Luis Río Colorado, Sonora; el cual representa 3% del volumen del dren Bypass. Los resultados expuestos en esta investigación demuestran que los nutrientes y contaminantes, consistentemente han sido menores que los que localizados en los otros ecosistemas del Delta del Río Colorado.

En 2007 se analizaron los niveles de nitratos en el dren Bypass resultando en un promedio de 5.6 mg L^{-1} y en Riito con 2.5 mg L^{-1} . Dentro de la zona de vegetación, los nitratos promediaron 2.7 mg L^{-1} . El amonio tuvo un promedio de 0.5 mg L^{-1} en las entradas y también en la zona de vegetación y los fosfatos entraban con una concentración de 0.6 en Riito y 0.4 en el Bypass, ya adentro se detectaron 0.3 mg L^{-1} . Por lo tanto, se observó una disminución importante en las concentraciones de nutrientes dentro del humedal, probablemente debido a la presencia de tule y algunas lagunas abiertas entre la vegetación.

Las concentraciones de metales en agua, sedimento y tejido fueron menores a las encontradas en el Río Hardy. Las concentraciones de metales a la entrada no fueron diferentes a las concentraciones en la zona con vegetación, con excepción del mercurio, que entró con una concentración en agua de 11 ppm, y en la zona interior promedió 3 ppm, y en sedimento, entró con una concentración de 0.4 ppm y en el interior disminuyó a 0.2 ppm, también probablemente debido a la presencia de vegetación emergente.

Las concentraciones de plaguicidas organoclorados, organofosforados, piretroides y PCBs en la Ciénega de Santa Clara, no mostraron concentraciones por encima de los límites recomendados en ninguna matriz (agua, sedimento y organismos). En tejido de peces, las concentraciones de Aldrin y DDE no excedieron los límites de la U. S. EPA.

Las descargas agrícolas del Valle de Mexicali, son los que mantienen vivos a los ecosistemas remanentes del delta del Río Colorado; sin embargo, la aportación de nutrientes, metales pesados y plaguicidas, representa una carga para estos ecosistemas, por lo que se han mantenido con una baja diversidad acuática y poca abundancia. Los programas

an important decrease in nutrient concentrations was observed inside the wetlands, probably due to presence of cattail and to vegetation in some open pools.

The concentrations of metals in water, sediments, and tissues were lower than those found at the Hardy River. The concentrations of metals in discharge points were no different to concentrations in the areas with vegetation, excepting mercury with a concentration of 11 ppb at entry point and an average 3 ppb inside the wetlands. In sediments, initial mercury concentrations were 0.4 ppm, decreasing to 0.2 ppm in the interior, possibly also due to the presence of emerging vegetation.

Concentrations of organochlorine pesticides, organophosphates, pyrethroids and polychlorinated biphenyls in the Ciénega de Santa Clara did not show concentrations above official standards in any matrix (water, sediment, organisms). In tissues of fish, the concentrations of Aldrin and DDE did not exceed the limits set by the U. S. EPA.

Agricultural discharges in the Valley of Mexicali keep remnant ecosystems in the Colorado River Delta alive. However, the presence of nutrients, heavy metals, and pesticides represents a burden for these ecosystems keeping a low aquatic biodiversity and lack of abundance. Restoration programs already consider artificial wetlands as a complementary treatment to improve water quality and the overall conditions in these wetlands. Besides, important efforts are being undertaken in order to preserve wetlands such as the Ciénega de Santa Clara, which maintains levels of contaminants lower than in other areas and wetlands of the delta. Possibly, this is due to the high density of emergent vegetation in its pools, and as its primary water source has low levels of pollutants.

South of Sonora

The south of Sonora is considered as an area of high biodiversity by CONABIO; besides, estuaries in this area are of vital importance for bird preservation. However, over the last twenty years, agricultural development and aquaculture have modified more than 70% of natural wetland areas, and the remaining 30% is threatened by factors such as pollution, eutrophication, and habitat destruction. The aim of this study is to establish the level of pollution in these wetlands and suggest restoration solutions.

de restauración ya están considerando la construcción de humedales artificiales, para mejorar la calidad de agua y las condiciones humedales naturales. Por otro lado, se están haciendo esfuerzos necesarios para conservar humedales como la Ciénega de Santa Clara, que mantiene niveles de contaminantes más bajos que el resto de los humedales del delta, debido a la alta densidad de vegetación emergente en sus lagunas y bajos niveles de contaminantes de la fuente principal de agua.

Sur de sonora

El sur de Sonora es considerado como un área de alta biodiversidad por la CONABIO, además que los esteros de esta zona son áreas de importancia para la conservación de aves o AICAs. Sin embargo, en los últimos veinte años, el desarrollo agrícola y acuícola ha modificado 70% de las zonas naturales de humedales y el restante 30% está amenazado por factores como destrucción de hábitat, eutrofización y contaminación. El objetivo de nuestros estudios es determinar el grado de contaminación de estos humedales y proponer soluciones para su restauración.

Utilizando las coberturas de drenes agrícolas y ríos del programa de ordenamiento ecológico de la costa sur de Sonora se localizaron los drenes agrícolas y urbanos que descargan en los humedales costeros del sur de Sonora. Posteriormente se corroboró esta información con una salida de campo para la localización de los sitios más adecuados y accesibles en los municipios de Obregón, Navojoa y Huatabampo. En estos sitios se colectaron muestras de agua, sedimento y biota para análisis de metales y plaguicidas.

Se localizaron un total de 28 descargas puntuales hacia cuerpos de agua nacionales, los esteros que reciben mayor cantidad de drenes son los del Tobarí y Yavaros. De los metales analizados en agua, sedimentos y organismos acuáticos, el mercurio excedió las normas oficiales y valores recomendados en sedimento y organismos. La presencia de Hg se localizó en un dren que desemboca en el estero Yavaros; como consecuencia de esta contaminación, el estero de Yavaros ya presenta una bioacumulación de Hg en invertebrados bentónicos de importancia comercial, como es el camarón.

El uso de plaguicidas en los valles del Yaqui y Mayo consiste principalmente en plaguicidas organofosforados, siendo el más común el metamidofos. Sin embargo, aún se utiliza en cantidades importantes el endosulfán, que es un compuesto

Using the covers of agricultural drains and river drains from the program of environmental ordering of the southern coast of Sonora, we located agricultural and urban drains discharging in coastal wetlands to the south of Sonora. Afterwards, this information was corroborated in a field trip to locate the most adequate and accessible sites in the municipalities of Obregón, Navojoa, and Huatabampo. In these sites, samples of water, sediment, and biota were collected and analyzed for heavy metals and pesticides.

A total of 28 point discharges into federal water bodies were located; estuaries receiving most drains are Tobarí and Yavaros. Of the metals analyzed in water, sediments, and aquatic organisms, mercury exceeded the levels recommended in official standards in sediments and organisms. Mercury traces were found in the drain that discharges at the Yavaros estuary. As consequence of this pollution, the Yavaros estuary presents a bioaccumulation of mercury in benthonic invertebrates of commercial importance such as shrimps.

The use of pesticides in the valleys of Yaqui and Mayo is mainly of organophosphates; the most common is methamidophos. However, significant quantities of endosulfan are still used despite being a chlorinated compound bioaccumulating in aquatic ecosystems. The use of these pesticides may affect migrating birds as they come into direct contact with chemicals in the fields as well as aquatic organisms due to discharges from agricultural drainage in estuaries.

Organochlorinated compounds are persistent and may be present in ecosystems for years. In the present study, we detected concentrations of DDT and DDE in crabs (*Uca princeps*) in the Tobarí estuary. The rest of the samples of water, sediment, and organisms in other estuaries presented low pesticide concentration levels.

In a more specific study in the Moroncarit estuary, flows in the main entry drain were measured; discharges vary between $2.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in summer and $7.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in winter. This is due to irrigation cycles, as in winter wheat cultivation is more intensive than in summer when the cultivated areas considerably decrease. In the main entry, concentrations of fecal coliforms in the Moroncarit estuary were 92 000 MPN (24 hour average) which exceeds the limits set by official norm NOM-001 for discharges in federal waters and goods. Inside the estuary, concentrations were 3 500

clorado que se bioacumula en los ecosistemas acuáticos. El uso de estos plaguicidas puede afectar a las aves migratorias que hacen uso de los campos agrícolas, al estar en contacto directo con los químicos y también a los organismos acuáticos, al recibir agua de dren agrícola en los esteros.

Los compuestos organoclorados son persistentes y pueden estar presentes en un ecosistema años después de su aplicación. En este estudio se detectaron concentraciones de DDT y DDE en cangrejos (*Uca princeps*) del estero Tobari. El resto de las muestras de agua, sedimento y organismos de los demás esteros, presentaron valores por debajo del nivel de detección o concentraciones muy bajas de plaguicidas.

En un estudio específico en el estero de Moroncarit, se midió el flujo de entrada del dren principal, la descarga varía entre $2.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en verano a $7.8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en invierno. Esto se debe a los ciclos de riego, ya que en invierno se cultiva más área con trigo y en verano los cultivos bajan considerablemente. Las concentraciones de coliformes fecales a la entrada del estero Moroncarit fueron de 92 000 NMP (promedio 24 h), lo cual excede el límite permitido por la norma NOM-001 para descargas en aguas y bienes nacionales. Dentro del estero, las concentraciones fueron de 3 500 NMP de *E. coli*, lo cual es mucho mayor a los 200 NMP por 100 ml recomendado por la U. S. EPA, para actividades recreativas que se llevan a cabo en el estero.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) excedió los 150 mg L^{-1} en verano del dren de entrada. Las concentraciones de nitrógeno total (inorgánico más orgánico), estuvieron por encima de lo recomendado por la NOM-001 en todos los sitios. Dentro del estero estas altas concentraciones de nitrógeno pueden causar eutrofización. Los niveles de fosfatos en abril estuvieron por encima de 0.1 mg L^{-1} que recomienda la U. S. EPA para protección de ecosistemas riparios. Se analizaron los siguientes metales: cadmio, plomo, mercurio, cromo VI, cobre, cianuro, níquel y zinc en agua, en sedimento se analizó Cd, Pb y Hg; ninguno de los valores analizados en muestras de agua excedieron la NOM-001.

La calidad del agua que llega a los esteros del sur de Sonora es baja, las cargas de nutrientes y coliformes son muy altas y los ecosistemas receptores están siendo contaminados y afectan a las comunidades que dependen de la pesca en estos esteros. La variación en los flujos es un factor que se debe tomar en cuenta para proyectos de tratamiento de aguas.

MPN of *E. coli*, value that well surpasses the 200 MPN per 100 ml recommended by the U. S. EPA for estuaries with recreational activities.

The biochemical oxygen demand (BOD_5) exceeded 150 mg L^{-1} in summer at entry point. The total concentrations of nitrogen (inorganic plus organic) were above norm NOM-001 in all places. Inside the estuary, high nitrogen concentrations can cause eutrophication. Phosphate levels in April were above the 0.1 mg L^{-1} recommendation of the U. S. EPA for riparian ecosystems. The following metals were analyzed: cadmium, lead, mercury, chrome IV, copper, cyanide, nickel, and zinc in water; in sediment, Cd, Pb, and Hg were analyzed. None of the values analyzed in water samples excelled norm NOM-001.

The quality of water reaching estuaries in the south of Sonora is low, it is highly charged with nutrients and coliforms, contaminating receiving ecosystems and affecting the communities that fish in these estuaries. Variation in flows is a factor that must be taken into account for wastewater treatment projects.

Rocky coasts and islands

We undertook sampling of isopoda *Ligia* spp. in the rocky coasts of the Gulf of California with the goal of using this organism as biomonitor species a species indicating the level of pollution. Preliminary results indicate a positive relation between concentrations of heavy metals and the presence of urban centers and mines, as well as the concentrations organic compounds had in relation with presence of agricultural fields in the coastal zone. In the San Pedro Mártir Island we sampled three matrices (water, sediment, and fish) finding detectable levels of organochlorinated pesticides in sediment, indicating the influence of agricultural activities in the coasts of Sonora towards the islands in the Gulf.

DISCUSSION

Given the special characteristics of drains as a variable flow, the important number of them (approximately one hundred in two agricultural valleys of Sonora), high concentrations of nutrients, fecal coliforms, and low salinity we suggest the use of artificial wetlands

Costas rocosas e islas

Hemos realizado muestreos de isópodos *Ligia* spp. en las costas rocosas del Golfo de California, con el objetivo de utilizar a este organismo como especie indicadora de contaminación o especie biomonitora. Resultados preliminares indican una relación positiva entre las concentraciones de metales pesados y la presencia de centros urbanos y minas, y las concentraciones de compuestos orgánicos tuvieron una relación con la presencia de campos agrícolas en la zona costera. En la Isla San Pedro Mártir realizamos un muestreo de las tres matrices (agua, sedimento y peces), se encontraron niveles detectables de plaguicidas organoclorados en sedimento, que indica influencia de las actividades agrícolas de las costas de Sonora hacia las islas del golfo.

DISCUSIÓN

Debido a las características especiales de los drenes como un flujo variable, gran número (c. a. de 100 en dos valles agrícolas de Sonora), altas concentraciones de nutrientes, coliformes fecales y que cuentan con una salinidad baja, proponemos utilizar un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de estos drenes. Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua que consiste en estanques poco profundos (preferentemente menores a 1 m) o canales, que han sido plantados con vegetación acuática y que dependen de procesos microbiológicos y físicos naturales para tratar el agua residual.

Generalmente tienen un revestimiento de arcilla o sintético y cuentan con ingeniería para controlar la dirección del flujo, los tiempos de retención y el nivel del agua. Dependiendo del tipo de sistema, pueden tener o no un medio poroso inerte como roca, grava o arena. Se inicia con un tratamiento primario por medio de lagunas de sedimentación al agua de drenaje crudo, este efluente es el que se dirige a un humedal artificial para tratamiento secundario, se genera un efluente el cual se puede desinfectar por medio de cloro para obtener una descarga final (Figura 3).

for treating them. An artificial wetland is a wastewater treatment system that consists of shallow ponds (preferably less than a meter) or canals, planted with aquatic vegetation and depending on microbiological and natural physical processes to treat waters.

Generally, they have a clay or synthetic cover, with an engineered system to control the flow's direction, retention times, and water levels. Depending on the type of system, they may or may not have a porous component like rock, gravel or sand. Primary treatment begins with sedimentation pools to crude drainage waters; this effluent is directed to artificial wetlands for secondary treatment, then an effluent is generated which can be treated with chlorine to obtain a final discharge (Figure 3).

The components of an artificial wetland with a superficial flow system are: entry of the influent to the lagoon into zone 1, covered by emergent vegetation (it may be cattail, reed or a combination of both) and floating plants such as Virginia pepperweed, with a maximum height of 0.75m and anaerobic conditions. Subsequently, water passes into Zone 2, where there is an open water surface in aerobic conditions at a height greater than 1.2 m, with submerged growth plants. Finally, water passes to zone 3 fully vegetated with anoxic conditions and a depth of less than 0.75 m; this is the water outlet zone where it goes to the disinfection area (Figure 4).

The central mechanisms of a surface water flow system are the sedimentation of total suspended solids, metals, phosphorus, organic nitrogen, and detritus in roots and plants of emergent plants, and floating matter that is trapped and absorbed by the roots of floating plants. The removal process in this area is due to flocculation, sedimentation, adsorption, and anaerobic reactions. Afterwards at the oxic zone, the following processes take place: the biochemical oxygen demand (BOD) oxidation, the nitrification of ammonia into nitrates, the generation of oxygen by submerged plants leading to biologic aerobic transformation in the bottom of the lagoon, as well as the death of pathogens by solar light and retention time.

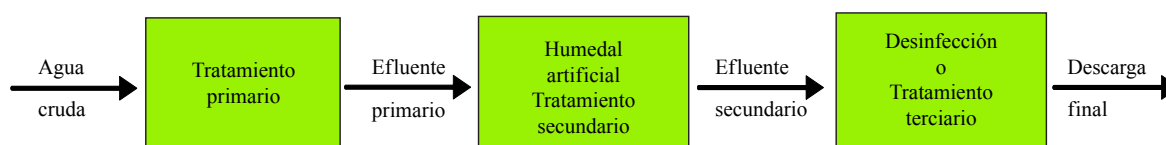


Figura 3. Diagrama de flujo de un humedal artificial (U. S. EPA, 1999).
Figure 3. Flow diagram of an artificial wetland (U. S. EPA, 1999).

Los componentes de un humedal artificial con sistema de flujo superficial son: entrada de la laguna a la zona 1 completamente cubierta de vegetación emergente (pueden ser plantas de tule, carrizo, junco o una combinación de éstas) y plantas flotantes como la lentejilla, la altura es menor a 0.75 m y son condiciones anaeróbicas; posteriormente el agua pasa a una zona 2, en donde hay superficie abierta de agua con condiciones aeróbicas una profundidad mayor a 1.2 m y con crecimiento de plantas sumergidas. Finalmente el agua pasa a la zona 3, completamente cubierta de vegetación con condiciones anóxicas y profundidad menor a 0.75 m, y el agua sale hacia el área de desinfección (Figura 4).

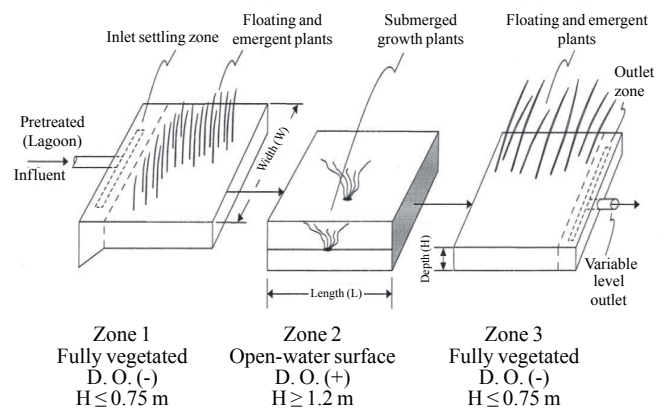


Figura 4. Sistema de flujo superficial de un humedal artificial (U. S. EPA, 1999).

Figure 4. Artificial wetland surface flow system (U. S. EPA, 1999).

Los mecanismos que dominan un sistema de flujo superficial son la sedimentación de sólidos suspendidos totales, metales, fósforo, nitrógeno orgánico y detritos en raíces y tallos de las plantas emergentes y la materia flotante es atrapada y absorbida en las raíces de las plantas flotantes. El proceso de remoción en esta zona es debido a floculación, sedimentación, adsorción y reacciones anaerobias. Posteriormente en la zona óxica se lleva a cabo la oxidación del DBO, la nitrificación de amonía a nitratos, la generación de oxígeno por las plantas sumergidas en la zona del fondo de la laguna llevando transformaciones aeróbicas biológicas, también se da la mortalidad de patógenos por luz solar y tiempo de retención.

Posteriormente en la zona 3 se pueden dar procesos de desnitrificación, en donde los nitratos generados en la zona óxica se transforma en nitrógeno volátil, y se vuelven a llevar a cabo procesos anaeróbicos con la materia orgánica e inorgánica restante (U. S. EPA, 1999).

Hay algunas consideraciones a tomar muy en cuenta para estos sistemas, las plantas invasivas pueden ser un problema por lo que hay que tratar de utilizar plantas nativas o plantas que generalmente se encuentren en esa zona, no importar plantas de otros sitios que puedan causar daño en los mismos drenes. Otro problema es la generación de mosquitos y sus enfermedades como el dengue, este problema se puede combatir con la presencia de pez mosquito, y con uso de larvicida como el *Bacillus sphaericus*, el cual ha mostrado ser bastante eficiente en estos sistemas y de baja toxicidad.

También es delicado que la gente use estos humedales para recreación o pesca, ya que no son lagunas naturales, son plantas de tratamiento y la presencia de la gente debe estar restringida a las lagunas finales para evitar problemas de salud. Otra consideración importante es la tenencia de la tierra, ya que muchas veces estas zonas ya están vendidas para granjas

Lastly, in zone 3 we find desnitrification processes where nitrates that had been generated in the oxic zone are transformed into volatile nitrogen, and again, anaerobic processes with the remaining organic and inorganic matter take place (U. S. EPA, 1999).

There are some important considerations for these systems. Invasive plants can become a problem, and thus it is important to use native plants that can be found in the area instead of importing plants from other places that may cause damage in the drains. Another problem is the generation of mosquitoes and diseases such as dengue fever, this problem can be overcome with the presence of mosquitofish and the use of larvicides such as *Bacillus sphaericus* which has proven to be efficient for these systems and of low toxicity.

It is also important to control the use of constructed wetlands for recreational purposes or fishing given that they are not natural lakes but wastewater treatment plants. In order to overcome health problems, only the final lagoon should have public access. Another important consideration is earth tenure; Often, these regions are already sold for aquaculture and touristic developments, making it imperative to designate specific water treatment areas either by the National Water Commission (CONAGUA) or by each irrigation district.

For agricultural drains, we propose designing wetlands of one hectare length-wise parallel to the drain, where water enters the wetland and has its retention time prior to exiting the drain; these systems could be built alongside each drain discharging at the sea, notably decreasing the amount of nutrients, coliforms, and solids discharged.

acuícolas o desarrollos turísticos, por lo que es urgente designar áreas especiales para tratamiento, ya sea por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) o por el distrito de riego.

Para los drenes agrícolas proponemos un diseño de humedal de una hectárea en forma alargada que vaya paralelo al dren, donde el agua entre al humedal, tenga su tiempo de retención y salga de nuevo al dren, estos sistemas se pueden construir a lo largo de cada dren que descarga al mar, disminuyendo notablemente la carga de nutrientes, coliformes y sólidos. En 1993 este sistema tuvo un costo de aproximadamente 1 millón de pesos en Estados Unidos de América, lo que incluye trabajo de maquinaria, plomería y siembra de plantas. En nuestro caso, el agua que viene de los drenes podría entrar directo a los humedales, ya que lleva un pre-tratamiento al llevar varios kilómetros de recorrido por el dren, y la salida probablemente no requeriría de cloración. Este es solo un ejemplo, pero hay muchos otros diseños con datos de costos e ingeniería que se pueden consultar (U. S. EPA, 1999).

CONCLUSIONES

Los drenes agrícolas de Sonora que desembocan en la costa del Golfo de California sin tratamiento previo, constituyen un problema que no ha sido atendido adecuadamente y que cada vez afecta más a la salud del medio ambiente y sus pobladores.

Se requiere de la integración de un equipo de trabajo interdisciplinario y con la participación de instancias gubernamentales, para coordinar un programa de tratamiento de agua de drenes agrícolas a nivel nacional.

Proponemos que el uso de humedales artificiales, sea una parte central del programa de tratamiento de agua de drenes, así como el monitoreo y la restauración de humedales.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras(es) agradecen a: CONACYT-SEMARNAT, proyecto SEMARNAT-2002-C01-0033, WWF-Golfo de California proyecto QR68, Border Environmental Cooperation Commission, BECC, proyecto CONTA08-008, University of Arizona, P500765, Texas A&M-CONACYT, proyecto 2008-030, Pronatura Noroeste, proyecto Moroncarit, CONANP, proyecto CONANP/26/AP19/PROCOCODES/04/08.

In 1993, the cost of this system was approximately one million Mexican pesos in the USA, including machinery, planting of plants, and plumbing. In Mexico, water coming from drains could enter wetlands directly as it has already travelled many kilometers and it might not need chlorination at the exit point. This is only one example, but there are many other designs with varying data and engineering costs to be consulted (U. S. EPA, 1999).

CONCLUSIONS

The agricultural drains in Sonora discharging in the coast of the Gulf of California without any treatment at all constitute an important problem that has not received enough attention, and is increasingly affecting the health of the population and the environment as well.

It is necessary to integrate an interdisciplinary research team with the participation of the government at different levels, in order to coordinate an agricultural drainage wastewater treatment program at federal level.

We propose that the use of artificial wetlands could be a central part of the program of drainage wastewater treatment, together with the monitoring and restoration or natural wetlands.

End of the English version



LITERATURA CITADA

- Arcos-Ramos, R.; Cantellano de Rosas, E.; Alejo-Nabor, M. L.; García-Morales, R. y Solís-Casas, R. 2000. Remoción de la materia orgánica mediante la utilización de humedales artificiales en la comunidad de Santa María Nativitas, Texcoco, Estado de México. Facultad de Estudios Superiores de Zaragoza. UNAM. 8 p.
- García-Hernández, J.; King, K. A.; Velasco, A. L.; Shumilin, E.; Mora, M. A. and Glenn, E. P. 2001. Selenium, selected inorganic elements, and organochlorine pesticides in bottom material and biota from the Colorado River Delta. *J. Arid Environ.* 49(1):65-89.

- Glenn, E. P.; Lee, C.; Felger, R. and Zengel, S. 1996. Effects of water management on the wetlands of the Colorado River Delta, Mexico. *Conservation Biology*. 10(4):1175-1186.
- Guardado-Puentes, J. 1976. Concentración de DDT y sus metabolitos en el Valle de Mexicali y Alto Golfo de California. Report California Cooperative Oceanographic and Fisheries Investigations. 18:73-80.
- Gutiérrez-Galindo, E. A.; Flores-Múñoz, G. and Aguilar-Flores, A. 1998. Mercury in freshwater fish and clams from the cerro prieto geothermal field of Baja California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 41:201-207.
- Hinojosa-Huerta, O.; Destephano, S. and Shaw, W. W. 2001. Distribution and abundance of the Yuma clapper rail (*Rallus longirostris yumanensis*) in the Colorado River Delta, Mexico. *J. Arid Environ*. 49(1):171-182.
- Mora, M. A. and Anderson, D.W. 1995. Selenium, Boron, and heavy metals in birds from the Mexicali Valley, Baja California, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 54:198-206.
- NOM-001-ECOL-1996. Norma oficial mexicana que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas residuales en aguas y bienes nacionales. Publicada en el Diario Oficial de la Federación de fecha 6 de enero de 1997.
- NOM-027-SSA-1993. Norma oficial mexicana de bienes y servicios. Productos de la pesca. Pescados frescos-refrigerados y congelados. Especificaciones sanitarias.
- Rodríguez-Miranda, J. P.; Gómez, E.; Garavito, A. y López, L. F. 2010. Estudio de comparación del tratamiento de aguas residuales domésticas utilizando lentejas y buchón de agua en humedales artificiales. *Tecnología y Ciencias del Agua*. D. F., México.
- Romero, S.; García, J.; Valdéz, B. y Vega, M. 2010. Calidad del agua para actividades recreativas del Río Hardy en la región fronteriza México-Estados Unidos. *Información Tecnológica*. 21(5):69-78.
- Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON). 2010. Órgano desconcentrado de la SAGARPA. URL: <http://www.siap.gob.mx/index.php>.
- Urquiza-Marin, E.; Guzmán-Rodríguez, R.; Sánchez-Quispe, S. T.; Domínguez-Sánchez, C. y Rivas, A. 2006. Los humedales artificiales; una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales de Michoacán, México. Publicación del 2° foro académico nacional de ingenierías y arquitectura. Morelia, Michoacán. 201-210 pp.
- U. S. EPA. 1999. Constructed wetlands treatment of municipal wastewaters. EPA/625/R-99/010. Cincinnati, Ohio. 165 p.
- U. S. EPA. 2000. Guidance for assessing chemical contaminant data for use in fish advisory. Volumen I: Fish sampling and analysis. Tercera edición. U. S. Environmental Protection Agency. Washington D. C. EPA 823-B-00-007. 40 p.
- Zamora-Arroyo, F.; Nagler, P. L.; Briggs, D. M.; Radtke, H.; Rodríguez, J. García, C.; Valdes, A. Huete J. and Glenn, E. P. 2001. Regeneration of native trees in response to flood releases from the United States into the Delta of the Colorado River, Mexico. *J. Arid Environ*. 49(1):49-64.