

## **Función objetivo en el diseño de la laguna facultativa (estudio de caso)\***

### **Objective function in the design of the facultative lagoon (case study)**

**Facundo Cortés Martínez<sup>1§</sup>, Alejandro Treviño Cansino<sup>2</sup>, Arnulfo Luévanos Rojas<sup>3</sup>, Ramón Luévanos Rojas<sup>4</sup> y Armando Cesar Uranga Sifuentes<sup>5</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Juárez del Estado de Durango-Campus Gómez Palacio, Durango Av. Universidad S/N. Fraccionamiento Filadelfia Gómez Palacio, Durango. C. P. 35120 + (542) 8717152017. (atrevinoc@live.com.mx.; arnulfo\_2007@hotmail.com; luera\_2000@yahoo.com; armando\_uranga@yahoo.com.mx). <sup>§</sup>Autor para la correspondencia: facundo\_com@yahoo.com.mx.

#### **Resumen**

El sistema de tratamiento con lagunas de estabilización es el tipo más usado en América Latina, ya que son fáciles de operar y de construir, pero presenta una gran desventaja: el requerimiento del terreno. Estos sistemas necesitan más área que ningún otro sistema de tratamiento. Por lo tanto, es recomendable llevar a cabo un estudio debidamente analizado de manera que los resultados arrojen la menor área requerida. El objetivo del presente documento fue aplicar la programación no lineal con el algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG) con el fin de optimizar el diseño tradicional y costo del sistema de tratamiento. Se diseñó una laguna facultativa, los resultados indican una disminución en el tiempo de retención hidráulico de 4 días y un área menor de 14.79%. Ambos análisis satisfacen perfectamente los límites máximos permisibles en la concentración de contaminantes que indica la norma para el vertido de agua tratada a los cuerpos receptores.

**Palabras clave:** análisis de sensibilidad, diagrama de tornado, laguna facultativa, mamparas, programación no lineal, verificación de resultados.

#### **Abstract**

The treatment system stabilization ponds is the most widely used in Latin America, as they are easy to operate and build, but it presents a major drawback: the requirement of the land. These systems require more area than any other treatment system. Therefore, is to send you to him to carry out a study properly analyzed so that the results will shed the least area required. The purpose of this paper was to apply the nonlinear programming algorithm generalized reduced gradient (GRG) in order to optimize the traditional design and cost of the treatment system. We designed a facultative pond; the results indicate a decrease of the hydraulic retention time of 4 days and a minor area of 14.79%. Parsing both perfectly meet boundaries permissible of pollutant concentration indicating the standard for the discharge of treated water receiving bodies.

**Keywords:** sensitivity analysis, tornado diagram, facultative pond, screens, nonlinear programming, results verification.

## Introducción

Según el Fondo Internacional de Emergencia de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF por sus siglas en inglés) el tratamiento de aguas residuales en América Latina (incluyendo México) es de 55.4 m<sup>3</sup>/segundo. Y el sistema más utilizado es de lagunas de estabilización: 47.64%, con una operación de plantas de 1 251. Las ciudades contabilizadas que cuentan con sistema de alcantarillado: 1 728 con una población aproximada de 86.0 millones de habitantes que representan 60.3% (UNICEF, 2006).

En México, las lagunas de estabilización también es el sistema más utilizado. De acuerdo con la CNA e IMTA (2007b) en su inventario nacional de plantas de tratamiento municipales, contabilizó 1 191 en el año 1995. De las cuales 268 correspondieron a lodos activados, 566 plantas de otros tipos de tratamiento, 27 de lagunas industriales y finalmente 330 de lagunas de estabilización.

No obstante lo sencillo de la operación y mantenimiento de estos sistemas, un gran número de lagunas de estabilización no funcional debido a la falta de conocimiento por parte de los responsables de la operación y técnicos. Una alternativa es acondicionar estos sistemas con mamparas, con el fin de obtener mayor eficiencia en el tratamiento del agua residual (CNA e IMTA, 2007b).

Según Shilton y Mara (2005) recomiendan el uso de canales o mamparas, ya que se utiliza toda el área de la laguna obteniendo las siguientes ventajas: a) se incrementa la eficiencia en el tratamiento del agua residual; b) se mejoran las condiciones de flujo dentro del estanque; y c) se reducen de manera importante las zonas muertas.

Los sistemas de lagunas de estabilización tienen como objetivo la remoción de la materia orgánica, es decir, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) con unidades de (mg L<sup>-1</sup>); de nitrógeno, fósforo y la eliminación de coliformes fecales con unidades de número más probable por cada 100 ml (NMP 100 ml<sup>-1</sup>). Ésos últimos transmiten enfermedades por ejemplo: cólera, hepatitis infecciosa, tifoidea, gastroenteritis entre otras importantes.

La DBO se define como el oxígeno disuelto que necesitan los microorganismos para procesar la materia orgánica en un periodo de tiempo, por lo general son 5 días a 20 °C. Normalmente se expresa en términos de concentración. La

## Introduction

According to the International Emergency Fund United Nations Children's Fund (UNICEF for its acronym in English) Wastewater treatment in Latin America (including Mexico) is 55.4 m<sup>3</sup>/second. And the most widely used system of stabilization ponds: 47.64% with plant operation 1 251. The accounted cities with sewerage system: 1 728 with a population of approximately 86.0 million representing 60.3% (UNICEF, 2006).

In Mexico, the stabilization ponds is the most widely used system. According to the CNA and IMTA (2007b) in their national inventory of municipal treatment plants, 1 191 in 1995. Of the 268 which activated sludge plant 566 s of other types of treatment, 27 and finally 330 industrial lagoons stabilization pond.

Nevertheless the simplicity of the operation and maintenance of these systems, a large number of non-functional stabilization ponds due to lack of knowledge on the part of those responsible for the operation and technicians. An alternative is to put these systems with screens, in order to obtain greater efficiency and wastewater treatment (CNA and IMTA, 2007b).

According to Shilton and Mara (2005) recommend the use of channels or screens, and the entire area of the lagoon is used to obtain the following advantages: a) increases efficiency and wastewater treatment; b) the conditions are improved flow into the tank; and c) is substantially reduced dead zones.

Systems stabilization ponds aim the removal of organic matter, ie, biochemical oxygen demand (BOD) in units of (mg L<sup>-1</sup>), nitrogen, phosphorus, and removing fecal coliform units of number Chances per 100 ml (NMP 100 ml<sup>-1</sup>). É recent cases transmitted diseases for example. Cholera, infectious hepatitis, typhoid, gastroenteritis and other important.

BOD is defined as the dissolved oxygen used by microorganisms to process the organic material in a period of time, are usually 5 days at 20 °C. Usually expressed in terms of concentration. The BOD also used to determine the dimensions of stabilization ponds, measures the efficiency of some treatment processes and used to monitor compliance with the quality standards of treated water is discharged

DBO también se utiliza para determinar las dimensiones de lagunas de estabilización, mide la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y sirve para controlar el cumplimiento de las normas de calidad de agua tratada que son vertidas a cuerpos receptores (CNA e IMTA, 2007a; 2007b). Según (Rolim, 2000) las lagunas de estabilización se clasifican en anaerobias, facultativas y de maduración o pulimiento.

A la fecha se han realizado estudios a nivel laboratorio donde se incluyó el uso de mamparas en estanques de estabilización, por ejemplo: Killani and Ogunrombi (1984); Pedahzur *et al.* (1993); Muttamara, and Puetpaiboon (1996; 1997); Sperling *et al.* (2003); Zanotelli *et al.* (2002); Shilton and Harrison (2003a; 2003b); Shilton y Mara (2005). Éstos investigadores(as) concluyeron que con el uso de mamparas a 70% de la longitud se obtiene mayor eficiencia en el tratamiento del agua residual. En el Cuadro 1 se indican algunos resultados.

Por otro lado Pearson (2000); Abbas *et al.* (2006); Shilton and Harrison (2003a) y Oakley (2005) indican la importancia de la localización de las entradas y salidas en los sistemas lagunares.

Sistemas de modelado han incorporado diferentes características por ejemplo: Salter *et al.* (2000) consideró la influencia de las mamparas en condiciones de flujo hidráulico, más tarde Sweeney *et al.* (2003) analizó específicamente el efecto del viento en el perfil hidráulico, luego Manga *et al.* (2004) centró sus estudios en la longitud y la localización de entrada y salida en el régimen de flujo de los sistemas lagunares. Algunos estudios donde se incluyeron los efectos combinados del viento, el impacto de mamparas así como la posición de entradas y salidas: Shilton y Harrison (2003a); Shilton y Mara (2005) y Sweeney *et al.* (2003). Después Sah *et al.* (2012) mencionan que es necesario desarrollar un modelo integral y calibrado para lagunas de estabilización que se utilice como una herramienta de apoyo y optimización. Por otro lado, Killani and Ogunrombi (1984) indican la necesidad de aplicar técnicas de optimización con el propósito de obtener el diseño del sistema lagunar a un costo mínimo. Otros investigadores(as) llevaron a cabo estudios incluyendo la programación lineal con el fin de obtener un diseño óptimo de los sistemas lagunares: Fonseca *et al.* (1995); Oke and Otún (2001); Bracho *et al.* (2006); Winfrey *et al.* (2010); Olukanni and Ducoste (2011).

into receiving bodies (CNA and IMTA, 2007a, 2007b). According to (Rolim, 2000) stabilization ponds are classified as anaerobic, facultative and maturation or polishing.

To date, studies have been conducted at laboratory where the use of screens in stabilization ponds are included, for example: Killani and Ogunrombi (1984); Pedahzur *et al.* (1993); Muttamara, and Puetpaiboon (1996, 1997), Sperling *et al.* (2003). Zanotelli *et al.* (2002). Shilton and Harrison (2003a, 2003b). Shilton and Mara (2005) these researchers concluded on that with the use of baffles to 70% of the length greater efficiency is obtained in the treatment of wastewater. Table 1, some results are listed.

**Cuadro 1. Resultados de estudios experimentales con diferente número de deflectores al 70% de la longitud.**

**Table 1. Experimental studies with a different number of baffles 70% length.**

Número de deflectores	Coliformes fecales influente (NMP 100 ml <sup>-1</sup> )	Coliformes fecales efluente (NMP 100 ml <sup>-1</sup> )
1	1 * 10 <sup>8</sup>	4.1 x 10 <sup>6</sup>
2	1 * 10 <sup>8</sup>	6.0 x 10 <sup>3</sup>
4	1 * 10 <sup>8</sup>	3.9 x 10 <sup>2</sup>
6	1 * 10 <sup>8</sup>	5.7 x 10 <sup>2</sup>
8	1 * 10 <sup>8</sup>	9.6

Fuente: (Shilton and Harrison, 2003a).

Furthermore, Pearson (2000); Abbas *et al.* (2006); Shilton and Harrison (2003a) and Oakley (2005) indicate the importance of the location of entrances and exits in the lagoon systems.

Modeling systems have incorporated various features such as: Salter *et al.* (2000) considered the influence of the screens in terms of hydraulic flow later Sweeney *et al.* (2003) specifically examined the effect of wind on the hydraulic profile, then Manga *et al.* (2004) focused his studies on the length and location of entry and exit in the flow regime of the lagoon systems. Some studies where the combined effects of wind, the impact of screens and the position of inputs and outputs are included: Shilton and Harrison (2003a); Shilton and Mara (2005) and Sweeney *et al.* (2003). After Sah *et al.* (2012) mention the need to develop a comprehensive model for calibration and stabilization ponds to be used as a support tool and

Actualmente, en México, existe un proyecto para optimizar el tratamiento de aguas residuales con sistemas lagunares. El responsable es el doctor Carlos Solís Morelos, coordinador del Centro Interamericano de Recursos del Agua (CIRA). Se trata de un modelo innovador para el diseño y reingeniería de sistemas de estanques. El modelo consiste básicamente en una sobre elevación de 70 centímetros del tirante del agua, además de modificaciones en las tuberías y en salidas de lagunas: el propósito es mejorar la calidad del agua que es descargada al río Lerma. Otro estudio es el realizado por Rico *et al.* (1992), el objetivo fue optimizar la reducción de patógenos en sistemas lagunares: presentaron una metodología para llevar a cabo pruebas de tratamiento con el fin de incrementar la constante de mortalidad de bacterias en la introducción de peces.

De acuerdo a la revisión bibliográfica en México, existen pocos estudios donde se proponga la optimización aplicada a sistemas lagunares, por tal motivo se planteó el presente trabajo con los siguientes objetivos: a) diseñar una laguna facultativa con el método tradicional considerando mamparas y costo del sistema; b) aplicar la herramienta de programación no lineal al diseño y costo del estanque facultativo; y c) comparar los resultados obtenidos, entre los 2 análisis y determinar las ventajas y ahorros económicos.

### **Programación no lineal**

Para realizar la optimización de diseño y costo de la laguna facultativa se utilizará una herramienta de la hoja de cálculo Excel (sistema Solver). Éste sistema utiliza el algoritmo del gradiente reducido generalizado (GRG). Para realizar el análisis, la herramienta Solver solicita una solución conocida; es decir, el diseño de dimensionamiento de la laguna facultativa calculada previamente con el método tradicional. El citado sistema inspecciona y adapta los números de las variables de decisión consideradas hasta cumplir con los valores establecidos previamente en las restricciones (Muramatsu, 2011).

### **Materiales y métodos**

El texto consultado para el diseño: paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales (CNA e IMTA, 2007a).

optimization. Furthermore, Killani and Ogunrombi (1984) indicate the need for optimization techniques in order to get the design of the lagoon system at minimal cost. Other researchers carried out studies including linear programming in order to obtain an optimum design of the lagoon systems: Fonseca *et al.* (1995), Oke and Otún (2001); Bracho *et al.* (2006). Winfrey *et al.* (2010). Olukanni and Ducoste (2011).

Currently, in Mexico, a project to optimize wastewater treatment lagoon systems. The head is Dr. Carlos Solís Morelos, coordinator of the Inter-American Water Resources (CIRA). It is a model innovative approach to the design and reengineers pond systems. The model is an on elevation 70 Strap inches of water, the modification on the pipes and outlets of lakes: the purpose is to improve the quality of water being discharged to the Lerma River. Another study is conducted by Rico *et al.* (1992), the objective was to optimize pathogen reduction lagoon system. Presented a methodology for carrying out tests of treatment in order to increase the constant mortality of bacteria in the introduction fish.

According to the literature review in Mexico, there are few studies where optimization applied to this systems is proposed, for this reason the present study with the following objectives: a) design a facultative pond with the traditional method considering partitions and cost system; b) applying the nonlinear programming tool to the design and cost of the facultative pond; and c) comparing the results between the two analyzes and determine the benefits and cost savings.

### **Nonlinear programming**

To optimize the design and cost of the facultative pond tool spreadsheet Excel will be used (Solver system). This system uses the generalized reduced gradient algorithm (GRG). To perform the analysis, the solver tool requests a known solution, i.e., the design of facultative pond sizing previously calculated with the traditional method. That system inspects and adapts the number of decision variables considered to comply with previously established values in the constraints (Muramatsu, 2011).

### **Materials and methods**

The text consulted for design: technology packages for the treatment of wastewater and excreta in rural communities (CNA and IMTA, 2007a).

**Nomenclatura para el diseño de la laguna facultativa**

C.O.= Carga orgánica  
 Qi= Caudal en el influente de la laguna (m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)  
 DBOi= Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el influente (mg L<sup>-1</sup>)  
 1000= Factor de conversión  
 λv= Carga orgánica superficial (gDBO<sub>5</sub> m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)  
 T= Temperatura mínima media mensual del aire (°C)  
 Li= Concentración de DBO<sub>5</sub> en el influente de la laguna (mg L<sup>-1</sup>)  
 Af= Área en (m<sup>2</sup>)  
 Qmed= Caudal en el influente en (m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)  
 Z= Profundidad en (m)  
 V= Volumen de la laguna (m<sup>3</sup>)  
 OF= Tiempo medio de retención hidráulico laguna facultativa (días)  
 X= Relación entre longitud y anchura  
 B<sub>Prom</sub>= Ancho promedio de la laguna en (m)  
 L<sub>Prom</sub>= Longitud promedio de la laguna en (m)  
 B<sub>Sup</sub>= Ancho superior en (m)  
 L<sub>Sup</sub>= Largo superior en (m)  
 A<sub>Sup</sub>= Área superficial en (m<sup>2</sup>)  
 Qe= Caudal en el efluente de la laguna (m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)  
 e= Evaporación (mm día<sup>-1</sup>)  
 d= Factor de dispersión adimensional  
 Kb= Coeficiente de reducción bacteriana (d<sup>-1</sup>)  
 a= Constante adimensional  
 Ne= Coliformes fecales corregidos por evaporación en el efluente de la laguna (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 Ni= Coliformes fecales en el influente de la laguna (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 Nf/No= Número de coliformes fecales en el efluente (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 e= 2.7182818  
 Kf= Constante de decaimiento a una temperatura en cualquiera (día<sup>-1</sup>)  
 DBOe= Concentración de la DBO<sub>5</sub> en el efluente de la laguna (mg L<sup>-1</sup>)  
 N<sub>MampF</sub>= Número de mamparas en la laguna facultativa  
 Talud = Relación de bordos 2:1

**Diseño de laguna facultativa (Flujo disperso. Método de Yáñez)**

- a) Carga orgánica:  $C.O. = Q_i(DBO_i)/1000$  (1)  
 b) Carga superficial de diseño:  $\lambda_s = 250(1.085)^{T-20}$  (2)  
 c) Área de la laguna facultativa:  $Af = 10 L_i Q_{med} / \lambda_s$  (3)  
 d) Volumen de la laguna:  $V = (Af)(Z)$  (4)  
 e) Tiempo Medio de retención hidráulico:  $OF = V/Q_i$  (5)  
 f) Dimensionamiento. Relación largo ancho X= 3:  

$$B_{Prom} = \sqrt{\frac{Af}{X}}$$
 (6)  

$$L_{Prom} = \frac{Af}{B_{Prom}}$$
 (7)  
 g) Para el ancho y largo:  $B_{Sup} = B_{Prom} + (Z)(Talud)$  (8)

**Nomenclature for facultative pond design.**

CO= organic load  
 Qi= flow in the influent of the lagoon (m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>)  
 DBOi= concentration of DBO in the influent (mg L<sup>-1</sup>)  
 1000= conversion factor  
 λv= surface organically load (gDBO<sub>5</sub> m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>)  
 T= minimum mean monthly air temperature (°C)  
 Li= DBO<sub>5</sub> concentration in the influent of the lagoon (mg L<sup>-1</sup>)  
 Af= area (m<sup>2</sup>)  
 Qav= influent flow rate in (m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>)  
 Z= depth (m)  
 V= pond volume (m<sup>3</sup>)  
 OF= average hydraulic retention time facultative pond (days)  
 X= relationship between length and width  
 B<sub>Prom</sub>= gave average width of the lagoon (m)  
 L<sub>Prom</sub>= average length of the lagoon (m)  
 B<sub>Sup</sub>= with (m)  
 L<sub>Sup</sub>= long top in (m)  
 A<sub>Sup</sub>= surface area (m<sup>2</sup>)  
 Qe= flow in the lagoon effluent (m<sup>3</sup> day<sup>-1</sup>)  
 e= evaporation (mm day<sup>-1</sup>)  
 d= dimensionless factor dispersion  
 Kb= bacterial reduction coefficient (d<sup>-1</sup>)  
 a= dimensionless constant  
 Ne= fecal coliforms corrected by evaporation in the effluent from the lagoon (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 Ni= fecal coliforms in the effluent in the lagoon (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 Nf/No= number of fecal coliforms col in the effluent (NMP 100 ml<sup>-1</sup>)  
 e= 2.7182818  
 Kf= decay constant to a temperature in either (day<sup>-1</sup>)  
 DBOe= concentration of DBO<sub>5</sub> in the effluent from the lagoon (mg L<sup>-1</sup>)  
 N<sub>MampF</sub>= number of screens in the facultative  
 T= avalanche 2:1 ratio levees pond

**Design of the facultative pond (dispersed flow, Yáñez Method)**

- a) Organic load:  $C.O. = Q_i(DBO_i)/1000$  (1)  
 b) Surface design load:  $\lambda_s = 250(1.085)^{T-20}$  (2)  
 c) The facultative pond area:  $Af = 10 L_i Q_{med} / \lambda_s$  (3)  
 d) Volume of the lagoon:  $V = (Af)(Z)$  (4)  
 e) Mean hydraulic retention time:  $OF = V/Q_i$  (5)  
 f) Sizing length width ratio X= 3:  

$$B_{Prom} = \sqrt{\frac{Af}{X}}$$
 (6)  

$$L_{Prom} = \frac{Af}{B_{Prom}}$$
 (7)  
 g) For the width and length:  $B_{Sup} = B_{Prom} + (Z)(Talud)$  (8)

$$L_{Sup} = L_{Prom} + (Z)(Talud) \quad (9)$$

$$h) \text{ Cálculo del área superficial: } A_{Sup} = (B_{Sup})(L_{Sup}) \quad (10)$$

$$i) \text{ Gasto en el efluente: } Q_e = Q_i - 0.001 A_{Sup}e \quad (11)$$

j) Remoción de coliformes fecales: considerando mamparas con longitud al 70 por ciento de la laguna se tiene que:

$$X = \frac{(L_{Prom})(0.70)(N_{MampF} + 1)}{B_{Prom}/(N_{MampF} + 1)} \quad (12)$$

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392(X) + 1.0136(X)^2} \quad (13)$$

k) Coeficiente de reducción bacteriana:

$$Kb = 0.841 (1.075)^{T-20} \quad (14)$$

l) Constante "a". Se determina a través de la fórmula:

$$a = \sqrt{1 + 4K_b O_f d} \quad (15)$$

m) Coliformes fecales en el efluente de la laguna facultativa.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} N_i \quad (16)$$

n) Coliformes fecales corregidos por evaporación.

$$N_e = (N_e)(Q_i)/Q_e \quad (17)$$

o) Concentración de la DBO en el efluente de la laguna:

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35-T}} \quad (18)$$

p) Concentración de la demanda bioquímica de oxígeno en el efluente de la laguna:

$$DBO_{ef} = \frac{DBO_i}{K_f O_f + 1} \quad (19)$$

q) Eficiencia de remoción de la DBO:

$$\%_o = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i} \times 100 \quad (20)$$

r) DBO corregida por evaporación:

$$DBO_e = (DBO_i)(Q_i)/Q_e \quad (21)$$

### Función objetivo

Para el caso estudiado en el presente artículo se pretende minimizar el costo total en la construcción de una laguna facultativa, tomando en cuenta las siguientes consideraciones: costo del terreno \$ 750.00 m<sup>2</sup>; costo índice del bordo \$ 1 200.00 metro lineal y de la mampara \$ 500.00 metro lineal. La pendiente de talud de los bordos 2:1; profundidad de la laguna facultativa 1.5 m. Con los datos anteriores se determinó la expresión (22).

$$Costo\ total = 750 (B_{Sup} + 12) (L_{Sup} + 12) + 1200[2(B_{Sup} + 3) + 2(L_{Sup} + 3)] + 500(0.7)N_{MampF}L_{Sup} \quad (22)$$

Donde:  $B_{Sup} = B_{Prom} + 3$

$$L_{Sup} = L_{Prom} + (Z)(Talud) \quad (9)$$

$$h) \text{ Calculation of surface area: } A_{Sup} = (B_{Sup})(L_{Sup}) \quad (10)$$

$$i) \text{ Expenditure in the effluent: } Q_e = Q_i - 0.001 A_{Sup}e \quad (11)$$

j) Removal of fecal coliform: considering screens with length 70 percent of the pond, we have:

$$X = \frac{(L_{Prom})(0.70)(N_{MampF} + 1)}{B_{Prom}/(N_{MampF} + 1)} \quad (12)$$

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392(X) + 1.0136(X)^2} \quad (13)$$

k) Bacterial reduction coefficient:

$$Kb = 0.841 (1.075)^{T-20} \quad (14)$$

l) Constant "a". Is determined by the formula:

$$a = \sqrt{1 + 4K_b O_f d} \quad (15)$$

m) Fecal coliforms in the effluent from the facultative pond.

$$\frac{N_f}{N_o} = \frac{4ae^{(1-a)/2d}}{(1+a)^2} N_i \quad (16)$$

n) Fecal coliforms corrected for evaporation.

$$N_e = (N_e)(Q_i)/Q_e \quad (17)$$

o) Concentration of BOD in the effluent from the lagoon:

$$K_f = \frac{K_{f35}}{(1.085)^{35-T}} \quad (18)$$

p) Concentration of BOD in the effluent from the lagoon

$$DBO_{ef} = \frac{DBO_i}{K_f O_f + 1} \quad (19)$$

q) Removal efficiency of BOD:

$$\%_o = \frac{(DBO_i - DBO_e)}{DBO_i} \times 100 \quad (20)$$

r) Corrected by evaporation BOD:

$$DBO_e = (DBO_i)(Q_i)/Q_e \quad (21)$$

### Objective function

For the case studied in this article and 1 is to minimize the total cost in the construction of a facultative lagoon, taking into account the following considerations: land cost \$ 750.00 m<sup>2</sup>; board index cost \$ 1 200.00 and meter of the partition \$ 500.00 linear meter slope The slope of the edges 2:1; facultative pond depth of 1.5 m with the previous data is deterministic response or the expression (22).

$$Total\ cost = 750 (B_{Sup} + 12) (L_{Sup} + 12) + 1200[2(B_{Sup} + 3) + 2(L_{Sup} + 3)] + 500(0.7)N_{MampF}L_{Sup} \quad (22)$$

Where:  $B_{Sup} = B_{Prom} + 3$

El término anterior representa al ancho superior de la laguna facultativa más 3 metros de la relación de inclinación considerada en los bordos (CNA e IMTA, 2007a; 2007b). La expresión siguiente define la longitud del estanque.

$$L_{Sup} = 3B_{Prom} + 3$$

Se considera la relación largo ancho de 3 (CNA e IMTA, 2007a; 2007b).

Para definir la expresión del ancho promedio de la laguna facultativa, se despeja el volumen de la expresión (5), luego ésta se sustituye en la ecuación (4). Lo que resulta del proceso anterior se sustituye en la fórmula (6), y se obtiene:

$$B_{Prom} = \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}}$$

En seguida incluyendo la relación de talud de los bordos se obtiene la expresión (23). Ésta es la ecuación para calcular el ancho superior de la laguna facultativa.

$$B_{Sup} = \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 3 \quad (23)$$

De igual forma para el largo superior de la laguna facultativa se tiene:

$$L_{Sup} = 3\sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 3 = \sqrt{2O_F * Q_i} + 3 \quad (24)$$

Sustituyendo las ecuaciones (23) y (24) en la (22) se determina la función objetivo:

Minimizar

$$\begin{aligned} \text{Costo total} = & 750 \left( \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 15 \right) \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 15 \right) + 1200 \\ & \left[ 2 \left( \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 6 \right) + 2 \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 6 \right) \right] + 500(0.7) \\ & \left[ N_{MampF} \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 3 \right) \right] \quad (25) \end{aligned}$$

Según Eppen *et al.* (2000) las variables de decisión o controlables son las cantidades que deben determinarse considerando las limitaciones. El costo total (expresión 25) está en función del tiempo de retención y el número de mamparas:

$O_F$  y  $N_{MampF}$

Estas variables (el tiempo de retención y número de mamparas) son las que el sistema de programación optimizará de acuerdo con las siguientes restricciones:

The former term represents the upper width of the facultative pond over 3 meters slope ratio seen on the boards (IMTA and CNA, 2007, 2007b). The following expression defines the length of the pond.

$$L_{Sup} = 3B_{Prom} + 3$$

Considered length width ratio 3 (CNA and IMTA, 2007, 2007b).

To define the expression of the average width of the facultative pond is desp volume ected expression (5), then is to be substituted into equation (4). What is the above process is replaced by the formula (6), and is obtained:

$$B_{Prom} = \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}}$$

In followed including the ratio of slope of Ordos b expression (23) is obtained. This is the equation to calculate the upper width of the facultative pond.

$$B_{Sup} = \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 3 \quad (23)$$

Similarly for the upper along the facultative pond holds:

$$L_{Sup} = 3\sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 3 = \sqrt{2O_F * Q_i} + 3 \quad (24)$$

Substituting equations (23) and (24) in (22) is determined l vo objective function:

Minimize

$$\begin{aligned} \text{Total cost} = & 750 \left( \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 15 \right) \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 15 \right) + 1200 \\ & \left[ 2 \left( \sqrt{\frac{O_F Q_i}{4.5}} + 6 \right) + 2 \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 6 \right) \right] + 500(0.7) \\ & \left[ N_{MampF} \left( \sqrt{2O_F * Q_i} + 3 \right) \right] \quad (25) \end{aligned}$$

According, Eppen *et al.* (2000) l or controllable decision variables as are the amounts to be determined by considering the total cost constraints (expression 25) is a function of retention time and the n umber of partitions:

$O_F$  y  $N_{MampF}$

These variables (the retention time and the number of partitions) is programming the system optimized in accordance with the following restrictions:

$$O_F \leq 30$$

$$O_F \leq 30$$

$$DBO_e \leq 7.5$$

$$Nf/No \leq 1000$$

$$N_{MampF} \leq 6$$

$$N_{MampF} = Entero$$

$$Nf/No, O_F \geq 0$$

Los criterios considerados para definir las restricciones fueron: a) para coliformes fecales es menor o igual a 1000 NMP/100 mL b) para la demanda bioquímica de oxígeno de 75 mg/L. (DOF, 1996). El número máximo de mamparas considerado fue de 6 y el tiempo de retención estimado de 30 días.

**Aplicación de la metodología**

Datos: diseñar una laguna facultativa para una comunidad rural ubicada en el municipio de Gómez Palacio, Durango. Número de habitantes al horizonte de proyecto 1500; aportación de aguas residuales= 154 L/hab/día (CNA e IMTA, 2007a), por lo tanto el gasto de diseño= 231 m<sup>3</sup>/día. Temperatura del mes más frío= 11.8 °C (CNA e IMTA, 2007b); concentración de la DBO<sub>5</sub> en el influente=220 mg/L; coliformes fecales 1\*10<sup>7</sup> NMP/100 mL. Considerar la evaporación de 5 mm/día.

**Resultados y discusión**

En el Cuadro 2 y Figura 1 se muestran los resultados y dimensiones de la laguna facultativa con el método tradicional. Se observa que con 3 mamparas se obtuvieron los coliformes fecales por debajo de 1 000 NMP/100 mL.

**Cuadro 2. Resultados de diseño de la laguna facultativa con 3 mamparas, método tradicional.**  
**Table 2. Design results of the facultative lagoon with 3 screens, traditional method.**

Datos			
Q <sub>i</sub>	NF/No <sub>i</sub>	DBO <sub>i</sub>	T
231	10 000 000	220	11.8

$$DBO_e \leq 7.5$$

$$Nf/No \leq 1000$$

$$N_{MampF} \leq 6$$

$$N_{MampF} = Entero$$

$$Nf/No, O_F \geq 0$$

The criteria used to define the restrictions were: a) fecal coliform is less than or equal to 1 000 MPN/100 mL b) biochemical oxygen demand of 75 mg/L. (DOF, 1996). Screens Table number or maximum considered was 6 and the estimated retention time of 30 days.

**Implementation of a method**

Data: a facultative pond for a unique designs for a rural community located in the town of Gómez Palacio, Durango, Number of lives skyline project before 1 500, a wastewater portaging= 154 L/person / day (CNA e IMTA, 2007a), therefore the design discharge= 231 m<sup>3</sup>/day. Coldest month temperature= 11.8 °C (CNA and IMTA, 2007b), the BOD<sub>5</sub> concentration in the in fluent= 220 mg/L; fecal coliform MPN/100 1\*10<sup>7</sup> mL Consider the evaporation of 5 mm/day.

**Results and discussion**

In Table 2 and Figure 1 shows the results and dimensions of the facultative lagoon with the traditional method. 3 shows that screens were obtained fecal coliforms below 1 000 MPN/100 mL.

Laguna facultativa	
Resultados	
O <sub>F</sub>	N <sub>MampF</sub>
25.77	3.00

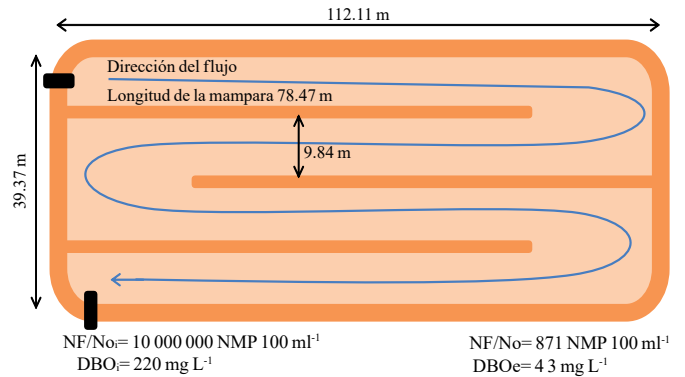
RESULTADOS LAGUNA FACULTATIVA									
X	d	kb	a	B <sub>sup</sub>	L <sub>sup</sub>	Qe	NF/No	DBOe	Área
33.6	0.0292	0.4648	1.5481	39.37	112.11	208.93	871	43	4 414

Costo total
\$5 277 568.47



En el apartado de la celda de variables del Cuadro 3, el análisis con la herramienta Solver redujo el tiempo de retención de 25.77 días, calculado con el método tradicional, a 21.76. Aproximadamente 15.56% que representa 4.01 días. El tiempo de retención interviene en las dimensiones del estanque facultativo y en el requerimiento del terreno, el cual es uno de los parámetros que se consideraron en la función del costo (25) (CNA e IMTA, 2007a; 2007b). Según la PTAR SLRC/CAPA (sin fecha) el tiempo de retención es muy importante en la colección de muestras en el influente y efluente de la laguna durante la operación; es decir, existe relación entre este parámetro y el número de muestras, también es posible definir analíticamente la fecha y hora en que deberán colectarse éstas. Los parámetros necesarios para realizar el citado análisis son: número de lagunas, gasto por cada estanque, tiempo de retención, volumen, área y profundidad.

Cuando se utiliza la herramienta Solver de Excel, es conveniente realizar modelos de optimización considerando mayor número de mamparas. Ya que para operar adecuadamente el sistema se deben definir los límites superior e inferior de las variables de decisión (Frontline Systems, 2012).



**Figura 1. Dimensiones de la laguna facultativa con el método tradicional. Arreglo con 3 mamparas.**

**Figure 1. Dimensions of the facultative lagoon with the traditional method. Agreement with 3 screens.**

In the section of the cell variables in Table 3, the analysis with the Solver tool reduced the retention time of 25.77 days, calculated with the traditional method, 21.76. Representing approximately 15.56% 4.01 days. The retention time dimensions involved in the facultative pond and the requirement of land, which is one of the parameters that were considered in the cost function (25) (CNA and

**Cuadro 3. Informe de resultados de optimización del diseño de la laguna facultativa.**

**Table 3. Performance Report optimizations and design of the facultative pond.**

Datos iniciales				
Microsoft Excel 14.0 Informe de respuestas				
Hoja de cálculo: [Articulo 2 solver.xls] Óptimo				
Informe creado: 10/01/2014 01:19:37 p.m.				
Resultado: Solver ha convergido a la solución actual. Se cumplen todas las restricciones				
Motor de Solver				
Motor: GRG Nonlinear				
Tiempo de la solución: 22.37 segundos.				
Iteraciones: 18 Subproblemas: 0				
Opciones de Solver				
Tiempo máximo 100 seg., Iteraciones 10000, Precision 0.0000005, Usar escala automática				
Convergencia 0.0001, Tamaño de población 100, Valor de inicialización aleatorio 0, Adelantada de derivados, Inicio múltiple				
Máximo de subproblemas Ilimitado, Máximo de soluciones de enteros Ilimitado, Tolerancia de enteros 0.01%, Asumir no negativo				
Celda objetivo (Mín)				
Celda	Nombre	Valor original	Valor final	
\$J\$14	Costo total	\$5 277 568.47	\$4 752 586.32	
Celdas de variables				
Celda	Nombre	Valor original	Valor final	Entero
\$G\$6	OF	25.770000	21.760442	Continuar
\$I\$6	NMampF	3.00	6.00	Entero

**Cuadro 3. Informe de resultados de optimización del diseño de la laguna facultativa (Continuación).**  
**Table 3. Performance Report optimizations and design of the facultative pond (Continuation).**

Restricciones					
Celda	Nombre	Valor de la celda	Fórmula	Estado	Demora
\$I\$11	NF/No	1000	\$I\$11<=1000	Vinculante	0
\$J\$11	DBOe	49	\$J\$11<=75	No vinculante	26.46371714
\$I\$6	NMampF	6.00	\$I\$6<=6	Vinculante	0
\$I\$6=Entero					

Acerca del número de mamparas el sistema determinó las máximas consideradas en las restricciones: 6 en lugar de 3 establecidas originalmente. Según Muttamara, and Puetpaiboon (1996; 1997); Sperling *et al.* (2002); Shilton and Harrison (2003a); Shilton and Mara (2005); Abbas *et al.* (2006) y Killani and Ogunrombi (1984) el uso de mamparas o deflectores, aumenta de manera importante la eliminación de los coliformes fecales ya que se implementa una eficiencia en el flujo hidráulico dentro del estanque. De acuerdo a los resultados del Cuadro 2 y 4 se obtuvo una reducción de área de 653 m<sup>2</sup>, que significa 14.79%. La diferencia de costos fue de \$ 524 982.15 que representa 9.95% con respecto al del sistema tradicional. Según Olukanni (2011) la optimización en el diseño de lagunas de estabilización reduce el costo de construcción siempre que se consideren adecuadas restricciones de diseño, de manera que se cumpla con los límites máximos permitidos de contaminantes que indica la normatividad. El presente estudio coincide con las afirmaciones del citado autor.

IMTA, 2007a, 2007b). According to the WWTPSLRC/CAPA (undated) and retention, time is very important in the collection of samples influent and effluent from the pond during the operation, i.e., a relationship between this parameter pa and the number of samples, also it is possible to analytically define the date and time they should collect them. The parameters necessary to perform this analysis are number of ponds, spending for every pond, retention time, volume, area and depth.

When the Solver Excel tool is used, it is convenient to perform optimization models considering higher number of partitions. Since for or overcome the system must properly define the upper and lower bounds of the decision variables (Frontline Systems, 2012).

About the number of partitions, the system with the maximum determined in the restrictions 6 instead of 3 original condition. According Muttamara, and Puetpaiboon (1996, 1997), Sperling *et al.* (2002). Shilton and Harrison (2003a);

**Cuadro 4. Resultados de la optimización del diseño de laguna facultativa con el sistema Solver de Excel.**  
**Table 4. Results of optimizing the design of facultative pond system with Excel Solver.**

Datos			
Q <sub>i</sub>	NF/No <sub>i</sub>	DBO <sub>i</sub>	T
231	10 000 000	220	11.8

Variables de decisión	
Laguna facultativa	
O <sub>F</sub>	N <sub>MampF</sub>
21.760442	6.00

Resultados laguna facultativa									
X	d	kb	a	B <sub>sup</sub>	L <sub>sup</sub>	Qe	NF/No	DBOe	Área
102.9	0.0096	0.4648	1.1777	36.42	103.27	212.19	1 000	49	3 761

Costo total
\$4 752 586.32

Los siguientes investigadores(as) discutieron la optimización del costo de los sistemas lagunares: Oke and Otún (2001); Shilton and Harrison, (2003b) y Bracho

Shilton and Mara (2005); Abbas *et al.* (2006) and Killani and Ogunrombi (1984) the use of baffles or baffles increases significantly removing fecal coliform as an efficiency in

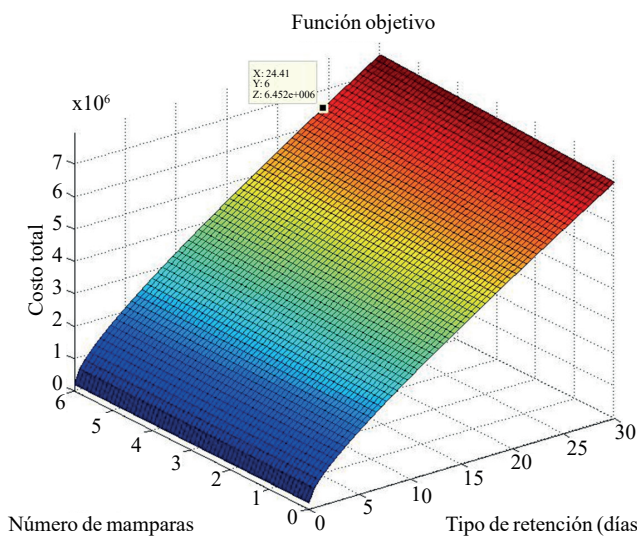
*et al.* (2006) concluyeron que entre mayor número de mamparas se mejoraría la eficiencia hidráulica de los estanques, pero que era necesario tomar en cuenta los costos de construcción. Los resultados del presente trabajo indican mayor número de mamparas aplicando la optimización; no obstante lo anterior el costo se redujo en 9.95 por ciento.

Se dice que una materia es biodegradable cuando se descompone un desecho de tipo orgánico por acción de agentes biológicos: el sol, el agua, las plantas o los animales y de microorganismos por ejemplo: las bacterias, algas, hongos o levaduras. El material orgánico puede ser degradado de forma aeróbica o anaeróbica (CNA e IMTA, 2007c).

En la eliminación de la materia orgánica (DBO) los 2 análisis se encuentran por debajo del límite máximo permitido que indica la norma oficial vigente: NOM-001-ECOL-96 (DOF, 1997), 43 y 49 mg/L (Cuadro 2 y 4).

**Análisis de sensibilidad**

En la Figura 2 se muestra las variables de decisión que se incluyen en la función objetivo, claramente se puede apreciar que el modelo es no lineal. De acuerdo con Anderson *et al.* (2004) se demuestra que la función es sensible al cambio de las variables. Los rangos considerados en la gráfica son los indicados en las restricciones del modelo.



**Figura 2. Gráfica de la función objetivo para laguna facultativa.**  
**Figure 2. Graph of the function target for facultative pond.**

the hydraulic flow in the pond is implemented. According to the results of Table 2 and 4, a reduction of area of 653 m<sup>2</sup> was obtained, which means 14.79%. The cost difference was \$ 524 982.15 which represents 9.95% compared to the traditional system. According Olukanni (2011) optimization in the design of stabilization ponds reduces the construction cost provided that appropriate design constraints are considered, such that compliance with the maximum permitted levels of pollutants that indicates the regulations. The present study agrees with the statements of that author.

The following researches discussed the optimization of the cost of pond systems: Otún and Oke (2001); Shilton and Harrison, (2003b) and Bracho *et al.* (2006) concluded that the greater number of screens hydraulic efficiency of the ponds would be improved, but it was necessary to take into account the construction costs. The results of this study indicate greater number of screens using optimization, yet above the cost was reduced by 9.95%.

It is said that when a material is biodegradable organic waste type is decomposed by biological agents: sun, water, plants or animals and microorganisms bacteria, algae, fungi or yeast. The organic material could be degraded aerobically or anaerobically (CNA and IMTA, 2007c).

In the elimination of organic matter (BOD) 2 analysis are below the maximum limit allowed the current official standard: NOM-001-ECOL-96 (DOF, 1997) 43 and 49 mg/L (Table 2 and 4).

**Sensitivity analysis**

In the Figure 2 the decision variables included in the objective function is shown clearly be tightened CIAR that the model is not linear. According to Anderson *et al.* (2004) shows that the function is sensitive to changing variables. Ranges seen in the graph are as shown in the model constraints.

For sensitivity analysis of fecal coliform and BOD is determinant the cells which depend on their numbers and according to the values recommended Muramatsu (2011) were modified. Figure 3 in the sensitivity analysis is observed for fecal coliform.

In Figure 3, to the y-axis | color black bar indicates a variation from 0 to 10 percent and the gray bar indicates the transition from 0 to -10% of the independent variables.

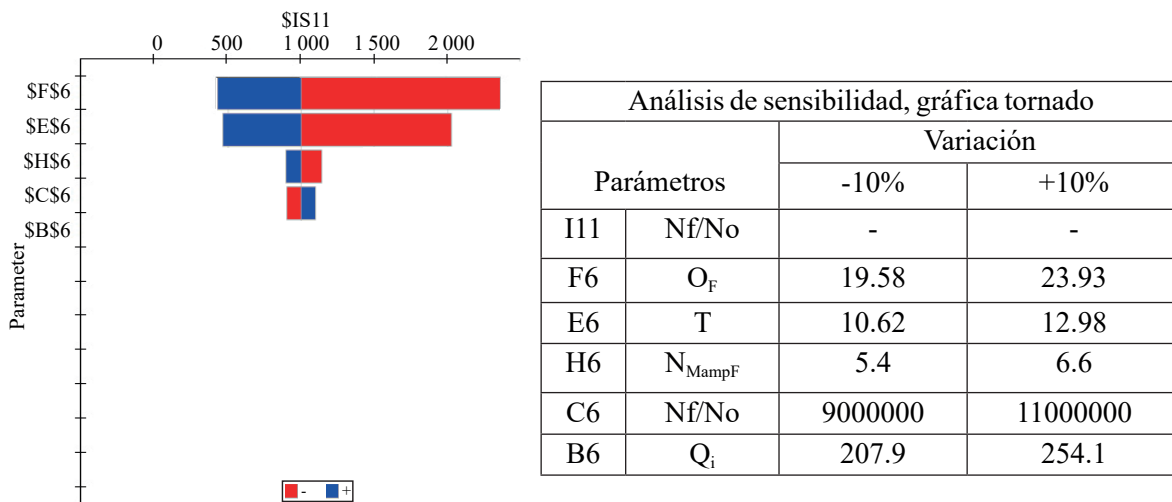
Para el análisis de sensibilidad de los coliformes fecales y la DBO, se determinaron las celdas de las cuales dependen y se modificaron sus números de acuerdo con los valores que recomienda Muramatsu (2011). En la Figura 3 se observa el análisis de sensibilidad para los coliformes fecales.

En la Figura 3, para el eje de las ordenadas la barra color negro indica una variación de 0 a 10 por ciento y la barra color gris, indica la transición de 0 a -10% de las variables independientes.

En el eje de las abscisas se indica el cambio en la variable dependiente, que en este caso es el número de coliformes fecales. Entre más grande sea la barra mayor será el cambio en la variable dependiente, de esta manera se observa qué variables son las que tienen mayor influencia en el resultado final.

On the x-axis change indicated in the dependent variable, which in this case is the number of fecal coliforms. Among larger the higher bar will change in dependents variable and thus which variables observed are having the greatest influence on the final result.

From the above it follows that the retention time is the greatest influence on the number of fecal coliform in the effluent, it n do be an inverse relationship: the higher the shorter retention time (black bar) is the number of fecal coliform. Worth mentioning than values shown in Figure 3 are unrelated to each other, changes are made independently in between the different variables. These data serve only as a reference or pointer for variables that affect the result. And if the model is



**Figura 3. Análisis de sensibilidad de número de coliformes fecales de la laguna facultativa.**

De lo anterior se infiere que el tiempo de retención es el que más influencia tiene sobre el número de coliformes fecales en el efluente, resultando ser una relación inversa: a mayor tiempo de retención (barra negra) menor es el número de coliformes fecales. Cabe mencionar que los valores mostrados en la Figura 3 no tienen relación entre sí, las variaciones se hacen de manera independiente entre las diferentes variables. Estos datos sirven solamente como una referencia o indicador para conocer que variables afectan el resultado final y si el modelo es sensible al cambio de éstas. Luego en orden de importancia sigue la temperatura: a menor temperatura mayor concentración del organismo indicador. De acuerdo a la jerarquía determinada por el diagrama se continúa con el número de mamparas y el gasto en el influente de la laguna.

sensitive to change them in order of importance then is the temperature: the lower the temperature higher concentration of the indicator organism. According to the given hierarchy or diagram p is continuous with the number of screens and spending in the influent of the lagoon.

In sensibility analysis, for organic matter (Figure 4) shows that the most sensitive rod is the concentration of BOD in the influent. In order of importance is the temperature. The lower the temperature and the concentration of organic matter d is greater, after the hydraulic retention time.

In the Figure 5 facultative pond dimensions determined with the optimization system shown.

En el análisis de sensibilidad para la materia orgánica (Figura 4) se observa que la barra más sensible es la concentración de la DBO en el influente. En orden de importancia sigue la temperatura. A menor temperatura la concentración de la materia orgánica es mayor, luego el tiempo de retención hidráulico.

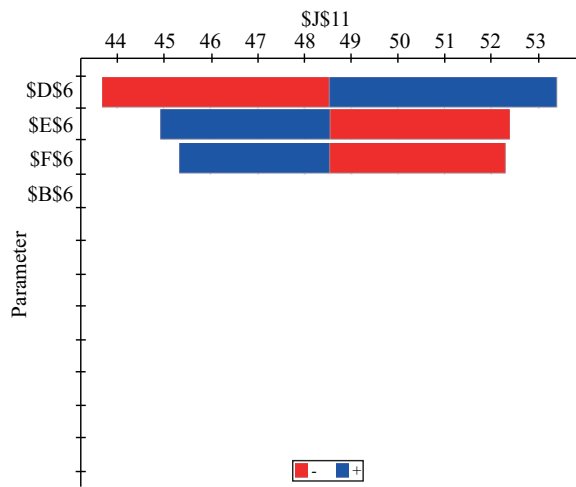
En la Figura 5 se muestran las dimensiones del estanque facultativo determinadas con el sistema de optimización.

Es importante indicar que los resultados del presente estudio sólo aplican en la región bajo análisis, ya que en el diseño influyen los factores ambientales que prevalezcan en el lugar donde se tenga proyectado llevar a cabo el proyecto.

Importantly, the results of this study apply only in the region, analysis and design to influence environmental factors prevailing in the place where you have planned to carry out the project.

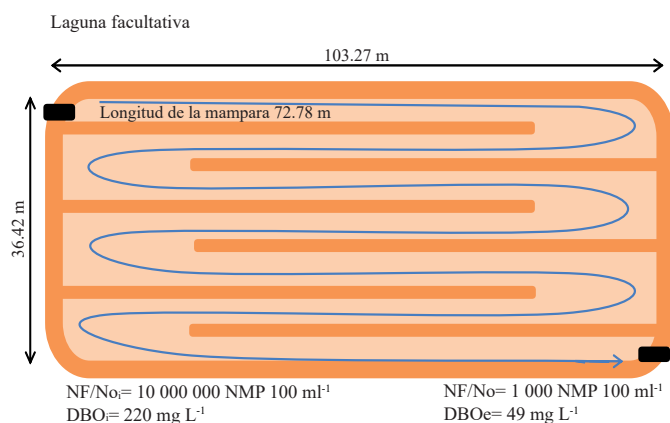
### Conclusions

We recommend the application of nonlinear programming optimization facultative pond design, obtained as optimal results: smaller area and cost. Although this paper is a case study, the approach and methodology proposed analysis



Análisis de sensibilidad, gráfica tornado			
Parámetros		Variación	
		-10%	+10%
J11	DBO <sub>e</sub>	-	-
D6	DBO <sub>i</sub>	198	242
E6	T	10.62	12.98
F6	O <sub>F</sub>	19.58	23.93
B6	Q <sub>i</sub>	207.9	254.1

**Figura 4. Análisis de sensibilidad de DBOe de la laguna facultativa.**  
**Figure 4. Sensitivity analysis of the facultative pond DBOe.**



**Figura 5. Dimensión es del sistema lagunar con el sistema de programación Solver de Excel.**  
**Figure 5. Dimension is the lagoon system with the system programming Excel Solver.**

could be applied to, various designs conditions and then perform optimization considering the arguments of the present article.

Up to date, many pond systems in Mexico fail or are abandoned for lack of knowledge in the operation and maintenance. The current works, in addition to the stated objective, establish criteria, procedure and analysis to make changes in these lagoon systems and thus optimize the treatment process. Advised to conduct this study at pilot scale and if possible to scale real, in order to verify the results of the optimization of the design and cost of the facultative pond.

*End of the English version*



## Conclusiones

Es recomendable la aplicación de la programación no lineal en la optimización del diseño de la laguna facultativa ya que se obtienen resultados óptimos: menor área y costo. No obstante que el presente trabajo es un caso de estudio, el criterio y la metodología de análisis propuestos pueden aplicarse a distintas condiciones de diseño para luego realizar la optimización considerando los razonamientos de análisis del presente artículo.

A la fecha muchos sistemas lagunares en México, fracasan o se encuentran abandonados por falta de conocimiento en la operación y mantenimiento. El presente trabajo pretende, además del objetivo indicado, establecer criterio, procedimiento y análisis para realizar modificaciones en esos sistemas lagunares y de esta manera optimizar el proceso de tratamiento. Se recomienda llevar a cabo el presente estudio a escala piloto y si es posible a escala real, con el propósito de verificar los resultados de la optimización del diseño y costo de la laguna facultativa.

## Literatura citada

- Abbas, H.; Nasr, R. and Seif, H. 2006. Study of waste stabilization pond geometry for wastewater treatment efficiency. *Ecol. Eng.* 28:25-34.
- Anderson, D. R.; Sweeney, D. J. y Williams, T. A. 2004. Métodos cuantitativos para los negocios. Thomson Corporation, México. 115 p.
- Bracho, N.; Lloyd, B. and Aldana, G. 2006. Optimization of hydraulic performance to maximize fecal coliform removal in maturation ponds. *Water Res.* 40:1677-1685.
- Comisión Nacional del Agua (CNA)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007a. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México. 56-83 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007b. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Manual de diseño de lagunas de estabilización. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México. 234 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA)-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2007c. Manual de diseño de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Guía para el control de descargas a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, México. 198 p.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). 1996. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas en aguas y bienes nacionales. Diario Oficial de la Federación, SEMARNAT-Secretaría de Gobernación, México. 29 p.
- Eppen, G. D.; Gould, F. J.; Schmidt, C. P.; Moore, J. H. y Weatherford, L. R. 2000. Investigación de operaciones en las ciencias administrativas. Trad. Español. González, R. A. C. y Sánchez, G. G. 5<sup>th</sup> (Ed.). Pearson, México, D. F. 72 p.
- Fonseca, C. M. and Fleming, P. J. 1995. An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization. *Evol. Comput.* 3:1-16.
- Frontline Systems, Inc. 2012. Guía de referencia: Frontline solvers. Version 12, USA, p. 135.
- Kilani, J. S. and Ogunrombi, J.A. 1984. Effects of baffles on the performance of model waste stabilization ponds. *Water Res.* 18: 941-944.
- Manga, J. G.; Molinares, N. R.; Soto, E. O.; Arrieta, J.; Escaf, G. J. and Hernández, A. G. 2004. Influence of inlet-outlet structures on the flow pattern of a waste stabilization pond. 6<sup>th</sup> International Conference of Waste Stabilization Ponds, Avignon, France.
- Muramatsu, M. 2011. Risk solver. Frontline systems Inc, Incline Village, Nevada, EUA, Versión 11.5.
- Muttamara, S. and Puetpaiboon, U. 1997. Roles of baffles in waste stabilization ponds. *Water Sci. Technol.* 35:275-284.
- Muttamara, S. and Puetpaiboon, U. 1996. Nitrogen removal in baffled waste stabilization ponds. *Water Sci. Technol.* 33:173-181.
- Oakley S. 2005. Lagunas de estabilización en Honduras. Manual de diseño, construcción, operación y mantenimiento, monitoreo y sostenibilidad. Universidad Estatal de California, Estados Unidos de Norteamérica. 201 p.
- Oke, I.A. and Otun, J.A. 2001. Mathematical analysis of economic sizing of stabilization ponds. *Nigerian J. Eng.* 9:13-21.
- Olukanni, O.D. and Ducoste, J. J. 2011. Optimization of waste stabilization pond design for developing nations using computational fluid dynamics. *Ecol. Eng.* 37:1878-1888.
- Pearson, J. 2000. The hydraulic performance of ponds of various layouts. *Urban Water.* 2:243-250.
- Pedahzur, R.; Nasser, A. M.; Dor, I.; Fattal, B. and Shuval, H. I. 1993. The effect of baffle installation on the performance of a single-cell stabilization pond. *Water Sci. Technol.* 27:45-52.
- Rico, M. M.; Escalante E. V.; Rivas H. A. y González G. L. 1992. Alternativas de optimización de sistemas lagunares y reactores anaerobios. IMTA. México. 16 p.
- Rolim, M. S. 2000. Sistemas de lagunas de estabilización. Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío. OPS y OMS, McGraw-Hill, Colombia. 199-323 p.
- Sah, L.; Rousseau, D. and Hooijmans, C. 2012. Numerical modelling of waste stabilization ponds: where do we stand? *Water Ail Soil Pollut.* 223:3155-3171.
- Salter, H. E.; Ta, C. T.; Ouki, S. K. and Williams, S. C. 2000. Three-dimensional computational fluid dynamic modelling of a facultative lagoon. *Water Sci. Technol.* 42:335-342.
- Shilton, A. N. and Harrison, J. 2003a. Guidelines for the hydraulic design of waste stabilisation ponds. Institute of Technology and Engineering Massey University, New Zealand, URL: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/agua2003/hidra.pdf>.
- Shilton, A. N. and Harrison, J. 2003b. Integration of coliform decay within a CFD (computational fluid dynamic) model of a waste stabilization pond. *Water Sci. Technol.* 48:205-210.

- Shilton, A. N. and Mara, D. D. 2005. CFD (computational fluid dynamics) modeling of baffles for optimizing tropical waste stabilization ponds system. *Water Sci. Technol.* 51:103-106.
- Sperling, M.; Chernicharo, C. A. L.; Soares, A. M. E. and Zerbini, A. M. 2003. Evaluation and modelling of helminth eggs removal in baffled and unbaffled ponds treating anaerobic effluent. *Water Sci. Technol.* 48:113-120.
- Sweeney, D. G.; Cromer, N. J.; Nixon, J. B.; Ta, C. T. and Fallo-wfield, H. J. 2003. The spatial significance of water quality indicators in waste stabilization ponds- limitations of residence time distribution analysis in predicting treatment efficiency. *Water Sci. Technol.* 48:211-218.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF). 2006. Agua y saneamiento y los ODM. Disponible en: [http://www.unicef.org/spanish/publications/files/Progress\\_for\\_Children\\_No.\\_5\\_Spanish\(1\).pdf](http://www.unicef.org/spanish/publications/files/Progress_for_Children_No._5_Spanish(1).pdf).
- Winfrey, B. K.; Stronsnider, W. H.; Nairn, R. W. and Strevett, K. A. 2010. Highly effective reduction of fecal indicator bacteria counts in an ecologically engineered municipal wastewater and acid mine drainage passive co-treatment system. *Ecol. Eng.* 36:1620-1626.
- Zanotelli, C. T.; Medri, W.; Belli-Filho, P.; Perdomo, C. C. and Costa, R. H. R. 2002. Performance of a baffled facultative pond treating piggery wastes. *Water Sci. Technol.* 45:49-53.