

Metodología para el diseño de humedales con flujo subsuperficial horizontal

INTRODUCCIÓN

Los tratamientos convencionales de las aguas residuales son costosos y requieren altos consumos energéticos, además, en su mayoría no eliminan nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo causantes de la eutroficación en los cuerpos receptores de los efluentes de estas plantas.

Los llamados sistemas naturales y dentro de estos los humedales han venido a resolver parte de estos problemas. Existe incertidumbre sobre el funcionamiento de estos dispositivos en países tropicales, pues estos estudios se han llevado a cabo fundamentalmente en países de clima templado.

Los estudios hidráulicos se basan en la aplicación de expresiones conocidas de otros sistemas de tratamiento biológicos para su diseño, no mostrándose en la literatura consultada estudios experimentales del comportamiento del flujo, ni el tratamiento de los datos aplicando la teoría de reactores.

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una metodología que incorpore tanto los elementos desde el punto de vista de la cinética del proceso de tratamiento, como los elementos geométricos e hidráulicas con la comprobación del tipo de flujo a esperar dentro del reactor.

FLUJO SUBSUPERFICIAL (SFS)

La circulación del agua a través del suelo o material de soporte parece ser siempre más efectiva que la circulación de superficie para muchos de los mecanismos de degradación de los contaminantes presentes en las aguas residuales. Hay que tener en cuenta que los

Resumen / Abstract

Los tratamientos convencionales de las aguas residuales son costosos y requieren altos consumos energéticos, además en su mayoría no eliminan nutrientes esenciales como nitrógeno y fósforo causantes de la eutroficación en los cuerpos receptores de los efluentes de estas plantas. Los llamados sistemas naturales y dentro de estos los humedales han venido a resolver parte de estos problemas. El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de una metodología que incorpore tanto los elementos desde el punto de vista de la cinética del proceso de tratamiento, como los elementos geométricos e hidráulicas con la comprobación del tipo de flujo a esperar dentro del reactor.

Palabras Clave: área superficial, humedales, tiempo de retención hidráulico, modelos de flujo, tanques en serie.

Conventional wastewater treatments require high-energy consumption and cost. These plants in most cases do not eliminate essential nutrients like phosphorous and nitrogen, principal agents of eutrophication in water bodies. The so called natural systems and specifically wetland systems have come to solve part of those problems. The objective of the present work is to obtain experimental hydraulics design methodology for Cuban conditions including testing of flow conditions inside the reactor.

Keywords: surface area, wetlands, hydraulic retention time, flow models, series tank models.

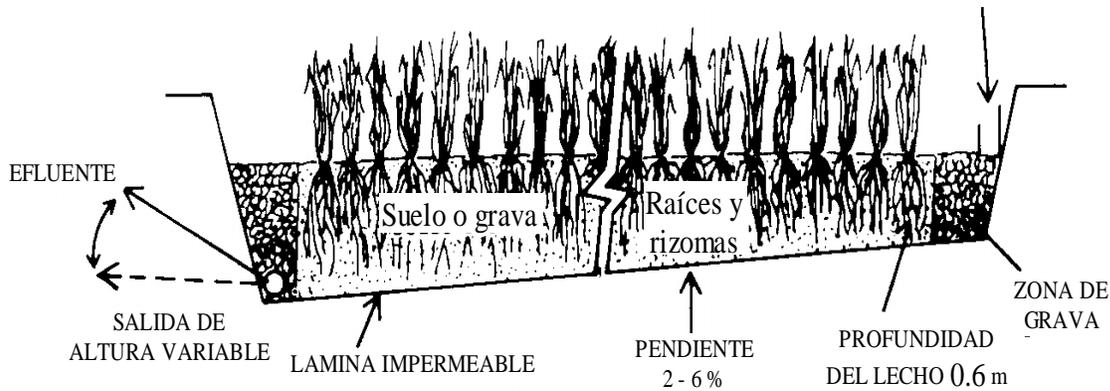


Figura 1. Sistema de flujo subsuperficial horizontal

microorganismos que degradan la materia orgánica se encuentran principalmente en la zona alrededor de las raíces de las plantas (Martín 1989; Breen 1990).

Durante el paso del agua residual se prevé un contacto con las zonas aeróbicas, anóxicas y anaeróbicas. La zona aerobia se encuentra alrededor de las raíces y rizomas de las plantas. En la figura 1 se muestra un esquema típico de un sistema de flujo subsuperficial horizontal.

Estudios publicados demuestran la capacidad de los Humedales de flujo horizontal subsuperficial para remover cantidades significativas de materia orgánica, nitrógeno, fósforo, sólidos suspendidos, bacterias y metales pesados del agua residual (Reed et al. 1988; Metcalf and Eddy 1993; Polprasert 1996).

Parámetros de diseño

Profundidad

En estudios realizados por Burka and Laurence (1990), se obtuvieron resultados de rangos óptimos de profundidad para plantas acuáticas emergentes, estos resultados se muestran en la siguiente tabla 1.

Área de la sección transversal

El área de la sección transversal es calculada por ambos métodos de diseño usando una de las formas de la ecuación de Darcy. Esta ecuación también es recomen-

dada por la W.E.F. (1990).

$$A_c = \frac{Q}{K_D S} \tag{1}$$

donde:

A_c - área transversal del lecho (m²)

K_D - conductividad hidráulica Darciana (m/s)

Q - caudal medio que circula a través del sistema (m³/s)

S - pendiente longitudinal del fondo del lecho recomendada del 1% (m/m)

Investigadores como Reed et al. (1988), plantean que la velocidad del flujo definida por el producto (KDS) se debe limitar a 6.8m/d para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas.

Kadlec y Knight (1996) consideran que puede escogerse el 10% de la profundidad del lecho de soporte como valor máximo de disminución de altura entre la entrada y la salida del sistema. Si se expresa este criterio de forma geométrica se puede plantear:

$$S_b < 0.1 \frac{h_o}{L} \tag{2}$$

Tabla 1. Profundidad de enraizamiento

Plantas	Profundidad de la raíz dentro del agua.
Elcocharis ovata	5 cm
Juncus effusus y Scirpus microcarpus	5-15 cm
Iris pseudocorus	10-20 cm
Typha latifolia	15-60 cm
Sparganium spp	60-120 cm
Scirpus acutus	60-200 cm

$$0.1 > \frac{S_b}{(h_o/L)} = G_1 \quad (3)$$

siendo:

h_o - profundidad del agua en el humedal (m).

S_b - pendiente del fondo (0/00)

L - longitud del humedal (m).

G_1 - número geométrico (adimensional)

La ocurrencia de cargas excesivas o disminuciones de la conductividad hidráulica pueden producir gradientes demasiado altos capaces de ocasionar inundaciones. Un límite del 10% de la altura del lecho en las pérdidas de carga permisibles es suficiente para su buen funcionamiento en este sentido (Kadlec y Knight 1996). Expresando este criterio geométricamente quedaría:

$$\frac{Q}{LW} \frac{L^2}{K_D h_o^2} < 0.1 \quad (4)$$

$$0.1 > \frac{q/K_D}{(h_o/L)^2} = G_3 \quad (5)$$

donde:

K_D - conductividad hidráulica Darciana (m/d)

G_3 - número de carga.

q - carga hidráulica superficial (m/d)

W - ancho (m).

Área superficial: modelos matemáticos empleados

De acuerdo con lo planteado en la W.E.F. (1990) y la E.C./E.W.P.C.A. (1990), se recomienda la siguiente ecuación para el cálculo del área superficial en Humedales de flujo horizontal.

$$A_s = \frac{[Q(\ln C_o - \ln C_e)]}{K_T dn} \quad (6)$$

la cual se deriva del modelo aplicado para flujo pistón, que relaciona la eficiencia de remoción con el tiempo de retención:

$$C_e/C_o = \exp(-K_T t) \quad (7)$$

donde:

C_e - concentración de DBO₅ del efluente (mg/l)

C_o - concentración de DBO₅ del afluente (mg/l)

K_T - constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d⁻¹)

t - tiempo de retención (d)

d - profundidad del lecho (m)

n - porosidad del medio (como fracción)

A_s - área superficial del sistema (m²)

La expresión 7 es un modelo de reacción base volumen. Más recientemente se han planteado modelos de reacción base área para el análisis del flujo en reactores, como flujo pistón y como mezcla completa (Kadlec y Knight, 1996).

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{K_{fp}}{q}\right) = \left(1 + \frac{K_N}{Nq}\right)^{-N} \quad (8)$$

donde:

K_{fp} - constante de reacción de primer orden base área para flujo pistón (m/año)

K_N - constante de reacción de primer orden base área para N tanques en serie (m/año)

N - número de tanques de mezcla completa en serie supuesto.

q - carga hidráulica (m/año).

Los términos $K_T t$ de la expresión 2.7 y K/q de la expresión 2.8 son conocidos como el número de Damköhler (Da), para los modelos base volumen y base área respectivamente.

Otro criterio práctico recomienda áreas entre 5-10 m²/Pe (Pe, es la población equivalente) para aguas residuales domésticas para lograr efluentes de 20 mg/l de DBO y 30 mg/l de SS, (para concentraciones afluentes entre 150-300 mg/l).

Relación largo- ancho

La relación largo/ancho debe estar entre 3:1 y 10:1 en dependencia de las cargas a tratar, de los contaminantes que se desean remover y del tipo de flujo; la superficie del lecho debe ser llana y el fondo se recomienda que tenga una pendiente no mayor del 3% que permita que el residual fluya a través del substrato venciendo las fuerzas de fricción del medio (Steiner 1993; Cooper 1993).

Módulos de dispersión en sistemas de tratamiento naturales.

Entre los sistemas de tratamiento llamados naturales, las lagunas de oxidación han sido, hasta el momento, los más estudiados, al igual que en los SFS, un parámetro de especial importancia es la determinación del módulo de dispersión. En tal sentido, Dawkins (1963) advirtió que el módulo de dispersión en un reactor podía relacionarse con algunos factores de su geometría y con las propiedades del fluido

Luego de analizar los trabajos de varios investigadores

(Polprasert y Bhattarai 1985) se planteó una ecuación adaptada de la expresión propuesta por Liu (1977), y que es aplicable a reactores estrechos, teniendo en cuenta la profundidad del reactor independiente del radio hidráulico, según:

$$\frac{D}{vL} = \alpha \frac{u}{u^*} \frac{W^2}{Lh} \quad (9)$$

donde:

W - ancho del reactor,

L - longitud del reactor, h es la profundidad del reactor

α - constante que depende sólo de la forma de la sección transversal del canal

U - velocidad media del flujo en el reactor (m/d)

u^* - velocidad cortante o dinámica, que equivale a $(\sqrt{f/8})u$.

f - factor de fricción que equivale a $24/N_R$ para canales uniformes con flujo laminar.

N_R - Número de Reynolds = $(ud_0)/\nu$;

donde: ν - viscosidad cinemática.;

d_0 - diámetro hidráulico = $4R$.;

R - radio hidráulico.

Utilizando datos experimentales de estanques a escala piloto en Tailandia y Corinne (Utah), Polprasert y Bhattarai (1985), calcularon los valores de α para la ecuación propuesta por ellos. Posteriormente, obtuvieron mediante la correlación de los valores de α y u^*/u la siguiente expresión:

$$\alpha = 0.213 \left[\frac{u^*}{u} \right]^{1.978} \quad (10)$$

Sustituyendo la expresión 2.25 en la 2.24 y luego de algunos reordenamientos, se obtuvo:

$$\frac{D}{vL} = \frac{0.184 [tv(W + 2h)]^{0.489} W^{1.511}}{(Lh)^{1.489}} \quad (11)$$

Modelo de Tanques en Serie

En el caso ideal de que exista un reactor de mezcla completa perfecta y se le inyecte en forma de disparo un trazador conservativo, el mismo se mezcla instantáneamente y comienza a aparecer en la salida con un comportamiento respecto al tiempo similar al de una curva exponencial de exponente negativo, ya que en el instante $t=0$ aparece la concentración inicial instantánea y paulati-

namente se va diluyendo con el flujo que continúa entrando al reactor. La ecuación que describe dicha distribución de concentraciones respecto al tiempo es:

$$C = C_0 e^{-t \left(\frac{Q}{V} \right)} = C_0 e^{-t/t_0} = C_0 e^{-\theta} \quad (12)$$

en la cual C_0 es la concentración inicial de trazador, C la concentración de salida, t_0 el tiempo de retención teórico, Q el gasto de entrada y V es el volumen del reactor.

Si se colocan dos reactores de mezcla completa de iguales dimensiones uno a continuación del otro y se efectúa una inyección de trazador en forma de disparo en el primer reactor, entonces la concentración de entrada del segundo sería la concentración de salida del primero, cuya ecuación de concentración de salida sería:

$$C = C_0 e^{-Nt \left(\frac{Q}{V} \right)} = C_0 e^{-N(t/t_0)} = C_0 e^{-N\theta} \quad (13)$$

donde V es el volumen total de todos los reactores y V/N es el volumen de un reactor. Planteando un balance de masa para el segundo reactor, sustituyendo la concentración de entrada de éste por la de salida del primero y resolviendo la ecuación diferencial aplicando integral de convolución o transformadas de Laplace, se llega a la expresión:

$$C_2 = C_0 \left(\frac{NQ t}{V} \right) e^{-\left(\frac{NQ t}{V} \right)} = C_0 N \theta e^{-N\theta} \quad (14)$$

y para describir el comportamiento de la concentración del efluente en el i -ésimo reactor queda la forma generalizada:

$$C_i = \frac{C_0}{(i-1)!} \left(\frac{NQ t}{V} \right)^{i-1} e^{-\left(\frac{NQ t}{V} \right)} = \frac{C_0}{(i-1)!} (N\theta)^{i-1} e^{-N\theta} \quad (15)$$

El modelo de tanques en serie supone que el reactor puede representarse dividido en varios tanques de mezcla completa ideal, del mismo tamaño, en serie, siendo la cantidad de tanques el único parámetro a determinar (Levenspiel 1974; Kadlec y Knight 1996). Para este modelo no se presentan los problemas de fijar las condiciones de contorno, ni los modos de inyectar y medir el trazador; por lo que las curvas C o E pueden obtenerse fácilmente. Así, para un solo tanque (mezcla completa) se obtiene:

$$\bar{t}_i E = e^{-t/\bar{t}_i} \quad N=1 \quad (16)$$

y para N tanques en serie:

$$\bar{t}_i E = \left(\frac{t}{\bar{t}_i}\right)^{N-1} \frac{1}{(N-1)!} e^{-t/\bar{t}_i} \quad (17)$$

$$E_{\theta_i} = \bar{t}_i E = \frac{\theta_i^{N-1}}{(N-1)!} e^{-\theta_i} \quad (18)$$

$$E_{\theta} = (N\bar{t}_i) E = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} e^{-N\theta} \quad (19)$$

siendo \bar{t}_i : tiempo medio de residencia por cada tanque; $\bar{t} = N\bar{t}_i$ tiempo medio de residencia en el conjunto de N tanques; $\theta_i = t/\bar{t}_i = Nt/\bar{t}$ y $\theta = t/\bar{t} = t/N\bar{t}_i$.

Las expresiones planteadas por Crites y Tchobanoglous (1998), son similares a las planteadas por Levenspiel (1974), sólo que estas últimas se presentan de forma normalizada.

Modelo de tanques en serie con retardo

Para ajustar el modelo de tanques en serie a las características de los SFS se debe analizar el tiempo que tarda la respuesta del trazador aplicado en alcanzar la salida del lecho. Tal retardo se puede describir mediante la adición de un elemento de flujo pistón de la red de flujo (Kadlec y Knight 1996), denominando t_d al tiempo de retardo puede plantearse la RTD en dos partes:

$$E = 0 \quad t < t_d$$

$$E = \frac{N}{(N-1)!} \left[N \frac{(t-t_d)}{\bar{t}} \right]^{N-1} \exp \left[-N \frac{(t-t_d)}{\bar{t}} \right] \quad t > t_d \quad (20)$$

Aquí puede observarse que lo planteado en la ecuación anterior es sólo el desplazamiento del intercepto en el modelo de tanques en serie para hacerlo coincidir con los datos reales observados en un humedal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Estudios hidrodinámicos: descripción de la instalación.

El sistema concebido para la simulación del flujo

subsuperficial y la toma de los datos de comportamiento de la concentración de trazador en el medio poroso consta de las siguientes partes: ver figuras 2 y 3.

- 1- Sistema de alimentación.
- 2- Elementos de medición y control del caudal.
- 3- Reactor.

Empaquetadura

Como material de empaquetadura se empleó grava de $d_{10}=6.00\text{mm}$ y un $d_{60}=15.00\text{mm}$, con un 36% de huecos y un tamaño máximo de 19 mm. Este ocupa un volumen en el reactor de 1.98m^3 .

Pozos para la toma de muestras

Están colocados de forma vertical, desde el fondo del reactor hasta 3.00cm por encima de la grava, en el medio soporte. Consisten en 4 tubos de 44mm de diámetro y 60.00cm de longitud perforados en toda su área lateral para permitir que el flujo pase a través de ellos sin que se originen perturbaciones. Están espaciados a 1m y separados 0.90m de los dispositivos de entrada y salida en sentido longitudinal, y espaciados a 0.70m y separados 0.40m de los laterales del reactor en sentido transversal, ver fig 2 y 3.

Dispositivo de salida

Consiste en un tabique colocado a 10 cm de la pared posterior del reactor con dimensiones de 0.25 m de altura y 1.5 m a todo lo ancho del reactor. En la pared de salida se ubicaron 7 orificios de 14.4 mm de diámetro, espaciados a 21 cm y a una altura de 44 cm, ver fig. 2 y 3.

Caracterización del material de empaquetadura

El material es una grava tipo caliza de molinos, de color claro y forma angulosa. Granulometría, $d_{10}=6.00\text{mm}$, $d_{60}=15.00\text{mm}$ y un tamaño máximo de 19 mm, dureza: 4 según la escala de Moh y porosidad de 36%.



Figura 2. Modelo físico usado para el estudio del flujo.



Figura 3. Dispositivo de salida.

Determinación de la conductividad hidráulica y la permeabilidad intrínseca

Los parámetros mostrados en la siguiente tabla 2 se calcularon mediante las expresiones que rigen el comportamiento del flujo en un medio poroso (Pérez Franco 1983; Pérez Franco 1982).

Trazador utilizado

El trazador utilizado fue la Fluoresceína Sódica ($C_{20}H_{10}O_5Na_2$), también conocida comercialmente como Uranina, la cual es la sustancia de uso más generalizado en trabajos de hidrología (Custodio y Llamas, 1976).

Equipo empleado para la medición de la concentración de trazador

El equipo usado para la determinación de la concentración de Uranina en las muestras extraídas del modelo fue un espectrómetro de absorción de simple rayo modelo KΦ K-2, el cual permite determinar el por ciento de transmitancia (%T) o la absorbancia (A) de una disolución coloreada en las regiones del UV, V e IR

Determinación del gasto a aplicar según tiempo de retención deseado y parámetros hidráulicos correspondientes

Para la determinación del gasto necesario a la entrada del reactor se dividió el volumen de agua del mismo por el tiempo de retención deseado. A continuación, se muestran tales resultados en la tabla 3.

Como puede observarse en los resultados anteriores, los gradientes promedios que se establecen en el reactor para las dos velocidades del flujo, no sobrepasan el gradiente crítico Darciano, por lo que puede afirmarse que en todo momento estaremos en presencia de régimen de flujo lineal y podrán aplicarse las leyes de Darcy sin dificultades apreciables.

Metodología seguida para la toma de muestras

Para el seguimiento del flujo en el reactor se prepararon dos disoluciones de Uranina de 50g/l cada una, éstas fueron usadas en las dos pruebas realizadas.

Tabla 2. Parámetros hidráulicos del material de empaquetadura

Parámetros	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Coficiente de la fórmula exponencial (n)	—	0.6571	—	—
Conductividad hidráulica (K_p)	m/s	0.1514	cm/s	15.14
Permeabilidad intrínseca (k)	m ²	1.35×10^{-7}	cm ²	1.35×10^{-3}
Conductividad Darciana (K_D)	m/s	1.4854	m/día	128337.75.14
Conductividad turbulenta (K_T)	m/s	0.1020	m/día	8808.11
Constante de la fórmula binómica (a)	s/m	0.6732	—	—
Constante de la fórmula binómica (b)	s ² /m ²	96.2192	—	—
Rugosidad equivalente del medio poroso (c)	—	0.3471	—	—
Número de Reynolds crítico (N_{RCR})	—	0.1440	—	—
Gradiente crítico Darciano (I_{CRD})	—	2.35×10^{-4}	—	—
Gradiente crítico turbulento (I_{CRT})	—	1.88	—	—

Tabla 3. Gasto, velocidad promedio y gradiente hidráulico para los tres tiempos de retención estudiados

Tiempo de retención (h)	Q (l/min.)	V _{aparente} (cm/min.)	V _{aparente} (m/s)	I
12	0.92	0.139	0.232×10^{-4}	1.57×10^{-5}
24	0.46	0.068	0.116×10^{-4}	0.78×10^{-5}

Primeramente, se reguló el gasto en el sistema para el tiempo de retención deseado; luego, cuando el mismo estuvo estabilizado, lo cual se determinó por aforo volumétrico en la salida del reactor, se taparon los orificios de la flauta distribuidora y se inyectó el trazador en la entrada, tratando de que la interrupción del flujo fuera la mínima posible. A partir de este momento, se tomaron muestras simultáneas cada 30 minutos a 15cm y 30cm de profundidad en cada pozo, a la entrada y a la salida del reactor (ver fig. 2 y 3, lo que hacen un total de 10 muestras cada 30 minutos).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Metodología propuesta

Datos necesarios para el diseño

- Caudal afluente.
- Características físicas e hidráulicas del medio soporte: porosidad del medio soporte (% de huecos), la conductividad hidráulica Darciana o la permeabilidad intrínseca y la temperatura promedio del agua.
- Características del afluente (DBO₅, concentración de nitrógeno, de fósforo, de trazas de metales pesados, de patógenos, etc.).
- Valor de la constante de velocidad de primer orden del sistema a 20°C (K₂₀).
- Características de las plantas emergentes que se van a utilizar, fundamentalmente la profundidad radicular máxima.
- Características deseadas en el efluente. (DBO₅, concentración de nitrógeno, de fósforo, de trazas de metales pesados, de patógenos, etc.).

Pasos para el diseño

1- Determinación de la profundidad del humedal

La profundidad de un humedal estará regida por la profundidad máxima que alcancen las raíces de las plantas emergentes que se vayan a utilizar. Según estudios realizados la profundidad de las raíces puede oscilar entre 0.3 y 0.9m.

2- Determinación del área superficial

El área superficial del SFS se calcula mediante la expresión:

$$A_s = \frac{[Q(\ln C_0 - \ln C_e)]}{K_T h n}$$

donde:

C_e - concentración de DBO₅ del efluente (mg/l)

C₀ - concentración de DBO₅ del afluente (mg/l)

K_T - constante de velocidad de reacción del sistema (d⁻¹)

T - temperatura del agua (°C)

K₂₀ - constante de velocidad de primer orden del sistema a 20°C (d⁻¹)

h - profundidad del lecho (m)

n - porosidad del medio (como fracción de 1)

A_S - área superficial del sistema (m²)

En este caso, la aplicación del modelo será para la remoción de DBO.

3- Determinación de tiempo de retención

La determinación de tiempo de retención teórico que tendrá el Humedal puede hacerse mediante la expresión:

$$t_r = \frac{\ln C_0 - \ln C_e}{K_T}$$

la cual, al igual que la expresión del área superficial, se deriva del modelo de flujo pistón base volumen que relaciona la eficiencia de remoción con el tiempo de retención:

$$C_e / C_0 = \exp(-K_T t_r)$$

4- Determinación de la pendiente del lecho y la velocidad del flujo

La velocidad del flujo, definida por el producto (K_DS), se debe limitar a 6.8m/d para minimizar el arrastre localizado de películas biológicas, por lo que la pendiente del lecho tendrá un valor tal que:

$$86400 K_D S < 6.8$$

Para tener un margen de seguridad y como primera aproximación puede comenzarse con:

$$S = \frac{6}{86400 K_D} \quad \text{ó} \quad S = \frac{1}{14400 K_D}$$

5- Determinación del área de la sección transversal

El área de la sección transversal se calcula mediante la expresión:

$$A_c = \frac{Q}{K_D S}$$

donde:

A_c - área transversal del lecho (m^2)

K_D - conductividad hidráulica Darciana (m/s)

Q - caudal medio que circula a través del sistema (m^3/s)

S - pendiente longitudinal del fondo del lecho.

6- Determinación del ancho y de la longitud del humedal

Conocida el área de la sección transversal y la profundidad del lecho puede plantearse:

$$b = \frac{A_c}{d}$$

donde:

b - ancho del humedal (m).

d - profundidad del agua (m).

Con el valor de ancho y de área superficial puede determinarse la longitud L :

$$L = \frac{A_s}{b}$$

7- Chequeo de la pendiente del lecho. Número geométrico (G_1)

Para evitar que disminuciones en el caudal del afluente hagan bajar el gradiente hidráulico de forma excesiva afectando con ello a las plantas, debe cumplirse que:

$$0.1 > \frac{S}{(h_o/L)} = G_1$$

donde:

h_o - profundidad del agua.

En caso de que la desigualdad anterior no se cumpla se debe disminuir la pendiente del lecho y recalcularse a partir del paso 4.

8- Chequeo de la carga superficial. Número de carga (G_3)

La ocurrencia de cargas excesivas o disminuciones de la conductividad hidráulica que conduzcan a gradientes demasiado altos pueden ocasionar disminuciones de la

eficiencia debido a inundaciones. Para evitar esto debe cumplirse que:

$$0.1 > \frac{q/K_D}{(h_o/L)^2} = G_3$$

donde:

$q = \frac{Q}{bL}$ es la carga superficial que recibe el humedal m^3/m^2s .

En caso de que la desigualdad anterior no se cumpla se debe disminuir la pendiente del lecho y recalcularse a partir del paso 4.

9- Altura del dispositivo de salida

El dispositivo de salida del efluente del Humedal, debe estar situado a una altura tal que favorezca el paralelismo entre la superficie del agua y el lecho. La superficie del agua debe hacerse coincidir con la superficie del medio soporte para que toda la zona radicular se encuentre sumergida. Este dispositivo debe ser capaz de propiciar una buena distribución del flujo a la salida, evitando las zonas muertas.

10- Determinación del módulo de dispersión

La determinación de módulo de dispersión que tendrá el sistema puede hacerse mediante la expresión:

$$\frac{D}{uL} = 0.001 \left(\frac{R}{uK_D} \right)^{0.386} \frac{b^2}{Lh}$$

en la que: $R = \frac{bh}{2h+b}$ y $K_D = \frac{gk}{v}$.

donde:

R - radio hidráulico del canal equivalente $= 2h+b$.

h - altura del agua en el SFS.

b - ancho del SFS.

L - longitud de SFS.

u - velocidad aparente del flujo.

K_D - conductividad hidráulica Darciana.

11- Determinación de la varianza adimensional

Conociendo el valor del módulo de dispersión del sistema, la determinación de la varianza adimensional puede hacerse mediante la expresión:

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma^2}{t^2} = 2\left(\frac{D}{vL}\right) - 2\left(\frac{D}{vL}\right)^2 (1 - e^{-vL/D})$$

la cual es aplicable en reactores cerrados, como es el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial.

12- Determinación del número de tanques en serie

El número de tanques de mezcla completa en serie que simulan el comportamiento del reactor en cuestión se determina hallando el recíproco de la varianza adimensional antes calculada, es decir,

$$N = \frac{1}{\sigma_{\theta}^2}$$

Mientras más tanques de mezcla completa en serie simulen el comportamiento del reactor, más tendencia a flujo pistón tendrá el mismo, lo cual será más provechoso para su eficiencia. Según la literatura consultada, un modelo que incluye cuatro reactores de mezcla completa en serie puede ser usado para describir las características hidráulicas de los humedales artificiales (Crites y Tchobanoglous 1998). El número de tanques de mezcla completa en serie calculados mediante la expresión anterior debe aproximarse a un valor entero para evitar errores matemáticos en la evaluación del modelo para la predicción de la RTD del sistema.

13- Determinación del tiempo de retardo

Para la estimación del tiempo de retardo del flujo t_d , según lo observado en este trabajo, puede usarse la expresión:

$$t_d = 0.05 + 0.0535t_r^{1.5}$$

donde t_r es el tiempo de retención teórico en horas.

14- Determinación de la RTD

La predicción de la RTD que tendrá el humedal puede hacerse mediante el modelo de tanques en serie con retardo, tal que:

$$C_{\theta} = 0 \quad t < t_d$$

$$C_{\theta} = \frac{N}{(N-1)!} \left[N \left(\theta - \frac{t_d}{t} \right) \right]^{N-1} \exp \left[-N \left(\theta - \frac{t_d}{t} \right) \right] \quad t > t_d$$

donde:

N - número de tanques en serie.

t_d - tiempo de retardo.

θ - tiempo adimensional igual a $\frac{t}{t_r}$.

Como puede observarse, la curva E que se genera no es más que una función adimensional que representa la variación de las concentraciones respecto al tiempo. La misma es útil para predecir el comportamiento que tendrá el flujo dentro del reactor y verificar su tendencia.

Ejemplo de diseño

La tabla 4 muestra un resumen de las principales dimensiones del sistema calculado.

Tabla 4. Resultados del dimensionamiento del ejemplo

REL. LARGO/ANCHO (L/B)	3	5
b para un reactor (m)	8	5
L para un reactor (m)	24	24
A_s para un reactor (m ²)	192	120
Cantidad de reactores	44	70
A_s total real (m ²)	8448	8400

Del análisis de la RTD generada (ver figura 4) por el modelo de tanques en serie con retardo en el ejemplo anterior se puede concluir que la misma brindó un TRH de 1.5 horas. Este parámetro, al ser calculado por las relaciones geométricas, es de 1.36 horas.

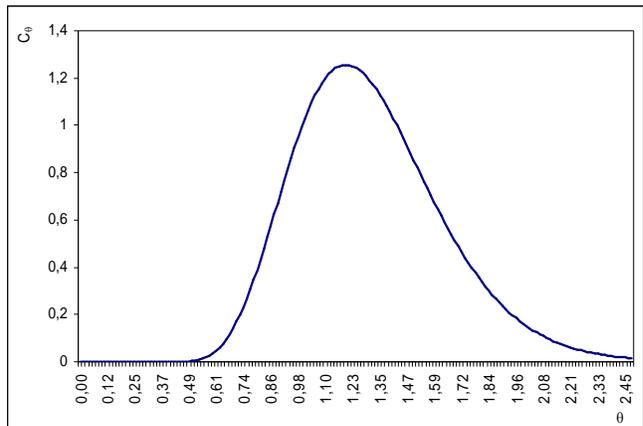


Figura 4. Curva RTD generada por el modelo propuesto en este trabajo

El resultado brindado por el ejemplo de cálculo, demuestra la adecuada reproducción del fenómeno que brinda el modelo propuesto en este trabajo, en esta curva se observa una marcada tendencia a la simetría lo que concuerda con el número de tanques calculado, y la alta probabilidad del comportamiento del flujo como pistón.

CONCLUSIONES

- Se propone una expresión matemática, basada en el modelo de flujo disperso propuesto por Polprasert y Bahattarai, la cual permite determinar el módulo de dispersión en SFS a partir del conocimiento de parámetros físicos y geométricos del reactor, sin necesidad de realizar estudios con trazadores. Esta expresión se encuentra en proceso de validación por lo que su utilización debe hacerse con extremo cuidado.

- Se utilizó por primera vez con datos reales el modelo de dispersión convección como herramienta para la validación del modelo matemático propuesto en este trabajo, brindando el mismo buenos resultados.

- La metodología propuesta es una herramienta útil para el diseño de SFS en las condiciones de clima tropical. Esta metodología, incluye el chequeo de las características que tendrá el flujo dentro del reactor una vez puesto en funcionamiento.

REFERENCIAS

- Burka, U and Lawrence, P. C.** (1990). "A new community approach to waste treatment with higher water plants". *Constructed Wetlands in Water Pollution Control* (Eds. P. F. Cooper and B. C. Findlater), *Advances in water pollution control 11*, Pergamon Press, Oxford, pp 359-371.
- Breen, P. F.** (1990). "A mass balance methods for assessing the potential of artificial wetlands for wastewater treatment". *WaterRes.*, 24(6):689-697
- Cooper, P. F.** (1993). "The use of reed bed systems to treat domestic sewage: the European design and operations". G. A. Moshiri (Editor). *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA.. pp 203-217.
- Custodio, E. y Llamas, M. R.** (1976). "Hidrología Subterránea". Tomo II, Ediciones Omega S.A., Barcelona.
- Dawkins, G.S.** (1963). "Mixing Patterns and Residence Time Distribution". 18th Industrial Waste Conference, Purdue University, Lafayette.
- E.C./E.W.P.C.A.** Emergent Hydrophyte Treatment Systems Contact Group (1990). "European Design and Operations Guidelines for Reed Bed Treatment Systems". International Conference "Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control", Report No. UI17, Cambridge, UK, august.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L.** (1996). "Treatment Wetlands". Lewis Publishers, Boca Raton, New York.
- Levenspiel, O.** (1974). "Ingeniería de las Reacciones Químicas". Ed. Reverté, S. A., Barcelona
- Liu, H.** (1977). "Predicting dispersion coefficient of streams". *Journal of the Environmental Engineering Division*. ASCE, Vol. 3, No. EE1.
- Metcalf and Eddy** (1993). "Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse".
- Pérez Franco, D.** (1982). "Hidráulica Subterránea". Serie Científico-Técnica, La Habana.
- Pérez Franco, D.** (1983). "Investigaciones teóricas y prácticas sobre el flujo no lineal y sus aplicaciones a la hidrología subterránea". *Revista Ingeniería Civil*. No. 6.
- Polprasert, C. and Bahattarai, K.** (1985). "Dispersion Model for Waste Stabilization Ponds". *Journal of Environmental Engineering*. ASCE. Vol. III, No.1, February.
- Polprasert, C.** (1996). "Organic Waste Recycling - Technology and Management". 2nd Ed., John Wiley & Sons, Chichester, England.
- Reed, S C, Middlebrooks, E. J. and Crites, R. W.** (1988). "Natural Systems for Waste Management and Treatment". McGraw Hill, Inc New York.
- Steiner, G. R.** (1993). "Construction and operation guidelines for small constructed wetlands". *Wastewater Treatment systems*.
- W.E.F.** (1992). "Design of Municipal Wastewater Treatment Plants". *Manual of Practice No.8 and ASCE Manual and Report on Engineering Practice No.76, Volume II*, Book Press, Inc. Brattleboro, Vermont.

Recibido: enero del 2011
Aprobado: febrero del 2011