

Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica

Subsurface—flow Artificial Wetlands: Comparison of Design Methodologies for the Calculation of the Surface Area based on the Removal of Organic Matter

Wilson J. Asprilla¹
Johan S. Ramírez²
Diana Catalina Rodríguez³

^{1,2}Especialización en gestión ambiental, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Email: ¹wilsonasprilla@hotmail.com, ²sebastianramh@gmail.com,

³ Docente asociada, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Email: diana.rodriguez@udea.edu.co

 OPEN ACCESS



Copyright:© 2020 Ingenierías USBMed. La revista *Ingenierías USBMed* proporciona acceso abierto a todos sus contenidos bajo los términos de la licencia creative commons Atribución- no comercial- SinDerivar 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Tipo de artículo: Investigación científica y tecnológica.
Recibido: 05-02-2020.
Revisado: 02-04-2020.
Aprobado: 10-05-2020.
Doi: 10.21500/20275846.4558

Referenciar así: W. J. Asprilla, J. S. Ramírez and D. C. Rodríguez. “Humedales artificiales de flujo subsuperficial: comparación de metodologías de diseño para el cálculo del área superficial basado en la remoción de materia orgánica,” *Ingenierías USBMed*, vol. 11, no. 2, pp. 65-73, 2020.

Declaración de disponibilidad de datos: Todos los datos relevantes están dentro del artículo, así como los archivos de soporte de información.

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen conflicto de intereses.

Editor: Andrés Felipe Hernández.
Universidad de San Buenaventura,
Medellín, Colombia.

Resumen. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial son una adecuada alternativa para el tratamiento de aguas residuales, ya que son soluciones integrales con adecuadas eficiencias y bajos costos para la remoción de contaminantes. Se compararon cuatro metodologías para el cálculo del área superficial en humedales subsuperficiales de flujo horizontal y vertical, propuestas por diferentes autores. Se concluyó que tanto Kadlec y Wallance como Reed *et al.* y RAS son las referencias más recomendadas para el diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, debido no solo a la similitud en los resultados, sino también a la aplicabilidad en casos prácticos y al uso de variables tales como las constantes biocinéticas, la porosidad del medio granular o soporte del material vegetal, la concentración de fondo, el caudal de entrada al sistema y las concentraciones de entrada y salida en términos de DBO5. Dichas variables son importantes desde el punto de vista hidráulico y de costos de constructivos, ya que influyen en la viabilidad económica de los humedales artificiales para su implementación como alternativa de tratamiento de aguas residuales.

Palabras Clave. Carga orgánica, concentración de fondo, constante biocinética, flujo horizontal, flujo vertical.

Abstract. Artificial subsurface flow wetlands are a suitable alternative for wastewater treatment, since they are comprehensive solutions, with adequate efficiencies and low costs for the removal of contaminants. Four methodologies for calculating surface area in subsurface wetlands with horizontal and vertical flow, proposed by different authors, were compared. It was concluded that both Kadlec and Wallance and Reed *et al.* and RAS are the most recommended references for the design of subsurface-flow artificial wetlands due not only to the similarity in the results, but also to the applicability in practical cases and the use of variables such as biokinetic constants, the porosity of the granular medium or support of the plant material, the background concentration, the flow rate into the system and the input and output concentrations in terms of BOD5. These variables are important from the hydraulic point of view and construction costs, since they influence the economic viability of artificial wetlands for the implementation of these as an alternative treatment of wastewater.

Keywords. Organic load, background concentration, biokinetic constant, subsurface flow wetlands, horizontal flow, vertical flow.

I. Introducción

El término “humedales artificiales” suele ser empleado como definición de aquellos sistemas que se diseñan para utilizar los procesos naturales que ocurren en el ambiente y que implican el uso de vegetación, material de soporte y asociaciones microbianas, con el objetivo de ayudar en el tratamiento de las aguas residuales [1]. Esto ha llevado a la definición en detalle de su hidrología interna y externa, del material vegetal contenido en él, de su composición en cuanto a medios de soporte, de la forma en que fluye el agua a través de ellos, del tipo de contaminantes a tratar, entre otros [2].

La hipótesis inicial en el estudio del comportamiento hidráulico de un humedal artificial, desde la perspectiva de un reactor, es suponer que el movimiento del fluido se asemeja al comportamiento de los modelos ideales de circulación: flujo pistón o mezcla completa. Lo anterior con el objetivo de simplificar los modelos matemáticos que representan una condición hidrodinámica dada [3]. Sin embargo, estos comportamientos ideales normalmente no representan la realidad, debido a que no todas las moléculas que pasan por el humedal permanecen al mismo tiempo, dado que existen zonas en el interior en las que el fluido prácticamente no se renueva. Adicionalmente, existen flujos preferenciales en los que parte de la corriente de alimentación pasa directamente a la corriente de salida, sin existir mezcla con el resto del fluido dentro del humedal, de esta manera los reactivos y/o los productos forman aglomeraciones y no se mezclan entre sí [4].

El éxito de los humedales artificiales de flujo subsuperficial como sistemas de tratamiento de agua residual depende de los procesos que intervienen en la dinámica de la remoción de contaminantes. Estos son los fenómenos hidráulicos o las características del movimiento del agua, así como también las reacciones químicas o cinéticas en las que intervienen diversos tipos de microorganismos. Entender cómo se relacionan estas variables es fundamental a la hora de buscar altas eficiencias en cuanto a la reducción de los diversos contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar [5]. De igual forma, las condiciones hidrológicas determinan el carácter de la microfauna que constituyen los humedales artificiales [2].

El agua que ingresa en un humedal artificial se da a través de los caudales de escorrentía, de subterráneos, precipitaciones y de las descargas específicas a tratar (Figura 1). La determinación de la variación de los caudales es un parámetro importante a examinar para dimensionar estos sistemas [6].

A. Clasificación de los humedales artificiales de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial se pueden clasificar en horizontales y verticales según el movimiento del flujo. Los humedales horizontales están compuestos principalmente por grava como medio de

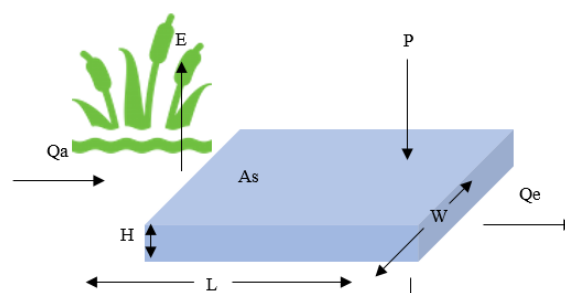


Figura 1. Esquema de un humedal artificial donde Q_a es el caudal del afluente, E es la evapotranspiración, P es la precipitación, As el área superficial, H la altura del humedal, L la longitud del humedal y W el ancho del humedal. Modificado de [2].

soporte para el desarrollo radicular de las especies de macrófitas plantadas en su interior y para la adherencia de los microorganismos encargados de la degradación de la materia orgánica. Entre las especies de macrófitas más utilizadas se encuentra la caña común o carrizo (*Phragmites australis*) [7]. En este tipo de sistemas el agua residual a tratar entra a un medio poroso (prefiltro) de granulometría mayor a la del medio granular del humedal y posteriormente el agua circula horizontalmente a través del medio de soporte, los rizomas y las raíces de las plantas hasta llegar a la salida. La profundidad de estos sistemas se encuentra en un rango de 0.3 a 0.9 m y se caracterizan también por funcionar permanentemente inundados; es decir, el agua se encuentra entre 0.05 y 0.1 m por debajo de la superficie y con cargas orgánicas aproximadas de $6 \text{ g DBO}_5/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ [8]. La materia orgánica contenida en el afluente que ingresa al sistema es degradada por las comunidades bacterianas adheridas al medio de soporte, así como también en las raíces de las plantas. Los procesos de tratamiento o asimilación de la carga orgánica presente en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal se pueden dividir en tres zonas: aerobia, facultativa y anóxica [9].

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical fueron desarrollados en Europa como alternativa a los humedales de flujo horizontal para producir efluentes nitrificados [10]. En estos sistemas la circulación del agua es de tipo vertical y tiene lugar de forma discontinua o por medio pulsos, de manera que el medio granular no está permanentemente inundado. Las aguas residuales afluentes que ingresan al sistema se infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte similar al soporte de los humedales subsuperficiales horizontales. En consecuencia, la carga orgánica es degradada por los microorganismos adheridos presentes en toda la profundidad del lecho y en la zona de las raíces. Finalmente, la recolección del agua filtrada se da mediante tuberías perforadas o ranuradas ubicadas en el fondo del sistema

[10]. La profundidad del medio granular en este tipo de humedales está en un intervalo de 0.5 a 0.8 m y operan con cargas aproximadas de 20 g DBO₅/m².d. La carga intermitente del agua residual aumenta la transferencia de oxígeno y conduce a una alta actividad de los microorganismos presentes para realizar la degradación aerobia. Esta se convierte en la principal diferencia con respecto a los sistemas de flujo horizontal que tienen una menor transferencia de oxígeno atmosférico con el lecho, condición que ocasiona que los sistemas de flujo horizontal requieran una mayor área para compensar los niveles de oxígeno y favorecer la actividad bacteriana [8].

B. Componentes de un humedal artificial de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están compuestos por: agua residual a tratar, sustrato o medio de soporte, plantas y microorganismos.

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial pueden ser un método de tratamiento eficiente y rentable para una gran cantidad de aguas residuales, entre ellas las aguas residuales domésticas, las industriales y los lixiviados [5]. Las aplicaciones van desde viviendas unifamiliares, parques y escuelas hasta instalaciones públicas e industriales [11]. A continuación, se presentan los principales componentes que suelen estar presentes tanto en las aguas residuales domésticas como en las industriales (Tabla 1).

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, el sustrato está formado por el suelo: grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico [13]. La principal característica del medio es que debe tener una permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Lo anterior obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada, con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos [7]. El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones [14]:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- Proporcionan almacenamiento para muchos contaminantes.

El tamaño del medio granular afecta directamente el flujo hidráulico del humedal y por ende el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la adsorción es alta y el diámetro de los poros es pequeña. Sin embargo, este medio presenta una

Tabla 1. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales [12]

Contaminantes	Importancia
Sólidos suspendidos	Cuando no son tratados son liberados al ambiente. Esto puede llevar al desarrollo de depósitos de lodo y condiciones anaerobias en los cuerpos de agua.
Materia orgánica	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas. Por lo general, se mide en términos de DBO y DQO. Si es descargada al medio ambiente su estabilización biológica puede llevar al consumo de oxígeno y, por lo tanto, a la disminución de la calidad del agua en las fuentes hídricas.
Microorganismos patógenos	Pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Cuando son vertidos a las fuentes hídricas superficiales pueden llevar al crecimiento elevado de algas, lo que da como resultado problemas de eutrofización.
Compuestos tóxicos	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su carcinogenicidad, mutagenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de estos compuestos se encuentran en las aguas residuales.
Metales pesados	Tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad en especies.

elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas limitando el caudal a tratar [11]. Por el contrario, si el lecho granular está formado por gravas y arenas disminuye la capacidad de adsorción y el poder biofiltrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica definida como el coeficiente de permeabilidad. De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad de biodegradación de los contaminantes presentes [15].

En cuanto a las plantas, el mayor beneficio es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración de la tierra o medio de soporte y transporta el oxígeno de manera más profunda de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión (Tabla 2). Lo más importante en los humedales artificiales es que las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como sustrato para el crecimiento de la

película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento que ocurre [16]. Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y escorrentía de varias maneras [17]:

- Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, los nutrientes y los elementos traza para incorporarlos a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

Tabla 2. Características típicas de especies vegetales para humedales artificiales de flujo subsuperficial [18]

Especie vegetal	Profundidad de enraizamiento (m)	Característica
Scirpus (Juncos)	0.76	
Phragmites comunis (Carrizo)	> 0.60	
Typha	0.30	

Los microorganismos son los encargados de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios; en el resto del lecho granular predominan los microorganismos anaerobios [17]. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza [19]. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato, afectando la capacidad de proceso del

humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera [15].

C. Parámetros de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial

El diseño adecuado de los humedales artificiales de flujo subsuperficial para la remoción de materia orgánica debe tener en cuenta variables tanto hidráulicas como cinéticas que permitan integrar no solo las variables hidrodinámicas, sino también el comportamiento de los microorganismos, las plantas y la adherencia al medio de soporte. A continuación, se presentan cuatro modelos de diseño para el dimensionamiento de humedales artificiales de flujo subsuperficial con base en remoción de DBO₅. La ecuación 1 planteada por Kadlec y Wallance [2] contempla el diseño de los humedales teniendo en cuenta un modelo de reactores en serie de mezcla completa, donde K_A es la constante de primer orden dependiente de la temperatura (d^{-1}) y C^* la concentración de fondo, (g/m^3).

$$A_S = \frac{Q}{K_A} \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad (1)$$

La ecuación 2 planteada por Reed *et al.* [20] y por el RAS [21] define el diseño de un humedal artificial subsuperficial siguiendo un modelo de reactores de flujo pistón a partir de cinéticas de primer orden para la remoción de contaminantes. En este modelo K_T corresponde a la constante de primer orden dependiente de la temperatura (d^{-1}) y se contempla además la profundidad promedio del sistema h (m) y la porosidad del medio filtrante n (en fracción decimal).

$$A_S = Q \frac{\ln(C_0) - \ln(C_e)}{K_T \cdot h \cdot n} \quad (2)$$

Por su parte, Romero *et al.* [5] (ecuación 3) también plantearon el diseño de los humedales siguiendo el modelo de flujo pistón con cinéticas de primer orden en la remoción de contaminantes. Sin embargo, a diferencia de Reed *et al.* [20] y RAS [21], se tiene en cuenta la ley de Darcy para el cálculo del área de la sección transversal del lecho AT (m^2)

$$\begin{aligned} C_e &= C_0 e^{-K_R \cdot t} \\ A_S &= \frac{V}{y}; \quad V = Q \cdot t \\ A_t &= \frac{Q}{K_S \dots S}, \quad \text{Ley de Darcy} \\ a &= \frac{A_t}{y}; \quad l = \frac{A_S}{a} \end{aligned} \quad (3)$$

Finalmente, para Ortega *et al.* [22] (ecuación 4) el diseño no se fundamenta en una ecuación que defina el área superficial, sino que, por el contrario, se calcula con

base en datos empíricos que se han determinado por experiencias vividas en el mundo a lo largo de la historia, tanto para humedales de flujo horizontal como vertical. Donde: para Flujo Horizontal (FH): 4-10 g DBO₅/m².d y para Flujo Vertical (FV): 10-40 g DBO₅/m².d [23].

De las ecuaciones anteriores: C_e : concentración de DBO en el efluente (mg/L); C_o : concentración de DBO en el afluente (mg/L); A_s : área superficial del humedal (m²); Q : caudal (m³/d); K_s : conductividad hidráulica (m/d); S : pendiente del lecho (fracción); a : ancho del humedal (m); l : longitud del humedal (m); y : profundidad del agua (m); t : tiempo de retención hidráulica (d); V : volumen humedal (m³); K_R : constante de remoción (d⁻¹).

ooseness=-1 En este estudio se realizó el análisis de las variables de diseño con el propósito de dimensionar un sistema de humedal construido con flujo subsuperficial, para la remoción de materia orgánica, empleando un agua residual doméstica e industrial. Las características analizadas fueron entre otras: la velocidad de flujo, el área superficial y el volumen de almacenamiento.

II. Materiales y métodos

A. Características de las aguas residuales

Las características del agua residual doméstica (ARD) e industrial (ARI) utilizadas para el cálculo de las áreas superficiales en cada metodología fueron obtenidas a partir investigaciones reportadas en la bibliografía. La concentración promedio de DBO₅ para agua residual al doméstica fue de 91 mg/L [24] y para el agua residual industrial fue de 3979.68 mg/L [25]. A continuación, se presentan los demás parámetros utilizados para el cálculo del área superficial de los humedales artificiales de flujo subsuperficial (Tabla 3)

Tabla 3. Datos de aguas residuales domésticas e industriales

Parámetro	ARD	ARI
DBO ₅ (mg/L)	91.00	3979.68
DQO (mg/L)	181.312	5533.590
Caudal (L/s)	13.5	1.5
Temperatura (° C)	24.2	24.2

B. Modelación hidrodinámica de los humedales

De acuerdo con la revisión bibliográfica se compilaron selectivamente las metodologías de diseño basadas en la remoción de la DBO, que a lo largo de la historia han sido las más completas y aplicadas en climas tropicales similares al de Colombia. Además, se emplearon métodos referentes en el ámbito nacional, como lo es el caso del Reglamento Técnico del Sector Agua Potable y Saneamiento Básico [21]. Asimismo, se incluyeron metodologías que han sido desarrolladas en un contexto internacional. De esta manera se eligieron

4 metodologías de diseño: Kadlec y Wallance [2]; Reed *et al.* y RAS [21]; Romero *et al.* [5] y Ortega *et al.* [22].

C. Dimensionamiento según Kadlec y Wallance

Kadlec y Wallance [2] consideraron los humedales artificiales de flujo subsuperficial como reactores dispuestos en serie. En este modelo, la circulación del agua se asemeja al flujo pistón ideal. El agua pasa a través de “N” tanques en serie de igual volumen, donde se da la remoción consecutiva en cada uno. Para este caso no se presentan ganancias o pérdidas de agua, por lo tanto, el balance de masa de flujo contaminante es constante para el tanque de orden j . Se debe tener en cuenta que hay dos parámetros de reacción en este modelo: la constante de velocidad (k) y el parámetro hidráulico (N) [2].

$$QC_{j-1} - QC_j = kA(C_j - C^*) \quad (4)$$

Donde C_j es la concentración en el tanque j (g/m³).

Para toda la secuencia de los “N” tanques estos balances de masa se combinan para formar la ecuación 5.

$$\frac{C - C^*}{C_i - C^*} = \left[1 + \frac{k\tau}{Nh} \right]^{-N} \quad (5)$$

Donde C es la concentración en el efluente (mg/L), C_i la concentración en el afluente (mg/L), C^* la concentración en fondo (mg/L), N el numero aparente de tanques en serie, k el coeficiente área de primer orden (m/d) y h la carga hidráulica (m/d). La ecuación anterior no evidencia cómo dimensionar el humedal. En consecuencia, si la carga hidráulica es función del caudal del afluente al sistema por unidad de área, la ecuación 5 se convierte en una expresión que permite calcular el área superficial del humedal (ecuación 6).

$$A_6 = \frac{Q}{K_A} \ln \left(\frac{C_0 - C^*}{C_e - C^*} \right) \quad (6)$$

Esta ecuación permite calcular el área superficial del humedal teniendo algunos criterios previos para llegar a su aplicación:

- La concentración de fondo C^* es el aporte de la biomasa por parte de las plantas que interactúan con los microorganismos presentes en el medio. Se determina por medio de tablas dependiendo del parámetro que se espera remover (Tabla 4).
- Es fundamental determinar la temperatura a la cual va a operar el sistema de acuerdo con las condiciones climáticas del sitio donde se va a instalar. Esto para realizar el cálculo de la constante de primer orden que requiere la ecuación 6 [26]. El coeficiente k puede ser determinado a través de estudios piloto o por referencia de la literatura consultada.

$$K_A = K_{A,20} \cdot \theta^{T-20} \quad (7)$$

Tabla 4. Parámetros de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial [2]

Parámetro	K_{A20} (m/año)	Θ	Concentración de fondo, C^* , mg/L
DBO	117	1.057	3
SST	43.4	1.000	6
Nitrógeno orgánico	35	1.050	1.5
Nitrógeno amoniacal	34	1.050	0
Nitrógeno NO_x	50	1.050	0
Nitrógeno total	10	1.050	1.5
Fósforo total	9.1	1.090	0
Coliformes totales	100	1.003	200 UFC/100 mL

D. Dimensionamiento según Reed *et al.* y RAS

Los humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos y su rendimiento puede aproximarse al descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo pistón para la remoción de la DBO y el nitrógeno [20]. En el flujo pistón (PF) ideal el perfil de velocidad con respecto al área transversal de flujo es uniforme, es decir, las partículas de fluido que ingresan al sistema en un tiempo dado se mueven todas a la misma velocidad hasta abandonar el sistema. Este modelo se fundamenta en la relación básica entre las concentraciones del flujo contaminante de entrada y salida y asumiendo periodos de flujo estable como se muestra en la ecuación 8.

$$\frac{C_e}{C_0} = \exp \{-H_T \cdot \tau\} \quad (8)$$

Donde C_e es la concentración en el efluente (mg/L), C_0 la concentración en el afluente (mg/L), K_T la constante de primer orden dependiente de la temperatura (d^{-1}) y τ el tiempo de retención hidráulico (d). El tiempo de retención hidráulico en el humedal se puede calcular con la ecuación 9.

$$t = L \cdot W \cdot y \cdot \frac{n}{Q} \quad (9)$$

Donde L es la longitud del humedal (m), W el ancho del humedal (m) y la profundidad del agua en el humedal (m), n la porosidad o el espacio disponible para que el agua fluya a través del humedal y Q el caudal medio a través del humedal (m^3/d).

El cálculo de K_T para remoción de DBO se hace por medio de la ecuación 10 [20]:

$$K_T = K_{20}(1.06)^{T-20} \quad (10)$$

Donde K_{20} es 1.104 d^{-1} y T la temperatura según la climatología de la zona.

El lecho filtrante de los humedales artificiales fluctúa según el sentido del flujo que sigue el agua, bien

sea horizontal o vertical. Por lo tanto, los rangos de profundidad según el tipo de humedal son: para flujo horizontal (FH) entre 0.4 m a 0.6 m con un borde libre de 0.15 m y para flujo vertical entre 0.5 m a 0.7 m con un borde libre de 0.15 m

La metodología de diseño según Reed *et al.* [20] y RAS (2017) [21] requiere datos de porosidad, los cuales dependen directamente del tipo de medio filtrante (Tabla 5).

Tabla 5. Características del medio para humedales artificiales de flujo subsuperficial [7]

Tipo de medio	Tamaño de grano (mm)	Porosidad (η)	Conductividad hidráulica (K_s) (m/d)	K_{20}
Arena media	1	0.42	420	1.84
Arena Gruesa	2	0.39	480	1.35
Gravilla arenosa	8	0.35	500	0.86

Para el cálculo de la sección transversal se recomienda utilizar la Ley de Darcy [21]:

$$A_t = \frac{Q}{K_s \dots S} \quad (11)$$

Donde Q es el caudal ($\text{m}^3/\text{día}$), K_s la conductividad hidráulica (m/día) y S la pendiente del lecho (asumiendo una pendiente de 1%).

E. Dimensionamiento según Romero *et al.*

La ecuación de remoción esperada de contaminante, en este caso DBO, obedece a cinéticas de reacción de primer orden, teniendo en cuenta el tiempo de retención hidráulico. Es importante resaltar que los humedales artificiales de flujo subsuperficial manejan tiempos de retención hidráulica diferentes. Los de flujo horizontal están en un intervalo de 4-15 días [15] y los de flujo vertical trabajan con tiempos de retención muy bajos en intervalos de horas 2-6 horas [23], precisamente porque funcionan por pulsos y su extensión en área es menor con respecto a los de flujo horizontal.

El cálculo de los valores de K_R se realiza teniendo en cuenta la ecuación 12.

$$K_R = K_0 (37.31 \cdot \eta^{4.4172}) \quad (12)$$

Donde K_0 es 1.839 d^{-1} para aguas residuales municipales y K_0 es 0.198 d^{-1} para aguas residuales industriales con DQO alta. Los valores de porosidad (η), la conductividad hidráulica (K_s) y demás criterios de diseño se determinan utilizando la Tabla 6.

Romero *et al.* [5] utilizan criterios de dimensionamiento similares a los de [20, 21], como los son área transversal, conductividad hidráulica, pendiente del lecho, entre otras.

Tabla 6. Características típicas del medio para humedales artificiales de flujo subsuperficial [5]

Medio	Tamaño efectivo (mm)	Porosidad (η)	Conductividad hidráulica (K_S) (m/d)
Arena Media	1	0.30	500
Arena Gruesa	2	0.32	1.000
Arena y grava	8	0.35	5.000
Grava media	32	0.40	10.000
Grava gruesa	128	0.45	100.000

F. Dimensionamiento según Ortega *et al.*

El método de dimensionamiento propuesto por el gobierno español en el Manual de Implementación de sistemas de Depuración en Pequeñas Poblaciones [22] no propone una ecuación general para llevar a cabo el dimensionamiento hidráulico de humedales artificiales de interés. Los cálculos se determinan con base en datos empíricos y criterios de diseño que han surgido de numerosas experiencias e investigaciones. No obstante, la esencia del método radica en la cantidad máxima de carga contaminante (g DBO₅/d) de DBO₅ que puede ingresar al humedal por cada metro cuadrado [22]. Por consiguiente, para calcular el área necesaria del humedal son tenidos en cuenta parámetros como: la carga orgánica (g DBO₅/m².d) –teniendo en cuenta el porcentaje de remoción que brinde el tratamiento primario–, el caudal de agua residual a tratar (m³/d) y la concentración de DBO₅ del agua residual (g/m³) (ecuación 13).

$$A_s = \frac{Q \left(\frac{m^3}{d} \right) \cdot [\text{DBO}_5 \left(\frac{g}{m^3} \right)]}{\text{Concentración recomendada de DBO} \left(\frac{g \text{ DBO}_5}{m^2 \cdot d} \right)} \quad (13)$$

Una vez conocidos los parámetros anteriores se multiplica el caudal del agua residual por la concentración de DBO₅, permitiendo obtener la carga (g DBO₅/d) que llega al sistema de tratamiento. Dividiendo dicha carga por la carga orgánica recomendada se obtiene la superficie aproximada (m²) necesaria de humedal artificial.

III. Resultados y análisis

En la Tabla 7 se presentan los resultados de las dimensiones de los humedales artificiales en cuanto al área superficial, de acuerdo con cada metodología seleccionada estos resultados se presentan en forma comparativa a los resultados del diseño.

Los resultados de área superficial obtenidos para los sistemas de tratamiento de agua residual doméstica (ARD) evidenciaron que los cálculos realizados a partir de las ecuaciones definidas por [2] y [20, 21] presentaron datos muy similares para los sistemas de flujo horizontal: 39.42 m² y 45.40 m² respectivamente. En

Tabla 7. Resultados del cálculo de las áreas superficiales según diferentes autores

Parámetro	Unidades	ARD	ARI	Modelo
Q	m ³	13.5	1.5	[2]
T	°C	24.2	24.2	
e	–	1.057	1.057	
C _e	mg/L	30	30	
C ₀	mg/L	91.00	3979.68	
C*	mg/L	3	3	
K _A	d ⁻¹	117	117	
K _A (corregida)	d ⁻¹	0.405	0.405	[20, 21]
A _S (FH)	m ²	39.42	18.51	
Q	m ³ /d	13.5	1.5	
T	°C	24.2	24.2	
e	–	1.06	1.06	
C _e	mg/L	30	30	
C ₀	mg/L	91	3979.68	
K _A (20°C)	d ⁻¹	1.104	1.104	
K _T	d ⁻¹	1.41	1.41	
η (FH)	–	0.39	0.39	
η (FV)	–	0.35	0.35	
H (FH)	m	0.6	0.6	[5]
H (FV)	m	0.7	0.7	
A _S (FH)	m ²	45.40	22.22	
A _S (FV)	m ²	43.36	21.22	
Q	m ³ /d	13.5	1.5	
T (FH)	d	4	4	
T (FV)	d	0.5	0.5	
V (FH)	m ³	54	6	
V (FV)	m ³	6.75	0.75	
Y (FH)	m	0.6	0.6	
Y (FV)	m	0.7	0.7	[22]
A _S (FH)	m ²	90.00	10.00	
A _S (FV)	m ²	9.64	8.57	
Q	m ³ /d	13.5	1.5	[22]
C ₀	g/m ³	91	3979.68	
C	g/m ² .d	7	7	
C	g/m ² .d	25	25	
A _S (FH)	m ²	175.50	852.79	
A _S (FV)	m ²	49.14	238.78	

FH: flujo horizontal. FV: flujo vertical

estos mismos modelos los resultados para los sistemas de aguas residuales industriales también fueron muy similares: 18.51 m² y 21.22 m² respectivamente. Esto se debe a la similitud que tienen ambos modelos al introducir constantes biocinéticas dependientes de la temperatura en la ecuación principal. Por otra parte, la diferencia radica en la concentración de fondo que utiliza la ecuación de [2] y que no se aprecia en la ecuación propuesta por [20, 21]. En este último caso, se introduce la profundidad del humedal y la porosidad como parámetros esenciales a la hora de estimar el área superficial del sistema de tratamiento.

Es de esperarse, según la bibliografía, que las áreas superficiales más grandes provengan de humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal debido a las características que tienen en cuanto al flujo permanente de agua. En oposición, es diferente la intermitencia que debe manejarse en los humedales artificiales de flujo vertical, donde el agua residual fluye a través del sistema de una manera más rápida, teniendo tiempos de retención cortos.

Es importante destacar que las áreas superficiales de mayor valor resultan del cálculo correspondiente a las aguas residuales domésticas (ARD). Esto se debe a la influencia que tiene la cantidad de agua a tratar, puesto que a mayor caudal de effluente mayor área superficial es requerida para evitar una colmatación del sistema. En contraste, la metodología de [22] arrojó un área superficial muy alta debido a la dependencia en su fórmula de la carga orgánica que puede recibir un metro cuadrado de humedal y el caudal de entrada. También se pudo observar que los resultados del modelo [20, 21] arrojaron valores muy idénticos para los sistemas de flujo horizontal y vertical. No obstante, siempre se va a reflejar una menor área superficial en los humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical, porque trabajan con periodos de retención más cortos y el agua residual circula mediante un proceso más rápido debido a la dirección del flujo.

A diferencia de los dos autores anteriores, los modelos de [5] y [22] muestran áreas superiores con valores de 90.0 m² y 175.5 m² respectivamente para los sistemas de flujo horizontal. Por una parte, Romero *et al.* [5] contempla el tiempo de retención hidráulico en su ecuación base, siendo lógico al relacionar el funcionamiento de un humedal con un reactor flujo pistón. De no tenerse en cuenta el parámetro en mención, el sistema sufriría una colmatación tanto de agua residual como de carga orgánica y por ende no se presentaría remoción alguna. Por otra parte, Ortega *et al.* [22] tiene en cuenta la carga orgánica (g DBO/d) y la carga orgánica superficial recomendada (g DBO/m².d). De esta manera es posible determinar la cantidad de DBO que puede llegar a tratarse en un m² de humedal y así apreciar el área superficial de este. El aumento de las

áreas superficiales con los dos autores mencionados obedece a la consideración de los parámetros anteriormente mencionados en las ecuaciones aplicadas.

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales artificiales de flujo subsuperficial son similares a muchos de los requeridos en otros sistemas de tratamiento como los lodos activados o las lagunas facultativas. Dentro de estos costos, que afectan principalmente la implementación de los humedales, está el precio del terreno o área necesaria para realizar la construcción. Adicionalmente, al tener resultados de áreas grandes durante el proceso de diseño se supone que el resto de los elementos constructivos de un humedal se incrementarán en valor y en cantidades. De igual forma, la disponibilidad de espacio se convierte en una limitante de los humedales artificiales de flujo subsuperficial. Esta situación conlleva a realizar un diseño completo en el que se comparen diferentes metodologías, a fin de poder ejecutar un proyecto autosostenible financieramente y que no ocurran sobrecostos, que son en últimas una de las principales desventajas de estos sistemas.

Dentro de las fortalezas de los sistemas de humedales artificiales se encuentra que los costos de funcionamiento (administración, operación y mantenimiento) son relativamente menores en comparación con otras tecnologías. Las inversiones en cuanto a requerimientos técnicos para el mantenimiento de los sistemas también suponen menores costos, debido a la simplicidad de funcionamiento de los humedales artificiales.

IV. Conclusiones

Se compararon cuatro modelos de diseño de humedales artificiales de flujo subsuperficial, y según los resultados se observó una similitud en los autores Kadlec y Wallance y Reed *et al.* y RAS. Por tanto, se puede concluir que estas son metodologías confiables a la hora de estimar las áreas superficiales, recalando que son autores o referencias con trayectoria en el estudio de dichas alternativas de tratamiento de aguas residuales. La ecuación propuesta por Ortega *et al.* proyecta áreas superficiales muy diferentes entre los dos tipos de humedales (flujo horizontal y flujo vertical). Sin embargo, se resalta la inclusión, aunque empírica, del caudal y la carga orgánica recomendada en el cálculo del área superficial, siendo dos parámetros de peso a la hora de diseñar y comprender el funcionamiento de un humedal artificial. De la misma manera estos parámetros influyen directamente en el aumento de las áreas superficiales estimadas, lo cual sugiere que esta metodología no es muy recomendable a la hora de diseñar un sistema como estos, pues elevaría considerablemente los costos de construcción e implementación.

Referencias

- [1] J. Vymazal, "Constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters: A review," *Ecological Engineering*, vol. 73, pp. 724–751, 2014.
- [2] R. H. Kadlec and S. D. Wallace, "Treatment Wetlands." Second Edition. Florida: CRC Press, 2009.
- [3] A. Batista, C. Carreño, C. Gaitán, N. Núñez, and E. Vallester, "Importancia del nivel de oxígeno en la eficiencia de un humedal artificial con flujo subsuperficial vertical ascendente," *Rev. Ini. Cient.*, vol. 4, no. 1, pp. 40–45, 2018.
- [4] M. Romero, A. Colín, E. Sanchez, and L. Ortiz, "Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica," *Rev. Int. Contam. Ambient*, vol. 25, no. 3, pp. 157–167, 2009.
- [5] K. Reynolds, "Tratamiento de aguas residuales en latinoamérica," *Agua Latin.*, vol. 12, pp. 1–4, 2002.
- [6] United States Environmental Protection Agency (USEPA). "Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters. Cincinnati," Ohio, Estados Unidos, pp. 166, 2000.
- [7] Z. Hu, Y. Chu, and Y. Ma, "Design of a combined constructed wetland system and its application on swine wastewater treatment," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 146, no. 1, pp. 1–11, 2020.
- [8] J. Ramond, P. Welz, D. Cowan, and S. Burton, "Microbial community structure stability, a key parameter in monitoring the development of constructed wetland mesocosm during start-up," *Research in Microbiology*, vol. 163, pp. 28–35, 2012.
- [9] P. Cooper, "The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to the significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates," *Water Sci. Tech.*, vol. 5, pp. 81–90, 2005.
- [10] EPA, "Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment. A technology assessment," *Ecol. Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 382–389, 1993.
- [11] M. Rolim and G. Orozco, *Lagunas de Estabilización. En: Como utilizar Aguas Residuales Tratadas en Sistemas de Regadío*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 2000.
- [12] D. López, A. M. Leiva, W. Arismendi, and G. Vidal, "Influence of design and operational parameters on the pathogens reduction in constructed wetland under the climate change scenario," *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 18, pp. 101–112, 2019.
- [13] C. Plaza de los Reyes, L. Vera, M. Salvato, M. Borin, and G. Vidal, "Consideraciones para la eliminación de nitrógeno en humedales artificiales," *Tecno. Agua*, vol. 31, pp. 41–49, 2011.
- [14] O. Delgadillo, A. Camacho, L. Perez, and M. Andrade. "Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales," Serie técnica, Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA), Cochabamba-Bolivia, pp. 1-99, 2010.
- [15] C. Ortiz, "Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes." Tesis maestría en ingeniería civil, pp. 1–81, 2014.
- [16] G. Bitton. "Wastewater microbiology," 4th ed. John Wiley Sons. Unites States, pp. 781, 2011.
- [17] E. Beascochea, J. Muñoz, and M. Fernández. "Manual de fitodepuración," Filtros de macrofitas en flotación. Madrid, pp. 1-129, 2000.
- [18] C. Ahn, P. Gillevet, and M. Sikaroodi, "Molecular characterization of microbial communities in treatment microcosm wetlands as influenced by macrophytes and phosphorus loading," *Eco. Indi.*, vol. 7, pp. 852–863, 2007.
- [19] S. C. Reed, R. W. Crites, and E. J. Middlebrooks. "Natural Systems for Waste Management and Treatment," McGraw-Hill, New York, NY, USA, 2nd edition, 1988.
- [20] RAS. "Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico" Resolución 0330 de 2017 expedida por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Colombia. Bogotá.
- [21] E. Ortega, Y. Ferrer, J. Salas, C. Aragón, and A. Real. "Manual para la implantación de sistemas de depuración en pequeñas poblaciones," Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, pp. 460, 2011.
- [22] E. von Münch. "Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo," GIZ, ECOSAN, pp. 1–27, 2010.
- [23] Metcalf and Eddy. "Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, Vertido y Reutilización," 3a ed. McGraw-Hill, New York, 1995.
- [24] D. Rodríguez, N. Pino, and G. Peñuela, "Monitoring the removal of nitrogen by applying a nitrification–denitrification process in a sequencing batch reactor (sbr)," *Biores.Techno.*, vol. 102, pp. 2316–2321, 2011.
- [25] F. Usuga, A. Patiño, D. C. Rodríguez, and G. Peñuela, "Kinetic study and removal of contaminants in the leachate treatment using subsurface wetlands at pilot scale," *Rev. ION*, vol. 30, no. 2, pp. 55–63, 2017.
- [26] F. Usuga, A. Patiño, D. C. Rodríguez, and G. Peñuela, "Kinetic study and removal of contaminants in the leachate treatment using subsurface wetlands at pilot scale," *Rev. ION*, vol. 30, no. 2, pp. 55–63, 2017.