CAPÍTULO 5

5. MODELO GENERAL DE DISEÑO PARA HUMEDALES

En el capítulo anterior se definió el concepto de lo que son los Humedales de Flujo Libre y de Flujo Subsuperficial, así como sus características y funcionamiento, en este capítulo se dará a conocer el procedimiento y cálculos que se deben realizar para poder diseñar sistemas de este tipo.

5.1. Diseño Hidráulico y Dimensionamiento.

Los sistemas de Humedales Artificiales son considerados como reactores biológicos y su rendimiento puede estimarse por medio de una cinética de primer orden para la remoción de DBO y nitrógeno. Algunos modelos de diseño varían según el autor, en este trabajo se consideran los que son mas convenientes para el caso.

Ecuación básica de reactores de flujo a pistón:

$$\frac{Ce}{Co} = e^{-K_T t} \qquad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

C_o = Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

t = Tiempo de retención hidráulica, d.

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado por medio de la siguiente fórmula:

$$t = \frac{L.W.y.n}{Q} \qquad \text{Ecuación 5.2}$$

Donde:

L = Largo de la celda del humedal, m.

W = Ancho de la celda del humedal, m.

y = Profundidad de la celda del humedal, m.

n = Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal, porcentaje expresado como decimal.

Q = Caudal medio a través del humedal, m^3/d.

Qe = Caudal de salida, m^3/d.

Qo = Caudal de ingreso, m^3/d.

$$Q = \frac{Qe + Qo}{2} \qquad \text{Ecuación 5.3}$$

Para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la expresión anterior.

Un diseño conservador debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvias de los registros históricos del lugar. Esto requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Por lo general se asume que el caudal de entrada y salida son iguales.

Combinando las ecuaciones 5.1 y 5.2 se puede determinar el área superficial del humedal de la siguiente manera:

$$As = LW = \frac{Q.\ln(Co/Ce)}{Ktyn} \qquad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde:

As = Área superficial del humedal, m^2.

El valor de K_T para las ecuaciones 5.1 y 5.4 depende del contaminante que se desea eliminar y de la temperatura.

El diseño hidráulico de un humedal es tan importante como el de los modelos que calculan la remoción de contaminantes, ya que estos modelos están basados en que se asume flujo a pistón con un flujo uniforme a través de la sección del humedal y con mínimos flujos preferenciales. Un diseño válido requiere tener en cuenta consideraciones hidráulicas y térmicas, así como la cinética de remoción. El procedimiento es usualmente iterativo y requiere asumir la profundidad del agua y la temperatura para resolver las ecuaciones cinéticas. De esta manera, se puede predecir el área de humedal requerida para la remoción de un contaminante. El contaminante que requiera la mayor área para su remoción, será el factor limitante en el diseño y controlará el tamaño del humedal. Una vez conocida el área, las ecuaciones térmicas pueden ser usadas para estimar la temperatura teórica del agua en el humedal, si este cálculo no coincide en el dato asumido al inicio se requerirá el número de iteraciones necesario hasta que estos valores converjan. El último paso es usar los cálculos hidráulicos apropiados para determinar la forma final (relación largo/ancho) y la velocidad de flujo en el humedal, asimismo, si estos valores difieren significativamente a los asumidos al comienzo para las ecuaciones de temperatura, se procederá a realizar nuevas iteraciones.

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan en la actualidad asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento. En un humedal de flujo subsuperficial este concepto es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantengan en circunstancias normales durante todo el periodo de funcionamiento del sistema. Estos solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y métodos constructivos apropiados.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flujo libre, y el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los humedales de flujo subsuperficial. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y salida del sistema. La mejor solución referente de construcción, es proveer al humedal de un fondo con una pendiente suficiente para permitir un buen drenaje cuando amerite y una salida de altura variable con el nivel del agua.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría, grandes relaciones largo/ancho=10 o mayores asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre, por tanto, relaciones de 1/1 hasta aproximadamente 3/1 o 4/1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas para la redistribución del flujo.

El flujo de agua en un Humedal de Flujo Libre es descrito por la ecuación de Manning que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal es descrita por la ecuación 5.5, depende de la profundidad el agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal. En los Humedales de Flujo Libre la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es completamente válido pero es una aproximación aceptable.

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/2} \qquad \text{Ecuación 5.5}$$

Donde:

v = Velocidad de flujo, m/s.

n = Coeficiente de Manning, $s/m^{1/3}$

y = Profundidad del agua en el humedal, m.

s = Gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m.

Para los humedales, el número de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización o estación. La relación está definida por:

$$n = \frac{a}{y^{1/2}}$$ Ecuación 5.6

Donde:

a = Factor de resistencia, $s.m^{1/6}$

a = 0.4 $s.m^{1/6}$ para vegetación escasa y y>40 cm.

a=1.6 $s.m^{1/6}$ para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de y=30 cm.

a= 6.4 $s.m^{1/6}$ para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales y≤30 cm.[9]

9

Por lo general, con vegetación emergente típica se asume para propósitos de diseño valores de a que varían entre 1 y 4. Sustituyendo la ecuación 5.6 en la 5.5 se tiene lo siguiente:

$$v = \frac{1}{a} y^{7/6} s^{1/2} \qquad \text{Ecuación 5.7}$$

Sustituyendo y reorganizando términos es posible llegar a una ecuación para determinar la longitud máxima de una celda de humedal.

$$v = \frac{Q}{Wy} \qquad W = \frac{As}{L} \qquad s = \frac{m.y}{L}$$

Donde:

Q = Caudal, m^3/d.

W = Ancho de la celda de humedal, m.

As = Área superficial de la celda de humedal, m^2.

L = Longitud de la celda de humedal, m.

m = Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal.

Sustituyendo en la ecuación 5.7 y reordenando se obtiene:

$$L = \left[\frac{As.y^{8/3}.m^{1/2}.86400}{a.Q} \right]^{2/3} \qquad \text{Ecuación 5.8}$$

El área superficial del humedal (As) se determina primero mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante. Por medio de la ecuación 5.8 se puede calcular de manera directa la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Se recomienda usar el gradiente hidráulico más pequeño para tener una reserva en caso de ajustes futuros. Una relación largo-ancho ≤ 3:1 suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía.

El valor de la pendiente (m) usado en la ecuación, está típicamente entre el 10 y 30% de la pérdida de carga disponible. La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y) del humedal cuando m=100%. Este no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara en el futuro.

El valor de Q en la ecuación 5.8 es el caudal promedio entre la entrada y la salida, para tener en cuenta las pérdidas o ganancias de agua debidas a la evapotranspiración, filtración y precipitación. Es usualmente aceptable para un diseño preliminar suponer que los caudales de entrada y salida sean iguales. Para el diseño final del sistema será necesario tener en cuenta estas pérdidas y ganancias.

5.2. Diseño para la remoción de DBO.

En la ecuación 5.9 se puede aproximar la remoción de DBO en sistemas de esta categoría. El modelo es basado en la experiencia con sistemas de aplicación sobre el suelo y filtros percoladores.

$$\frac{C_e}{C_o} = A.\exp\left[-\frac{0.7(K_T)(A_V)^{1.75}(L)(W)(y)(n)}{Q}\right]^2 \qquad \text{Ecuación 5.9}$$

Donde:

C_e = Concentración de DBO en el efluente, mg/l

C_o = Concentración de DBO en el afluente, mg/l

A = Fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema, es una variable que depende de la calidad del agua (es una fracción decimal)

K_T = Constante de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

A_v = Área superficial disponible para la actividad microbana, m^2/ m^3

L = Longitud del sistema (paralelo al flujo), m

n = Porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

Q = Caudal promedio en el sistema, m^3/d

La ecuación 5.9 es considerada teóricamente correcta, pero existen 2 dificultades que son la medición y evaluación de los factores A y A_v.

El factor A ha sido medido para sistemas del tipo de la aplicación al terreno de efluentes primarios y corresponde aproximadamente a 0.52

(48% de la DBO aplicada se queda a la entrada del sistema como materia particulada), el valor de A podría incrementarse para efluentes secundarios y terciarios aplicados a humedales de flujo libre, un valor que esté entre 0.70 y 0.85 podría ser apropiado para efluentes secundarios y 0.90 o mas para efluentes terciarios con alto tratamiento.

El valor de A_v es el área superficial disponible en el sistema para el desarrollo de biomasa fija. En los filtros percoladores y los biodiscos corresponde a la totalidad del área mojada y es fácil de determinar. En un humedal de flujo libre es una medida del área superficial de la porción de la vegetación y de la capa de restos de vegetación que está en contacto con el agua residual. En conclusión es muy difícil medir de manera eficaz en un humedal en funcionamiento y lo único que se puede establecer es una aproximación. Según estudios el típico valor de A_v es de 15.7 m^2/ m^3.

Debido a que el área superficial del humedal (A_s) a (W)(L) es posible sustituyendo y reorganizando los términos de la ecuación 5.9 obtener una expresión para determinar el área requerida para obtener el nivel de tratamiento requerido.

$$A_S = \frac{Q(\ln(C_o) - \ln(C_e) + \ln(A))}{(K_T)(y)(n)}$$ Ecuación 5.10

Donde:

A_s = Área superficial del humedal de flujo libre, m^2

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

$K_{20} = 0.2779 d^{-1}$

n = 0.65 a 0.75 (los valores menores son para vegetación densa y madura)

A = 0.52 (efluente primario), 0.70 a 0.85 (efluente secundario), 0.90 (efluente terciario).

La ecuación 5.10 puede estimar de forma fiable el área superficial para un humedal de flujo libre. Debido a las dificultades para evaluar A y A_v, se ha realizado una segunda aproximación a partir del análisis de los datos del rendimiento de sistemas de este tipo en operación:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{K_T . t}$$ Ecuación 5.11

$$K_T = K_{20}(1.06)^{(T-20)}$$ Ecuación 5.12

$$K_{20} = 0.678 d^{-1}$$ Ecuación 5.13

Entonces, el área superficial requerida para un humedal de este tipo se determina por medio de la siguiente expresión:

$$A_S = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_e)}{(K_T)(y)(n)}$$ Ecuación 5.14

K_T = Constante de temperatura (Ecuación 5.12)

y = Profundidad de diseño del sistema, m

n = porosidad del humedal, 0.65 a 0.75

La profundidad del humedal puede variar durante periodos cortos desde pocos centímetros hasta más de un metro. Las profundidades típicas de diseño van desde 10cm hasta 45cm dependiendo de la estación y de la calidad esperada del agua para el sistema.

La DBO final del efluente se ve influida por la producción de DBO residual en el sistema, producto de la descomposición del detritus de las plantas y de otras

Sustancias orgánicas presentes de manera natural, la DBO residual está típicamente entre 2 a 7mg/l. Como resultado, la DBO del efluente de un humedal de este tipo proviene de estas fuentes y no del agua residual.

5.3. Diseño para la remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST).

La remoción de SST en sistemas de humedales ya sean de flujo libre o flujo subsuperficial se debe a procesos físicos y solo está influida por la temperatura a través de los efectos de la viscosidad en el flujo del agua. Debido a que la distancia de sedimentación para la materia particulada es relativamente pequeña y que el tiempo de residencia del agua en el humedal es muy largo, estos efectos de la viscosidad se pueden omitir. La remoción de SST en este tipo de sistemas no es un parámetro limitante en el diseño de humedales debido a que la remoción de estos sólidos es muy rápida en comparación con la DBO o el nitrógeno.

Muchos de los sólidos en aguas residuales domésticas municipales e industriales son de naturaleza orgánica y se pueden descomponer con el tiempo, dejando mínimos residuos. Los humedales diseñados para tratamiento de aguas lluvia, alcantarillado unitario y aguas residuales de algunos tipos de industrias que contienen altas concentraciones de sólidos inorgánicos puede que no necesiten un tratamiento primario, sin embargo podrían necesitar un tanque o laguna de sedimentación antes del humedal, para evitar una rápida acumulación de sólidos inorgánicos en el humedal.

Para los dos tipos de humedales artificiales se pueden esperar rendimientos similares en lo que respecta a remoción de DBO, ya que ambos sistemas son muy eficaces en este campo. La remoción de SST está influida por la producción de materiales orgánicos residuales que pueden aparecer en el efluente final como SST, por eso no se debe esperar una concentración menor a 5mg/l a la salida.

Por medio de una regresión lineal de datos obtenidos en diversos humedales en los Estados Unidos se han deducido unas ecuaciones que pueden servir para estimar la concentración de SST a la salida del humedal. Estas ecuaciones solo sirven para realiza una estimación del orden de magnitud de descarga.

Hay que considerar que estas ecuaciones se las debe aplicar en las condiciones que se las obtuvieron, es decir, para cargas hidráulicas de entre 40 a 75cm/día, ya que valores fuera de este rango pueden dar resultados incorrectos.

$$C_e = C_o(0.1139 + 0.00213CH) \qquad \text{Ecuación 5.15}$$

Donde:

C_e = SST en el efluente, mg/l

C_o = SST en el afluente, mg/l

CH = Carga hidráulica, cm/d

5.4. Diseño para la remoción de Nitrógeno.

El diseño para remoción de nitrógeno para cualquiera de los dos sistemas de humedales artificiales (flujo libre y flujo subsuperficial) es un poco complicado ya que el nitrógeno puede estar presente de diversas maneras y requiere condiciones ambientales y químicas para ser removido. El nitrógeno amoniacal es la forma de nitrógeno más frecuentemente regulada en el efluente debido a que el amoniaco no ionizado puede ser tóxico para los peces en pequeñas concentraciones y la oxidación del amoniaco en el cauce receptor puede reducir el nivel de oxígeno disuelto.

La remoción de nitrógeno es usualmente el parámetro de diseño principal cuando se tienen límites estrictos de vertido, tanto de nitrógeno amoniacal como de total. Es aconsejable asumir que todo el nitrógeno Kjeldahl (NTK) que ingresa el sistema se convierta en amoniaco. Durante los dos primeros años de funcionamiento del humedal la remoción de nitrógeno puede sobrepasar las expectativas ya que la adsorción del suelo y la asimilación de las plantas generan un rápido crecimiento de la cubierta vegetal.

La fuente principal de oxígeno para la nitrificación en este tipo de humedales es la reaireación atmosférica de la superficie del agua, aunque el humedal no es profundo, la mayoría del líquido está en condiciones anaerobias. La nitrificación se llevará a efecto en la parte cercana a la superficie del agua y la desnitrificación es posible que ocurra en el resto del líquido. La temperatura influye de diversas maneras, desde las reacciones biológicas, tanto de nitrificación como de desnitrificación, que son dependientes de la temperatura, hasta la solubilidad del oxígeno en el agua. La mayor fuente de carbono para la desnitrificación es la capa de restos de vegetación que se encuentra sumergida y la DBO del agua residual.

El modelo de diseño recomendado asume que la remoción de amoniaco se da completamente por nitrificación y se desprecia la correspondiente asimilación por las plantas. Para temperatura del agua de 10ºC o mayores, la dependencia de la temperatura del proceso de nitrificación es menor que la del proceso de remoción de DBO, a temperaturas menores de 10ºC, esta dependencia es muy alta. Las ecuaciones 5.16 y 5.17 son expresiones en términos de concentraciones de amoniaco.

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \qquad \text{Ecuación 5.16}$$

$$A_S = \frac{Q \ln(C_o / C_e)}{(K_T)(y)(n)} \qquad \text{Ecuación 5.17}$$

Donde:

A_s = Área superficial del humedal, m^2

C_e = Concentración de amoniaco en el efluente, mg/l

C_o = Concentración de NTK en el afluente, mg/l

K_T = Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}

$K_T = 0\ d^{-1}$ (0ºC)

$0.1367(1.15)^{(T-10)}$, d^{-1} (1-10ºC)

$0.2187(1.048)^{(T-20)}$, d^{-1} (+ de 10ºC)

n = Porosidad del humedal, 0.65 - 0.75

t = Tiempo de residencia hidráulico, d

y = Profundidad del agua en el humedal, m

Q = Caudal promedio del humedal, m^3/d

Cabe recalcar que en caso de que se requiera el valor de la constante K_T para temperaturas entre 0 y 1ºC habrá que interpolar, pero en el presente trabajo no habrá este inconveniente ya que en Ecuador no hay temperaturas tan bajas en lugares donde se hallan asentadas las ciudades y poblaciones.

Los humedales diseñados para remover conjuntamente amoniaco y DBO requieren el uso de las ecuaciones respectivas 5.14 para la DBO y la 5.17 para el amoniaco para determinar el área superficial del humedal, siendo así, el área que resulte mayor entre las dos ecuaciones citadas será el factor limitante para escoger el área requerida, es decir se escoge la que salga mayor de las dos.

La ecuación 5.16 por lo general requiere un tiempo de retención hidráulica (TRH) entre 7 a 12 días para cumplir con los límites requeridos en la salida de amoniaco.

Entrando a lo que a desnitrificación corresponde, la remoción de nitrógeno es un requerimiento de proyecto, es decir, que mucha de la producción de nitrato del humedal de flujo libre puede desnitrificarse y ser removida dentro del área prevista para la nitrificación y sin requerir una fuente de carbono adicional. Se puede decir que los humedales de flujo libre son más eficientes removiendo nitratos que los de flujo subsuperficial, debido a que tienen una mayor disponibilidad de carbono del detritus de las plantas. En las ecuaciones 5.18 y 5.19 se estiman la remoción de nitratos por medio de desnitrificación:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp(-K_T t) \qquad \text{Ecuación 5.18}$$

$$A_S = \frac{Q \ln(C_o / C_e)}{(K_T)(y)(n)} \qquad \text{Ecuación 5.19}$$

Donde:

A_s = Área superficial del humedal, m^2

C_e = Concentración de nitratos en el efluente, mg/l

C_o = Concentración de nitratos en el afluente, mg/l

K_T = Constante dependiente de la temperatura, d^{-1}

$K_T = 0\ d^{-1}$ (0ºC)

$K_T = (1.15)^{(T-10)}, d^{-1}$ (+1ºC)

n = Porosidad del humedal

t = Tiempo de residencia hidráulico, d

y = Profundidad del agua en el humedal, m

Q = Caudal promedio del humedal, m^3/d

Por lo general los humedales de flujo libre son anóxicos, pero tienen una parte aerobia en la superficie del agua, es decir, que se podría obtener la nitrificación y la desnitrificación en el mismo volumen de reactor.

Cuando la desnitrificación es requerida es porque se tiene un límite de descarga para el nitrógeno total (NT). El nitrógeno total en el efluente del sistema es la suma de los valores obtenidos en las ecuaciones 5.16 y 5.18, la determinación del área requerida para alcanzar el nivel específico de NT en el efluente es un proceso iterativo por medio de las ecuaciones 5.17 y 5.19:

- Se asume un valor para el amoniaco residual (C_e) y se resuelve la ecuación 5.17 para obtener el área requerida para nitrificación, determinándose así el TRH para el sistema.
- Tomar ($C_o - C_e$) como el nitrato producido por la nitrificación y usar este valor como el del afluente en la ecuación 5.18. Determinar la

concentración de nitratos en el efluente con la ecuación antes mencionada.

- La concentración de nitrógeno total en el efluente es la suma de los valores de C_e obtenidos en las ecuaciones 5.16 y 5.18. En el caso de que no se haya alcanzado el valor adecuado de NT se debe hacer otra iteración.

5.5. Diseño para la remoción de Fósforo.

En los sistemas de humedales, la remoción de fósforo no es tan efectiva. Durante el primer año de operación los rendimientos pueden ser muy buenos especialmente en sistemas de flujo libre, esto se debe a la adsorción del recién expuesto suelo del fondo del humedal, sin embargo, la remoción de fósforo a largo plazo puede ocurrir solo a través de la acumulación de sedimentos.

La deposición de estos sedimentos ocurre vía sedimentación particulada y precipitación química.

Por lo general el fósforo está presente dentro de las aguas residuales con concentraciones entre 4 y 15mg/l, dependiendo del caudal y de la carga hidráulica asociada, es posible remover entre 30 a 60% del fósforo presente en el afluente.

Basándose en los datos de la *North American Data Base,* se ha propuesto una constante de primer orden igual a 10m/año para estimar la remoción de fósforo en un sistema de humedales artificiales, estos 10m/año equivalen a un promedio de 2.74cm/d que es lo que se usa en la siguiente ecuación:

$$\frac{C_e}{C_o} = \exp\left(\frac{-K_p}{CH}\right) \qquad \text{Ecuación 5.20}$$

Donde:

C_e = Concentración de fósforo en el efluente, mg/l

C_o = Concentración de fósforo en el afluente, mg/l

K_p = 2.74 cm/d

CH = Carga hidráulica promedio anual, cm/d

$$A_S = \frac{(b)(Q)\ln(C_o / C_e)}{(K_p)} \qquad \text{Ecuación 5.21}$$

Donde:

A_s = Área superficial del humedal, m^2

b = factor de conversión, 100cm/m
Q = Caudal promedio del humedal, m^3/d

Este modelo fue desarrollado originalmente a partir de datos de humedales de flujo libre, sin embargo, puede ser válido para predecir el fósforo que será removido para cualquiera de los dos sistemas (flujo libre y subsuperficial) ya que depende del área superficial y no de las reacciones biológicas ocurridas en el área superficial específica del medio o detritus de plantas dentro de la zona del humedal. Se puede decir que se necesita un área realmente grande para alcanzar una buena remoción de fósforo en el efluente final. El humedal debe diseñarse para la eliminación de nitrógeno y se debe introducir un tratamiento alternativo para la remoción de fósforo requerida en caso de requerirse.

Debido a que la superficie del agua está expuesta a la atmósfera en este tipo de humedales, el problema que puede presentarse en lo que respecta a la temperatura es en lugares donde hay climas con fríos extremos < 0ºC, en nuestro caso no tendremos problemas de este tipo, sin embargo se dará una breve síntesis del análisis que debería hacerse si las temperaturas bajas estuvieran presentes en el lugar del proyecto.

En los humedales de flujo libre, la capa de hielo formada en la superficie del humedal es retenida por los numerosos tallos y hojas de la vegetación, así que el volumen disponible para el flujo se ve significativamente reducido al aumentar el espesor de la capa de hielo, el agua comienza a subir por las grietas hasta que esta superficie de flujo se congela y presenta entonces el fallo del sistema hasta que las temperaturas cálidas regresen. La actividad biológica tiene fin en este punto, esta situación debe ser prevenida si se pretende usar un humedal artificial.

En lugares donde se presentan climas con fríos extremos es esencial realizar el respectivo análisis térmico para asegurarse que el humedal será físicamente estable durante invierno y que pueda conservar temperaturas del agua que permitan continuar con la actividad biológica.

El correcto análisis que debe hacerse consta de los siguientes pasos:

1. Determinar la temperatura del agua en el humedal en las condiciones en que se da inicio a la formación de hielo. Se requieren cálculos separados para humedales con segmentos que poseen alta vegetación y para zonas con superficies libres.
2. Determinar la temperatura del agua para cuando haya hielo en la superficie del humedal.
3. Estimar el espesor total de hielo que se forma durante todo el periodo.

Como se mencionó anteriormente no se entrará en detalles con los cálculos para formación de hielo por no ser un factor que afecte al presente proyecto.

5.6. Aspectos Térmicos.

La temperatura es un parámetro muy importante en el diseño de humedales ya sean estos de flujo libre o flujo subsuperficial, las condiciones de temperatura afectan las actividades físicas y biológicas en el sistema. Se dice que cuando las temperaturas son muy bajas la capacidad para remover nitrógeno no es tan efectiva, pero eso no afectaría nuestro estudio ya que en la zona escogida, que corresponde a la costa del Ecuador, las temperaturas son un poco elevadas.