



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

Trabajo de Fin de Carrera Titulado:

**“DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL
PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA
UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK”**

Realizado por:
DIANA AGUILAR ARIAS

Director del proyecto:
MSc. Walberto Gallegos Eras

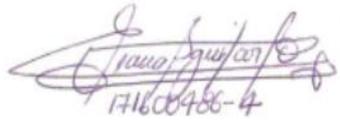
Como requisito para la obtención del título de:
MÁSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

Quito, 10 de marzo del 2020

DECLARACION JURAMENTADA

Yo, DIANA ELIZABETH AGUILAR ARIAS, con cédula de identidad # 171600486-4, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.



FIRMA Y CÉDULA

DECLARATORIA

El presente trabajo de investigación titulado:

“DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES DE LA UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK”

Realizado por:

DIANA ELIZABETH AGUILAR ARIAS

como Requisito para la Obtención del Título de:

MÁSTER EN GESTIÓN AMBIENTAL

ha sido dirigido por el profesor

WALBERTO GALLEGOS ERAS

quien considera que constituye un trabajo original de su autor



FIRMA

LOS PROFESORES INFORMANTES

Los Profesores Informantes:

Ph.D. Juan Carlos Navarro Castro

MSc. Alberto Alejandro Aguirre Bravo

Después de revisar el trabajo presentado,
lo han calificado como apto para su defensa oral ante el
tribunal examinador



FIRMA



FIRMA

Quito, 10 de MARZO del 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia

Mi esposito y negrita, por el regalo de un tiempo que les pertenecía, el amor y la paciencia que siempre encontré en ellos.

A mi mamita y hermanita, mis angelitos.

A mi papito y hermanas, por su apoyo y consejos para culminar este proyecto.

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la salud para culminar este proyecto y por la familia que me ha dado para acompañarme en esta etapa y su amor hacia mi

A mi esposito y mi negrita por su apoyo incondicional, amor y paciencia desde el inicio hasta el final de la carrera.

A mi Papito, hermanas y Rosita por su apoyo incondicional y cuidado de negrita para terminar la tesis.

A los grandes amigos de toda la vida y los que hoy son parte de ella.

A mi tutor, Magister. Walberto Gallegos, por su apoyo y tiempo dedicado para culminar con éxito la presente tesis

RESUMEN

El presente proyecto plantea la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial para tratar las aguas residuales que genera la Universidad Internacional SEK (Campus Miguel de Cervantes), por ser considerado un tratamiento fitodepurador, eficaz en la eliminación de materia orgánica, patógenos y nutrientes del agua residual, mantenimiento sencillo y de bajo costo. Previo al humedal, con la finalidad de disminuir la concentración de sólidos suspendidos que tenderían a acumularse en la zona de entrada del humedal y producirían atascamientos, malos olores y efectos negativos sobre las plantas, se diseñó un sedimentador primario que tiene de volumen 1.13 m^3 (1.23 m de largo, 0.62 m de ancho y 1.5 m de altura) para tratar un caudal de $24.27 \text{ m}^3/\text{día}$ de agua residual. Para alcanzar la calidad de agua deseada que cumpla con los límites máximos permisibles para descargas a un cauce de agua según la Norma Ambiental 002, el humedal artificial tiene un volumen de 24.48 m^3 (4.21 m de ancho, 8.29 m de largo y 0.7 m de profundidad). El humedal artificial con las macrófitas ornamentales que forman parte esencial del sistema y mejora la estética de la Institución: cartucho (*Zantedeschia*), achira (*Canna spp*) y lirio (*Iris spp*), se estima ayuden a disminuir un 86 % para DBO5, 80-90 % para DQO, 90-95% para sólidos en suspensión, 78.8% para coliformes fecales y 80 % para nitrógeno total y fósforo total. El costo total para la implementación del humedal artificial es de \$ 3.705 constituyéndose una tecnología natural para la depuración de aguas residuales.

Palabras claves: Agua residual, sistema fitodepurador, humedal artificial, macrófitas

ABSTRACT

This project proposes the construction of an artificial subsurface flow wetland to treat wastewater generated by the International University SEK (Campus Miguel de Cervantes), as it is considered a phytodepuration treatment, effective in the elimination of organic matter, pathogens and nutrients from the wastewater, simple maintenance and low cost. Prior to the wetland, in order to reduce the concentration of suspended solids that would tend to accumulate in the wetland inlet area and produce clogging, bad odors and negative effects on the plants, a primary settler was designed that has a volume of 1.13 m³ (1.23 m long, 0.62 m wide and 1.5 m high) to treat a flow of 24.27 m³ / day of wastewater. To achieve the desired water quality that meets the maximum permissible limits for discharges to a water channel according to Environmental Standard 002, the artificial wetland has a volume of 24.48 m³ (4.21 m wide, 8.29 m long and 0.7 m deep) The artificial wetland with the ornamental macrophytes that are an essential part of the system and improves the aesthetics of the Institution: cartridge (*Zantedeschia*), achira (*Canna spp*) and lily (*Iris spp*), it is estimated to help decrease 86% for DBO₅, 80-90% for DQO, 90-95% for suspended solids, 78.8% for fecal coliforms and 80% for total nitrogen and total phosphorus. The total cost for the implementation of the artificial wetland is \$ 3,705 constituting a natural technology for wastewater treatment.

Keywords : wastewater, phytodepurator treatment, artificial wetland, macrophytes

1. INTRODUCCIÓN

La depuración de las aguas residuales, sean urbanas, industriales y de origen doméstico, se han convertido en uno de los retos ecológicos y económicos más acuciantes del Planeta. La escasez del agua potable como recurso, el imparable aumento de la población, el crecimiento económico mundial y el incremento de la producción de efluentes, nos enfrentan al reto de conseguir un tratamiento adecuado de las aguas residuales, con el menor costo económico y energético posible. Es así, que los humedales artificiales son considerados métodos de tratamiento menos costosos y sofisticados en cuanto a operación y mantenimiento. Aunque estos sistemas requieren mayores extensiones de terreno en comparación con sistemas convencionales, suelen ser igualmente eficaces en la eliminación de materia orgánica, sólidos suspendidos, nutrientes (nitrógeno y fósforo), patógenos y metales pesados. Heike et al, (2011). También son utilizados ampliamente en muchos países para el tratamiento de efluentes domésticos e industriales (González, 2009), como tratamiento secundario o terciario, lo que hace necesario implementar previamente tratamiento primario (sedimentadores, otros), a fin de garantizar su adecuado funcionamiento y prevenir a largo plazo problemas de colmatación. (Espinosa, 2014).

Humedal artificial

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de agua residual (estanque o cauce) poco profundo, construido por el hombre, en el que se han sembrado plantas acuáticas (macrófitas) enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. (Llagas & Gómez, 2006). La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual es depurada progresiva y lentamente. Los humedales eliminan contaminantes mediante varios procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, reacciones químicas y volatilización. El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los vegetales durante

el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Delgadillo et al, 2010).

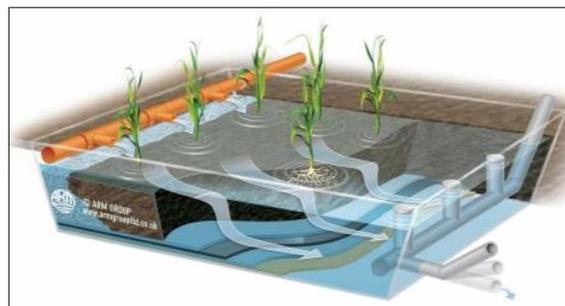
Clasificación

Los humedales artificiales se clasifican de acuerdo a la forma de circulación del agua que va a ser tratada, conociendo dos tipos:

Humedal artificial de flujo superficial

Los humedales artificiales de flujo libre superficial son aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. (EPA, 2000). La vegetación en este sistema está parcialmente sumergida en el agua, con profundidad entre 0,1 a 0,45 m, siendo las éneas, carrizos, juncias y juncos las especies más usadas para los humedales de flujo libre. La alimentación del humedal se la realiza de manera continua tratando el agua durante la circulación del mismo a través de los tallos y raíces de la vegetación emergente, en algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal. (Lovato, 2018)

Figura 1. Humedal artificial de flujo superficial

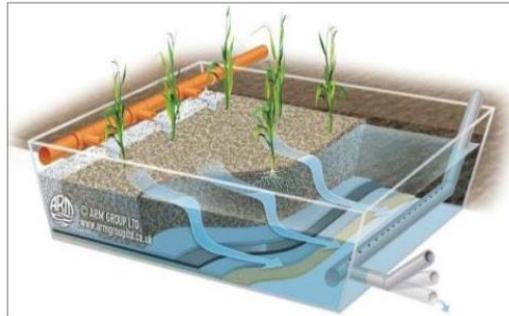


Humedal artificial de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan porque la circulación del agua se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m.

La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos: en función de la dirección del flujo de agua al sistema: (a) humedales de flujo subsuperficial horizontal y (b) humedales de flujo subsuperficial vertical. (Shiguango, 2014)

Figura 2. Humedal artificial de flujo subsuperficial



Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo. Toda la cama o fondo recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones de agua en el suelo. El agua ingresa por la parte superior de un extremo y es recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene pendiente de entre 0,5 % a 1 %. (Delgadillo et al, 2010)

Humedal artificial de flujo subsuperficial vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. También conocidos como filtros intermitentes, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tuberías de aplicación de agua. (Chauca, 2017).

Partes de un humedal de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

- **Agua residual**

El agua es la fase móvil dentro del humedal, la encargada del transporte de los contaminantes y en la cual se van a producir la mayoría de las reacciones responsables de la depuración.

(Estrada, 2010)

- **Vegetación**

El mayor beneficio de las plantas es la transferencia de oxígeno a la zona de la raíz. Su presencia física en el sistema (tallos, raíces y rizomas) permite la penetración a la tierra o medio de apoyo y transporta el oxígeno de manera más profunda, de lo que llegaría naturalmente a través de la sola difusión. 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 sirve como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija que es la responsable de gran parte del tratamiento físico, químico y biológico para la depuración de las aguas residuales. (Gualoto, 2010). El jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), como lo explica, Celis et al, (2005) es una de las especies acuáticas más estudiadas, debido a sus características depuradoras y facilidad de proliferación. Esta especie, de acuerdo con los reportes de la literatura, alcanza reducciones de DBO₅ en el orden de 95 %, y hasta 90,2 % para la DQO. En el caso de los sólidos suspendidos se registran disminuciones con valores que se encuentran en el rango de 21 % y 91 %. En cuanto al fosforo total y nitrógeno total, se alcanzaron máximas remociones de 91,7 % y 98,5 % respectivamente, siendo este último, el contaminante con mayor remoción. (Martelo & Lara, 2012).

Microorganismos.

Se encargan 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 predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes, elementos traza y la desinfección. (Vinueza, 2014)

Sustrato

En los humedales el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos. (Forero & Urrego, 2016). El medio es responsable directo de la extracción de algunas sustancias contaminantes mediante interacciones físicas y químicas. (Delgadillo et al, 2010)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

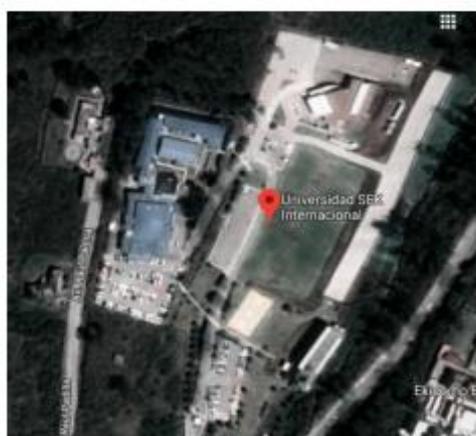
2.1 Área de estudio

La investigación se realizó en El campus Miguel de Cervantes de la Universidad Internacional SEK (UISEK), ubicada en Carcelén Alto de la Provincia de Pichincha, cantón Quito. La Institución cuenta con 1.589 personas entre estudiantes y administrativos que ocupan las instalaciones del Campus, las cuales asisten entre 8 y 20 días al mes según el programa y carrera de estudio elegida. (Núñez, 2018). Actualmente, la UISEK no cuenta con un sistema de tratamiento de efluentes, por lo cual todas las descargas son vertidas al río Monjas y a un terreno aledaño. Las coordenadas geográficas de los puntos de muestreo para la caracterización de las aguas residuales seleccionados fueron:

Tabla 1. Coordenadas geográficas de puntos de muestreo

Punto 1	
Latitud: -0.090065	Longitud: -78.484837
Punto 2	
Latitud: -0.090410	Longitud: -78.484014
Punto 3	
Latitud: -0.090153	Longitud: -78.483395

Figura 3. Campus Miguel de Cervantes de la Universidad Internacional SEK (UISEK)



2.2 Métodos de muestreo

Para muestrear las aguas residuales que genera la UISEK se realizó con base a la Norma Técnica 002 para control de descargas líquidas dentro del Distrito Metropolitano de Quito. Se tomo muestras en tres puntos específicos: tubería de descarga del edificio de Administración y de la Facultad de Seguridad y Salud Ocupacional (punto 1), fosa séptica de la Facultad de Ciencias Ambientales (punto 2) y fosa séptica de la Facultad de Mecánica (punto 3). El muestreo se realizó durante cuatro semanas seguidas del mes de junio (tiempo durante la UISEK se encuentra en periodo de actividades lectivas), recolectando una muestra por semana por cada punto de muestreo. La muestra compuesta se formó de 4 muestras simples en un intervalo de una hora, como lo indica la Tabla 2.

Tabla 2. Guía para la frecuencia de muestreo en flujo continuo (Núñez, 2018).

Horas por día de la descarga	Número de muestras simples	Intervalo entre toma de muestras simples (horas)	
Menor a 4	Mínimo 2	-	-
Más de 4 y hasta 16	4	1	2
Mas de 16 y hasta 24	6	3	4

Para determinar el caudal en los puntos de descarga, se midió el tiempo transcurrido desde que se introdujo el recipiente en el sitio de aforo hasta que se retiró, la relación de estos valores permitió conocer el caudal en ese instante de tiempo. Para la medición del caudal se utilizaron los siguientes materiales: cronómetro y recipiente plástico de 10 L de capacidad

El caudal se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Donde:

Q = caudal (L/s)

V = volumen (L)

t = tiempo (s)

2.3 Medición de parámetros en laboratorio

Recolectada la muestra, se realizó el análisis físico-químico y microbiológico, en el Laboratorio de procesos de la Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales de la Universidad Internacional SEK. El manejo, conservación, transporte y recepción de las muestras se realizó con base a la Norma técnica NTN INEN 2 169:98 “*Agua, calidad del agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras*”. Para el análisis del agua residual se utilizó los Métodos estándar para agua potable y residual (Standar Methods) aprobados por la American Public Health Association (APHA, 2017), como se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Métodos estándar para agua potable y residual

Parámetros	Métodos
Caudal	Método volumétrico
pH	Método Estándar 4500 H+B
Temperatura	Método Estándar 2550B
Grasas y aceites	Método Estándar 5520B
Oxígeno disuelto	ASTM D888-18
SAAM	Método Estándar 5540C
Sólidos suspendidos totales	Método Estándar 2540D
Sólidos totales disueltos	Método Estándar 2540C
Fósforo total	Método Estándar 4500P
Sulfatos	Método Estándar 4500E
Nitrógeno amoniacal	APHA 4500 NH3
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	Método Estándar 5210D
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Método Estándar 5220A
Coliformes fecales	Método Estándar 9923B

Fuente:(APHA, 2017)
Elaborado: Aguilar, 2020

2.4 Análisis de parámetros

Los resultados obtenidos del análisis físico-químico y microbiológico del agua residual de la UISEK, serán comparados con la Norma Técnica 002 para control de descargas líquidas dentro del territorio del Distrito Metropolitano de Quito de la ordenanza Municipal 138, para evaluar si los parámetros cumplen o no cumplen con los límites máximos permisibles establecidos para descargas a un cauce de agua.

2.5 Tratamiento estadístico de datos

Para comparar los valores de la caracterización del agua residual de la UISEK, con el trabajo realizado por Núñez (2018), “*Diagnostico de las descargas líquidas del Campus Miguel de Cervantes de la Universidad Internacional SEK*”, se procedió a utilizar herramientas estadísticas como el promedio, desviación estándar y el coeficiente de variación, con la finalidad de contar con datos precisos y confiables para el dimensionamiento del diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales.

2.6 Determinación del Índice de Calidad del Agua

Se determinó el Índice de Calidad del Agua (ICA), mediante el programa IQA DATA desarrollado por el Dr. Eduardo Lobo de Universidad de Santa Cruz del Sol de Brasil. Para la determinación del valor del “ICA”, se contó con las medidas de 9 parámetros: Coliformes Fecales, pH, DBO₅, Nitratos, Fosfatos, Temperatura, Turbidez, Sólidos disueltos totales y Oxígeno disuelto. Bajaña, (2018) nos indica que la interpretación del valor del IQA se realiza dentro de las bandas de calidad del agua, que son: muy mala, mala, regular, buena y excelente, como se observa en la Tabla 4.

Tabla 4. Categorías de calidad de agua para ICA

Clasificación de la calidad del agua	Valor
Muy mala	0-25
Mala	26-50
Regular	51-70
Buena	71-90
Excelente	91-100

2.7 Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales

Con base en estudios y fuentes bibliográficas, determinan que una de las mejores alternativas frente a métodos tradicionales, para el tratamiento de aguas residuales domésticas son los humedales artificiales, presentando ventajas desde el punto de vista ambiental y económico. Es así, que el presente estudio planteó como tratamiento primario la sedimentación y secundario como los humedales artificiales, para formar el sistema de tratamiento de aguas residuales generadas por la UISEK. De igual manera un factor importante para la selección del tratamiento, fue calcular la relación DBO₅/DQO que permite determinar el carácter de biodegradabilidad que tienen los diferentes vertimientos. (Bedoya et al, 2014)

Tabla 5. Criterios de Biodegradabilidad según la relación DBO₅/DQO

Relación DBO₅/DQO	Carácter
>0.6	Muy biodegradable
0.2 - 0.6	Biodegradable
<0.2	Poco biodegradable

Fuente: Salvador, (2016)

2.7.1 Sedimentador primario

El diseño del sedimentador se realizó en base a parámetros y criterios de diseño establecidos en Metcalf & Eddy (1995) y Crites et al (2000).

Parámetros de diseño

a) Carga superficial

$$C_s = \frac{Q}{A_s} \quad (2)$$

Donde:

C_s = Carga superficial (m^3/m^2*d)

A_s = Área superficial del sedimentador (m^2)

Q = Caudal de diseño ($m^3/día$)

Tabla 6. Criterios de diseño para sedimentadores

Características	Intervalo	Típico
Sedimentación primaria seguida de tratamiento secundario		
Tiempo de retención (h)	1.5-2.5	2
Carga superficie (m^3/m^2*d)	32-48	-
Carga sobre vertedero ($m^3/m*d$)	10000-40000	20000
Sedimentación primaria con adición del fango activo en exceso		
Tiempo de retención (h)	1.5-2.5	2
Carga superficie (m^3/m^2*d)	24-60	-
Carga sobre vertedero ($m^3/m*d$)	10000-40000	20000

Fuente: Metcalf & Eddy, (1995)

Se usa una relación 1:2 de ancho: largo para el cálculo de las medidas del sedimentador primario, mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = L * a \quad (3)$$

$$A_s = 2a * a$$

$$A_s = 2a^2$$

Donde:

A = Área superficial del sedimentador (m^2)

L = Largo del sedimentador (m)

a = Ancho del sedimentador

Ancho del sedimentador

$$a = \sqrt{\frac{A_s}{2}} \quad (4)$$

Largo del sedimentador

$$L = 2 * a \quad (5)$$

Tabla 7. Parámetros de diseño para sedimentadores rectangulares y circulares para el tratamiento primario de aguas residuales

Parámetros	Intervalo	Típico
Rectangular		
Profundidad (m)	3-4.5	3.6
Longitud (m)	15-90	25-40
Anchura (m)	3-25	5-10
Velocidad de los rascadores (m/min)	0.6-1.2	0.9
Circular		
Profundidad (m)	3-3.4	3.6
Longitud (m)	3-60	12-45
Anchura (m)	6.25-16	8
Velocidad de los rascadores (m/min)	0.02-0.05	0.03

Fuente: Metcalf & Eddy, (1995)

Volumen del sedimentador

$$V = L * a * h \quad (6)$$

Donde:

V = Volumen del sedimentador (m³)

L = Largo del sedimentador (m)

a = Ancho del sedimentador (m)

h = Altura del sedimentador (m)

Tiempo de retención hidráulico

$$T_{rh} = \frac{V}{Q} \quad (7)$$

Donde:

T_{rh} = Tiempo de retención hidráulico (h)

Q = Caudal de diseño (m^3/h)

V = Volumen del sedimentador (m^3)

Área de la sección transversal

$$A_t = \frac{V}{L} \quad (8)$$

Donde:

A_t = Área de la sección transversal (m^2)

V = Volumen del sedimentador (m^3)

L = Largo del sedimentador (m)

Remoción de sólidos suspendidos y DBO_5

La eficiencia de remoción de DBO_5 y sólidos suspendidos, está en función de la concentración del afluente y del tiempo de retención y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$R = \frac{T_{rh}}{a + b * T_{rh}} \quad (9)$$

Donde:

R = Porcentaje de remoción esperado (%)

T_{rh} = Tiempo de retención hidráulico (h)

a = Constante empírica

b = Constante empírica

Tabla 8. Valores de las constantes empíricas, a y b a 20 °C

Variable	a	b
DBO_5	0.018	0.02
SST	0.0075	0.014

Fuente: Bustos, (2012)

2.7.2 Humedal artificial

El diseño del humedal artificial se basó en los parámetros establecidos en la Guía de la U.S EPA (1993) y Delgadillo (2010). Para realizar los cálculos se tomó en consideración algunos criterios de diseño:

- Según Lovato (2018), se sugiere que inicialmente se considere una proporción de largo ancho 2:1 para alcanzar la reducción deseada de DBO₅.
- En la mayoría de casos estudiados la pendiente más utilizada es del 1%. (López, 2018)
- Para el diseño se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4”) de diámetro que parece ser la que funciona mejor. (Shiguango, 2014).
- La profundidad del humedal artificial generalmente varía entre 0.4 a 1 m (valor usual 0.7 m). López, (2018).

Tabla 9. Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales artificiales de flujo subsuperficial

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Conductividad Hidráulica, ks (m³/m²/d)	Porosidad (%)
Arena gruesa	2	100-1000	28-32
Arena Gravosa	8	500-5000	30-35
Grava Fina	16	1000-10000	35-38
Grava media	32	10000-50000	36-40
Roca gruesa	128	50000-250000	38-45

Fuente: Reed et al., 1995

1) Diseño biológico

a) Área superficial

El cálculo del área superficial se realizó en base al parámetro que se desea disminuir o remover, la U.S EPA (1993) utiliza la siguiente ecuación para la disminución de la DBO₅.

$$A_s = \frac{Q * [\ln \frac{C_o}{C_e}]}{k_T * h * n} \quad (10)$$

Donde:

A_s = área de superficie del humedal artificial (m²)

Q = flujo de entrada (m³/día)

C_e = Concentración final de DBO₅ (mg/L)

C_o = Concentración inicial de DBO₅ (mg/L)

n =porosidad del medio granular (%)

h = profundidad promedio del agua en el humedal artificial (m)

k_T = Constante cinética (días⁻¹)

Para el cálculo de la constante cinética se asume el valor de 1.104 días^{-1} a 20°C , reportado por Reed et al., (1995). La constante de reacción de primer orden se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k_T = k_{20} * 1.06^{T_2-20} \quad (11)$$

Donde:

k_T = constante cinética (días^{-1})

k_{20} = constante cinética corregida a 20°C

T_2 = Temperatura del agua ($^\circ\text{C}$)

b) Tiempo de retención

$$t = \frac{n * h * A_s}{Q} \quad (12)$$

Donde:

t = Tiempo de retención (días)

n = porosidad del medio granular (%)

h = profundidad promedio del agua en el humedal artificial (m)

A_s = área de superficie del humedal artificial (m^2)

Q = flujo de entrada ($\text{m}^3/\text{día}$)

2. Diseño hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. El modelo de diseño que se utilizó es el determinado por Reed et al (1995), el cual asume un flujo en condiciones uniformes de un reactor tipo pistón. Para poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados. a través del dimensionamiento biológico. El dimensionamiento hidráulico se realizó aplicando la Ley de Darcy que describe el régimen del flujo en un medio poroso mediante la siguiente ecuación:

$$Q = k_s * A_c * s \quad (13)$$

Donde:

Q = caudal de entrada (m³/día)

k_s = conductividad hidráulica (m³/m²/d)

A_c = Área transversal del humedal artificial (m²)

s = Gradiente Hidráulico de la superficie del agua en el sistema (m/m)

Para la obtención del gradiente hidráulico se emplea la siguiente ecuación:

$$s = \frac{m * h}{L} \quad (14)$$

Donde:

s = gradiente hidráulico (m/m)

m = pendiente recomendada, 1%

h = profundidad del humedal artificial (m)

L = Largo del humedal artificial (m)

El área transversal del humedal artificial, se calcula a partir de la ecuación:

$$A_c = W * h \quad (15)$$

Donde:

A_c = Área transversal del humedal artificial (m²)

W = ancho del humedal artificial (m)

h = profundidad del humedal artificial (m)

El largo se obtiene calculando a través de la ecuación:

$$L = \frac{A_s}{W} \quad (16)$$

Donde:

A_s = área de superficie del humedal artificial (m²)

W = ancho del humedal artificial (m)

El ancho del humedal artificial se consigue a partir de la sustitución de las ecuaciones (14) (15) y (16) en la ecuación de Darcy (13), obteniendo la ecuación (17), que permitió el cálculo del ancho del humedal compatible con el gradiente hidráulico. (Lovato, 2014)

$$W = \frac{1}{h} * \left(\frac{Q * A_s}{m * k_s} \right)^{0.5} \quad (17)$$

Donde:

W = ancho del humedal artificial (m)

Q = caudal de entrada (m³/día)

A_s = área de superficie del humedal artificial (m²)

h = profundidad del humedal artificial (m)

m = pendiente, recomendado 1%

k_s =conductividad hidráulica (m³/m²/d)

2.7.4 Selección de la especie vegetal (macrófitas)

La Universidad Internacional SEK pretende tratar el agua por medio de tecnologías amigables con el medio ambiente como son los humedales artificiales, por lo cual es necesario que este sistema cuente una especie vegetal que nos permita mantener el equilibrio y la estética de la Institución. Para la selección de la especie vegetal como son las macrófitas (plantas acuáticas), se tomó en cuenta criterios mencionados en el Manual de Humedales Artificiales (2008) emitidos por la ONUHABITAT: penetración profunda de las raíces, rizomas fuertes y raíces fibrosas en gran cantidad, considerable biomasa o densidad de tallo para lograr la máxima transferencia de agua, asimilación de nutriente y estética.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3. 1 Caracterización de las aguas residuales generadas por la UISEK

Los resultados obtenidos de la caracterización de las aguas residuales generadas por la Universidad SEK en los tres puntos de descarga establecidos durante cuatro semanas seguidas, se muestran en la Tabla 10,11 y 12 respectivamente. Los parámetros medidos en situ fueron

pH, temperatura y oxígeno disuelto, en cada punto de muestreo, debido a que este tipo de parámetros por su naturaleza cambiante pueden ser afectados por la temperatura, oxidación química/biológica, conservación y transporte, dando lugar a resultados de veracidad cuestionable en análisis posteriores. (Barreto, 2016)

Tabla 10. Resultados de la caracterización del agua residual en el punto 1 de descarga de la UISEK durante cuatro semanas consecutivas

Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO					
Parámetros	Unidades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Caudal	L/s	0.25	0.23	0.26	0.18
pH	-	8.42	8.31	8.52	8.24
Temperatura	° C	18.23	18.14	18.32	18.36
Grasas y aceites	mg/L	56.21	64.12	69.65	52.78
Oxígeno disuelto	mg/L	3.45	2.78	3.15	2.56
SAAM	mg/L	0.17	0.22	0.16	0.24
Sólidos suspendidos	mg/L	236	187	180	178
Sólidos totales disueltos	mg/L	832	798	876	922
Fósforo total	mg/L	14.42	10.12	14.23	11.34
Sulfatos	mg/L	44	38	52	48
Nitrógeno Total	mg/L	262	187	198	170
Turbidez	NTU	23.4	30.8	26.7	28.3
DBO ₅	mg/L	323.2	206.	219.63	278.8
DQO	mg/L	436	346	657	521
Coliformes fecales	UFC/100 ml	1.8*10 ⁴	2.4*10 ⁴	1.2*10 ⁴	1*10 ⁴

Tabla 11. Resultados de la caracterización del agua residual en el punto 2 de descarga de la UISEK durante cuatro semanas consecutivas

Facultad de Ciencias Ambientales					
Parámetros	Unidades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Caudal	L/s	0.033	0.03	0.038	0.023
pH	-	7.69	7.53	7.65	7.29
Temperatura	° C	18.45	17.80	18.24	18.65
Grasas y aceites	mg/L	14.38	16.25	12.36	22.64
Oxígeno disuelto	mg/L	4.18	3.78	3.23	3.65
SAAM	mg/L	0.14	0.17	0.22	0.12
Sólidos suspendidos totales	mg/L	52	83	71	92
Sólidos totales disueltos	mg/L	834	798	810	952
Fósforo total	mg/L	10.06	8.52	12.87	17.34

Sulfatos	mg/L	25	11	14	38
Nitrógeno total	mg/L	120	102	116	132
Turbidez	NTU	63.9	70.4	58.2	61.2
DBO ₅	mg/L	229.14	214.56	318.11	210.05
DQO	mg/L	774	698	598	526
Coliformes fecales	UFC/100 ml	1.6*10 ⁶	1.2*10 ⁶	1.2*10 ⁶	1.4*10 ⁶

Tabla 12. Resultados de la caracterización del agua residual en el punto 3 de descarga de la UISEK durante cuatro semanas consecutivas

Facultad de Mecánica					
Parámetros	Unidades	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4
Caudal	L/s	0.022	0.02	0.013	0.018
pH	-	8.96	8.84	8.65	8.87
Temperatura	° C	18.15	18	18.12	18.21
Grasas y aceites	mg/L	160.68	102.37	89.76	106.10
Oxígeno disuelto	mg/L	2.73	2.15	2.68	3.15
SAAM	mg/L	0.12	0.13	0.11	0.13
Sólidos suspendidos totales	mg/L	128	115	87	102
Sólidos totales disueltos	mg/L	468	532	297	208
Fósforo total	mg/L	8.23	9.12	6.32	9.76
Sulfatos	mg/L	26	32	18	11
Nitrógeno Total	mg/L	142	113	96	102
Turbidez	NTU	15.8	17.4	14.6	17.2
DBO ₅	mg/L	126.1	110.6	89.5	102.1
DQO	mg/L	206	192	124	98
Coliformes fecales	UFC/100 ml	2.2*10 ⁶	1.1*10 ⁶	1.2*10 ⁶	1.4*10 ⁶

3.2 Tratamiento estadístico de datos

Los cálculos del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación de los parámetros medidos de los puntos de muestreo (1,2 y 3) durante cuatro semanas seguidas, se indican a continuación en la Tablas 13, 14 y 15, en conjunto con los resultados del promedio y coeficiente de variación calculados por Núñez (2018), en su trabajo de titulación “*Diagnostico de las descargas líquidas del Campus Miguel de Cervantes de la Universidad Internacional SEK*”.

Tabla 13. Cálculo del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en el punto 1

Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO						
Parámetros	Unidades	Promedio (2019)	Desviación Estándar (2019)	Coeficiente de variación (2019)	Promedio (2018) *	Coeficiente de variación (2018) *
Caudal	L/s	0.23	0.03	15.47	0.19	20.33
pH	-	8.37	0.12	1.47	8.48	2.33
Temperatura	° C	18.26	0.09	0.53	18.44	3.54
Grasas y aceites	mg/L	60.69	7.63	12.57	57.01	18.86
Oxígeno disuelto	mg/L	2.98	0.39	13.20	4.53	5.52
SAAM	mg/L	0.19	0.03	19.55	0.27	44.85
SST	mg/L	195.25	27.43	14.05	158	27.66
STD	mg/L	857	53.82	6.28	424.50	19.27
Fósforo total	mg/L	12.52	2.13	17.04	11.31	15.24
Sulfatos	mg/L	45.5	5.97	13.12	42.75	33.76
Nitrógeno Total	mg/L	204.25	40.18	19.67	195	10.47
Turbidez	NTU	27.3	3.09	11.35	247	16.71
DBO ₅	mg/L	257.12	54.11	21.04	273.18	43.24
DQO	mg/L	490	132.29	26.99	566.50	66.02
Coliformes fecales	UFC/100 ml	1.6*10 ⁴	0.63	39.52	1.23*10 ⁷	65.53

* (Núñez, 2018)

Tabla 14. Cálculo del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en el punto 2

Facultad de Ciencias Ambientales						
Parámetros	Unidades	Promedio (2019)	Desviación Estándar (2019)	Coeficiente de variación (2019)	Promedio (2018) *	Coeficiente de variación (2018) *
Caudal	L/s	0.031	0.006	20.23	0.04	28.40
pH	-	7.51	0.16	2.20	7.13	4.67
Temperatura	° C	18.29	0.36	1.99	18.34	5.31
Grasas y aceites	mg/L	16.40	4.44	27.11	17.30	45.48
Oxígeno disuelto	mg/L	3.71	0.39	10.55	5.36	11.51
SAAM	mg/L	0.16	0.04	26.76	0.11	34.09
SST	mg/L	74.5	17.29	23.21	79.75	60.40
STD	mg/L	848.5	70.60	8.32	100	35.59
Fósforo total	mg/L	128,3.19	3.87	31.74	8.43	20.63
Sulfatos	mg/L	22	12.24	55.67	19	86.48
Nitrógeno total	mg/L	117.5	12.36	10.52	145	10.90
Turbidez	NTU	63.4	5.20	8.19	49.3	24.10
DBO ₅	mg/L	242.96	50.75	20.89	237.64	42.81

DQO	mg/L	649	109.17	16.82	579.25	78.71
Coliformes fecales	UFC/100 ml	1.2*10 ⁶	0.16	13.60	8.77*10 ⁶	117.60

* (Núñez, 2018)

Tabla 15. Cálculo del promedio, desviación estándar y coeficiente de variación en el punto 3

Facultad de Mecánica						
Parámetros	Unidades	Promedio (2019)	Desviación Estándar (2019)	Coeficiente de variación (2019)	Promedio (2018) *	Coeficiente de variación (2018) *
Caudal	L/s	0.018	0.003	21.16	0.02	77.54
pH	-	8.83	0.13	1.47	8.26	2.58
Temperatura	° C	18.12	0.08	0.48	18.25	2.40
Grasas y aceites	mg/L	114.72	31.42	27.38	133.80	52.12
Oxígeno disuelto	mg/L	2.67	0.40	15.31	4.77	3.07
SAAM	mg/L	0.12	0.009	7.81	0.13	77.72
SST	mg/L	108	17.56	16.26	123	25.53
STD	mg/L	376.25	149.73	39.79	160.50	39.41
Fósforo total	mg/L	8.35	1.49	17.90	6.26	15.84
Sulfatos	mg/L	21.75	9.17	42.2	21.5	52.96
Nitrógeno Total	mg/L	113.25	20.41	18.02	126.75	23.92
Turbidez	NTU	16.25	1.31	8.06	59	18.41
DBO ₅	mg/L	107.11	15.35	14.33	207.16	63.33
DQO	mg/L	155	52.21	33.68	469	50.16
Coliformes fecales	UFC/100 ml	1.5*10 ⁶	0.52	36.27	3.87*10 ⁶	119.78

* (Núñez, 2018)

Como se indica en las Tablas 13,14 y 15, en base al coeficiente de variación calculado para el presente estudio (color anaranjado), se verifica que la mayoría de los parámetros analizados en los puntos de muestreo presentan variabilidad moderada (25%-40%), en comparación con los resultados de C.V (coeficiente de variación) calculados en el estudio realizado por Núñez (2018), con valores superior a 40% representando alta variabilidad (color verde). Para nuestro caso, en base al coeficiente de variación, se puede indicar que el promedio calculado es homogéneo y representativo del conjunto de datos. (Vargas, 1995). En función del promedio calculado para cada uno de los parámetros medidos, en la Tabla 13 se puede observar que el punto de muestreo 1 correspondiente a las descargas generadas por la Facultad de

Administración, SSO y Edificio Central Administrativo tiene el caudal más alto y representativo de la UISEK con un valor de 0.23 L/s, en comparación con los caudales de la Facultad de Ciencias Ambientales y Facultad de Mecánica de 0.031 L/s y 0.018 L/s, como indica la Tabla 14 y 15 respectivamente, esto debido a que a la mayor cantidad del personal administrativo y estudiantes se encuentran en estos edificios.

3.3 Estado de cumplimiento de los parámetros físico-químico y microbiológicos del agua residual de la UISEK con la Norma ambiental 002

Los resultados de los parámetros del agua residual de la UISEK en los tres puntos de muestreo, realizados el mes de junio del 2019 y su estado de cumplimiento con los límites máximos permisibles de la Norma ambiental 002, para descargas dentro del Distrito Metropolitano de Quito, se indican la Tabla 16, 17 y 18 respectivamente.

Tabla 16. Comparación de los resultados de la caracterización de las aguas residuales de la UISEK en el punto 1 con la norma ambiental *NT002

Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO				
Parámetros	Unidades	Valor	Límite máximo permisible	**Cumplimiento
pH	-	8.37	6-9	C
Temperatura	° C	18.26	Condición natural +/- 3	C
Grasas y aceites	mg/L	60.69	30	NC
SAAM	mg/L	0.19	0.5	C
SST	mg/L	195.25	100	NC
Fósforo total	mg/L	12.52	10	NC
Sulfatos	mg/L	45.5	1000	C
Nitrógeno Total	mg/L	204.25	50	NC
DBO ₅	mg/L	257.12	100	NC
DQO	mg/L	490	160	NC
Coliformes fecales	UFC/100 ml		Remoción > al 99,9%	NC

*NT002: Norma Técnica para control de descargas líquidas dentro del territorio del Distrito Metropolitano de Quito

** Cumplimiento: Cumple (C), No Cumple (NC)

Tabla 17. Comparación de los resultados de la caracterización de las aguas residuales de la UISEK en el punto 2 con la norma ambiental *NT002

Facultad de Ciencias Ambientales				
Parámetros	Unidades	Valor	Límite máximo permisible	**Cumplimiento
pH	-	7.54	6-9	C
Temperatura	° C	18.29	Condición natural +/- 3	C
Grasas y aceites	mg/L	16.40	30	C
SAAM	mg/L	0.17	0.5	C
SST	mg/L	74.5	100	C
Fósforo total	mg/L	12.19	10	NC
Sulfatos	mg/L	22	1000	C
Nitrógeno Total	mg/L	117.5	50	NC
DBO ₅	mg/L	242.96	100	NC
DQO	mg/L	649	160	NC
Coliformes fecales	UFC/100 ml		Remoción>al 99,9%	NC

*NT002: Norma Técnica para control de descargas líquidas dentro del territorio del Distrito Metropolitano de Quito

Tabla 18. Comparación de los resultados de la caracterización de las aguas residuales de la UISEK en el punto 3 con la norma ambiental *NT002

Facultad de Mecánica				
Parámetros	Unidades	Valor	Límite máximo permisible	**Cumplimiento
pH	-	8.83	6-9	C
Temperatura	° C	18.12	Condición natural +/- 3	C
Grasas y aceites	mg/L	114.72	30	NC
SAAM	mg/L	0.18	0.5	C
SST	mg/L	108	100	NC
Fósforo total	mg/L	8.35	10	C
Sulfatos	mg/L	21.75	1000	C
Nitrógeno Total	mg/L	113.25	50	NC
DBO ₅	mg/L	107.11	100	NC
DQO	mg/L	155	160	NC
Coliformes fecales	UFC/100 ml		Remoción>al 99,9%	NC

*NT002: Norma Técnica para control de descargas líquidas dentro del territorio del Distrito Metropolitano de Quito

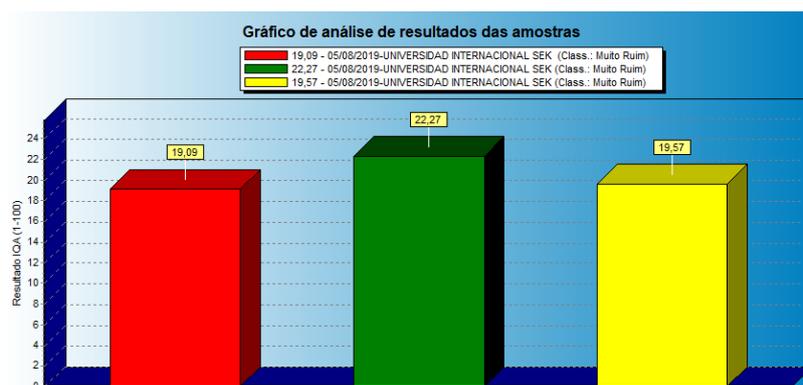
Respecto a la concentración de aceites y grasas, el agua residual generada en la Facultad de Mecánica (punto 3), presenta la mayor concentración con 114.72 mg/L (Tabla 18), en comparación con los valores medidos en los puntos de muestreo 1 (Facultad de Administración,

Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO) y 2 (Facultad de Ambiental) de 60.69 mg/L y 16.40 mg/L, como se indica en las Tablas 16 y 17 respectivamente. El efluente que no cumple con el límite máximo permisible para aceites y grasas establecido en 30 mg/L, para descargas de efluentes a un cauce de agua son el punto 1 y 2. Para la Demanda Bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), considerados los parámetros indicadores más importantes de la contaminación del agua residual, debido a que se basan en la cantidad de oxígeno necesario para descomponer u oxidar los productos orgánicos. (Orozco et al, 2011), el efluente analizado en el punto 1, es el que presenta la mayor concentración de DBO₅ igual a 257.12 mg/L (Tabla 16), valor que no cumple con el límite máximo permisible para descargas a un cauce de agua establecido en 100 mg/L. El alto valor medido de la DBO₅ en este punto de muestreo en comparación con los otros puntos de muestreo, se debe al elevado contenido de detergentes, residuos de comida, orina y materia fecal que se genera en la cafetería, Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo y Facultad de SSO. En cambio, el valor de la DQO más alto se reporta en el efluente generado en la Facultad de Ciencias Ambientales igual a 649 mg/L (Tabla 17), valor fuera de norma ya que el límite máximo permisible es 160 mg/L. Es decir, los parámetros que no cumplen con los límites máximos permisibles en los tres puntos de muestreo establecidos por la Norma 002 para descargas a un cauce de agua son: DBO₅, DQO, Coliformes fecales y Nitrógeno total, mientras que los parámetros que están dentro de Norma son: pH, temperatura y SAAM (sustancias activas al azul de metileno).

3.4 Índice de Calidad del Agua

La Figura 4, nos indican los gráficos de los resultados del cálculo del Índice de calidad (ICA) de los efluentes en cada uno de los puntos de muestreo, mediante el programa IQA DATA.

Figura 4. Resultados del Índice de calidad en cada punto de muestreo



El ICA (Índice de Calidad del Agua) adopta para condiciones de calidad óptima un valor máximo de 100, el cual va disminuyendo con el aumento de la contaminación del agua. Es así, que las aguas residuales de la UISEK en los tres puntos de muestreo se encuentran en la categoría de “MUY MALA” calidad, que según SNET (2016), las aguas que caen dentro de esta categoría presentan niveles muy bajos de vida acuática, abundantes problemas de contaminación y es considerada agua no aceptable para estar en contacto y menos ser descargada a un cauce de agua. El punto que tiene el valor más bajo dentro de esta categoría corresponde al punto 1 (Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO) con 19.09 (barra roja), seguido por las descargas del punto 3 (barra amarilla) y luego por el punto 2 (barra verde), con valores de 19.57 y 22.27 respectivamente.

3.5 Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales de la UISEK

Los resultados obtenidos de los parámetros de diseño del sedimentador primario y del humedal artificial de flujo subsuperficial, con base a resultados obtenidos de la caracterización del afluente y criterios de diseño establecidos en fuentes bibliográficas, se muestran en las Tablas 19 y 20, respectivamente.

3.5.1 Sedimentador primario

La Tabla 19, indica los resultados obtenidos de los parámetros de diseño del sedimentador, los cálculos se detallan en el Anexo 1.

Tabla 19. Parámetros de diseño del sedimentador

Parámetro	Expresado Como	Unidad	Valor
Caudal de diseño	Q	m ³ /día	24.27
Área superficial	A	m ²	0.76
Ancho del sedimentador	A	m	0.62
Largo del sedimentador	L	m	1.23
Altura del sedimentador	H	m	1.5
Volumen del sedimentador	V	m ³	1.14
Área de la sección transversal	At	m	0.92
Tiempo de retención hidráulica	T_{rh}	h	1.13
Porcentaje de remoción esperado para Sólidos suspendidos	R	%	48.38
Porcentaje de remoción esperado para DBO ₅	R	%	27.28

Martínez (2014) menciona, que el sedimentador debe colocarse antes del humedal artificial, con la finalidad de disminuir la concentración de sólidos suspendidos, que tenderían a acumularse en la zona de entrada del humedal y producirían atascamientos, malos olores y efectos negativos sobre las plantas. El tiempo de retención hidráulico calculado para el equipo es de 1.13 horas, tiempo que demoraría una partícula en recorrer la longitud del sedimentador en sentido horizontal desde el momento de su entrada al sistema. (Acán, 2011). En cuanto a la eficiencia, el sedimentador logra un porcentaje de remoción de la DBO₅ igual a un 27.8 % y de un 48.4% de sólidos suspendidos, valores que se encuentran dentro de los porcentajes de disminución que menciona Metcalf & Eddy (1995), de 50 – 70 % para sólidos suspendidos y de 25 – 40 % para la DBO₅, siempre que las consideraciones de diseño sean bien manejadas. Además, Villareal (2015), indica que la disminución de la DBO₅, se debe a que la mayor parte de los sólidos suspendidos decantados son materia orgánica. Se recomienda que el equipo se construya sobre la superficie de la tierra, para facilitar la evacuación de los lodos generados.

Los resultados del porcentaje de remoción de la DBO₅ (Demanda Bioquímica de Oxígenos) que alcanza el sedimentador, será considerado para el diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial.

3.5.2 Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial

Los datos y criterios de diseño para el dimensionamiento del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, en función del parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, es la DBO₅, al ser considerado uno de los indicadores más importantes en la contaminación del agua residual, ver Tabla 20.

Tabla 20. Datos y criterios de diseño para el dimensionamiento del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

Parámetro	Expresado como	Unidad	Valor
Caudal	Q	$m^3/día$	24.27
Porcentaje de remoción de la DBO ₅	R	%	32
Concentración inicial de DBO ₅	C_o	mg/L	145.72
Concentración final de DBO ₅	C_f	mg/L	100
Constante cinética corregida a 20 °C	k_{20}	-	0.98
Temperatura del agua residual	T	°C	18
Porosidad de la estructura del filtro	n	%	38
Pendiente hidráulica del humedal	m	%	1
Conductividad hidráulica ($m^3/m^2/d$)	k_s	$m^3/m^2/d$	9.750

De acuerdo a los criterios de diseño utilizados para el dimensionamiento del humedal artificial, los resultados de los parámetros de diseño se indican en la Tabla 21 y los respectivos cálculos se detallan en el Anexo 2.

Tabla 21. Parámetros de diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal

Parámetro	Expresado como	Unidad	Valor
Constante cinética	k_T	días ⁻¹	0.98

Área de superficial	A_s	m^2	34.97
Ancho del humedal artificial	W	m	4.21
Largo del humedal artificial	L	m	8.29
Profundidad del humedal	h	m	0.7
Volumen del humedal	V	m^3	24.48
Área transversal	A_c	m^2	2.95
Gradiente hidráulico	s	m/m	0.0008
Tiempo de retención hidráulico	T_{rh}	días	0.38
Pendiente hidráulica del humedal	m	%	1
Sustrato	-	-	Grava < 30 mm

Se seleccionó un humedal artificial de flujo “subsuperficial”, que según López (2018) explica, es el mejor sistema que disminuye significativamente los olores y evita la eclosión de mosquitos, debido a que el agua contaminada fluye debajo del material de soporte impidiendo que exista contacto directo entre el efluente y la atmósfera. En cuanto a la dirección del flujo de agua en los humedales de flujo “subsuperficial”, se seleccionó un humedal de flujo “horizontal”, por tener mayor facilidad de construcción y requerir de menor inversión, lo que le da mayor acceso de implementación en comparación con los humedales de flujo “vertical”, como lo explica Granados (2018). Respeto a la relación entre la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO), la relación DBO_5/DQO obtenida para el agua en el punto 1 (0.52), punto 2 (0.37) y punto 3 (0.69), se puede afirmar que los efluentes son de naturaleza biodegradable, es decir, la mayor cantidad de la DQO (materia orgánica e inorgánica) presente en el vertido se puede oxidar bioquímicamente (Bedoya et al, 2014). Es así, que el tratamiento secundario propuesto como el humedal artificial de flujo subsuperficial al ser considerado un reactor biológico (Delgadillo, 2010), permitirá mejorar la calidad del agua residual de la UISEK. Para el dimensionamiento del humedal artificial de flujo subsuperficial, el caudal de diseño utilizado, es la suma de los caudales de los tres puntos de muestreo igual a 0.28 L/s (24.2 m^3/h). Debido a que el diseño se basa en la disminución de la DBO_5 , la concentración inicial de este parámetro es el promedio calculado en los tres puntos

de muestreo, igual a 202.39 mg/L. Pero al considerar el porcentaje de remoción para la DBO₅ de un 32% aproximadamente que realiza el sedimentador primario, la Demanda Química de Oxígeno inicial para el diseño del humedal artificial es 145.72 mg/L. También, se establece que la concentración final de la DBO₅ es 100 mg/L, que es el límite máximo permisible establecido en la Norma técnica 002 para descargas a un cauce de agua en el Distrito Metropolitano de Quito. El diseño hidráulico del humedal artificial de flujo subsuperficial se llevó a cabo a partir del valor del área superficial (diseño biológico) igual a 34.97 m², cálculo que define el éxito del sistema de tratamiento, asegurando que el flujo se mantenga estable en todas partes, durante todo el período de funcionamiento del sistema (Vinueza, 2014). Es así que, para alcanzar la reducción deseada en la DBO₅, con una concentración final de 100 mg/L, el diseño hidráulico del humedal artificial tiene una profundidad de 0.7 m, ancho de 4.21 m y largo de 8.29 m, con tiempo de retención hidráulica de 0.38 días (9.12 horas). La relación de largo/ancho del humedal está en relación 2:1 con la finalidad de evitar problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales y la presencia de agua sobre el lecho de grava que afectan la eficiencia de remoción de los contaminantes. (Shiguango, 2014). En cuanto a la eficiencia de los porcentajes de remoción de los parámetros más estudiados en un HAFS (Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial), en un estudio investigativo realizado por Rabat (2016), se señala una disminución del 80-90 % para la DQO, de 90-95% para sólidos en suspensión, nitrógeno total de 20-40%, 20-30% para fósforo total y para coliformes fecales de 78.8%. De igual manera, considerando los resultados de la investigación de (Morales et al 2004), concluye que un HAFS logra una reducción de 75-95% para la DBO₅, para Nitrógeno total de 30-60 % y de 10-20% de fósforo total.

Consideraciones de construcción

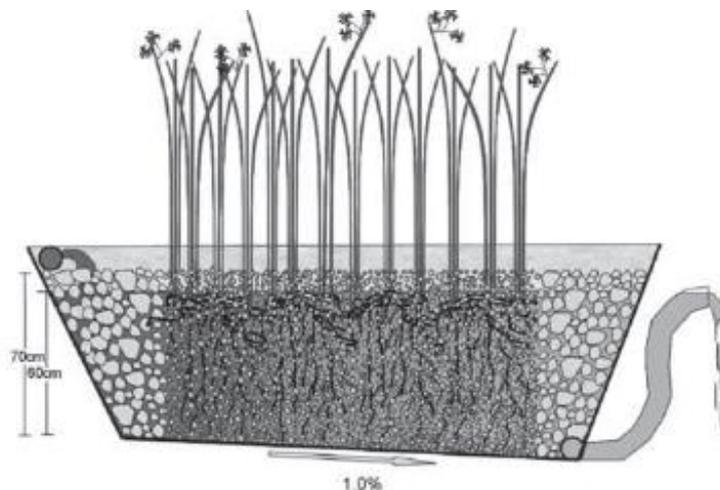
El flujo a través del HAFS debe superar la resistencia creada por la vegetación, capa de sedimentos, raíces de las plantas y sólidos acumulados. La energía necesaria para superar esta

resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema, para dar esta energía se le asigna al humedal de un fondo con una pendiente hidráulica (1%), suficiente para permitir un drenaje completo y una salida de altura variable con el nivel de agua. (Delgadillo, 2010)

a) Estructura de entrada y salida

Para garantizar la distribución uniforme del agua residual a través del HAFS, la estructura de entrada será constituida por una tubería perforada que atraviesa todo el ancho del humedal, con el objetivo de evitar olores y la proliferación de vectores, la tubería será enterrada en la grava. El sistema de salida del flujo del humedal es similar al de entrada, la tubería perforada en todo el ancho del humedal, con un sistema de control de flujo que permita mantener el nivel de agua en el lecho del humedal. (Pillajo, 2019). El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño que oscila entre 50 mm a 100 mm, como se observa en la siguiente Figura 5.

Figura 5. Humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal (HAFS)



b) Sustrato

De acuerdo con las consideraciones en las que se basa el diseño, el tipo de sustrato granular será grava (rocas del río) de diámetro menor a 30 mm que proporcione una porosidad de 0.38 % de acuerdo a las recomendaciones de la U.S EPA, debido a que grava con diámetros muy grandes originan que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en flujo turbulento. Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales. (López, 2018).

c) Impermeabilización

Para prevenir posibles filtraciones en las capas del suelo o en aguas subterráneas el presente diseño plantea la colocación de geomembrana de alta resistencia en la celda del humedal. (Vinuesa, 2014)

Selección de la especie vegetal (macrófitas)

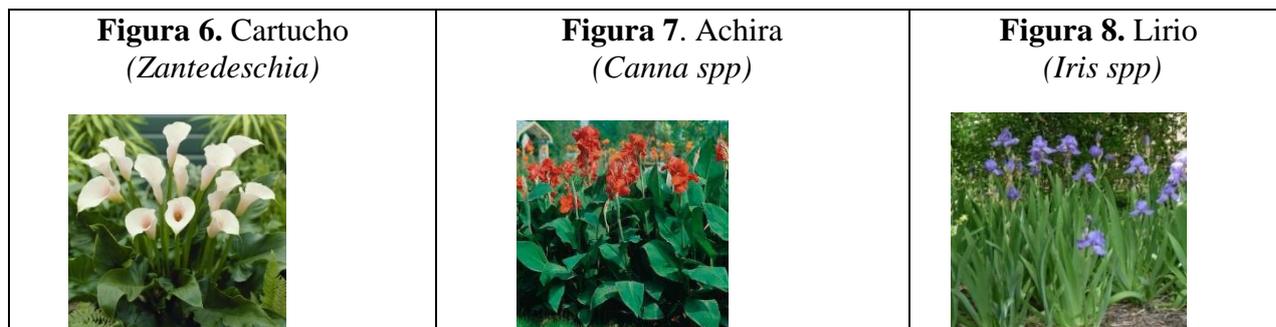
La Tabla 22 indica las características de tres macrófitas ornamentales (emergentes) seleccionadas como especie vegetal del HAFS: Cartucho (*Zantedeschia*), Achira (*Canna spp*) y Lirio (*Iris spp*). Dichas plantas poseen características propias de su especie, que son necesarias a considerar para su utilización en humedales artificiales. La altura máxima alcanzada por las macrófitas ornamentales, de entre 1,2 y 3 m, es inferior a la de las macrófitas comunes (carrizo, totora), que varían entre 3 y 5 m.

Respecto a la calidad del agua, las macrófitas ornamentales toleran bajas concentraciones de salinidad 0-0,5 ppt (partes por mil), en relación a las especies comúnmente utilizadas 0-20 ppt. (Morales, 2013).

Tabla 22. Caracterización de macrófitas comunes y ornamentales utilizadas en humedales construidos de flujo subsuperficial

Plantas Comunes		Características					
Nombre Científico	Nombre común	Método de propagación	Tasa de propagación (m/año)	Profundidad de implantación (cm)	Rango de salinidad (ppt)	Rango de Temperatura (°C)	Altura máxima (m)
<i>Phragmites spp</i>	Carrizo	Rizoma	Rápida	60-100	0-20	12-33	5
<i>Typha spp</i>	Totora	Rizoma	Muy rápida	30-40	0-0.5	10-30	3
<i>Schoenoplectus spp</i>	Junco	Rizoma	Moderada	70-80	0-5	16-27	3
Plantas ornamentales		Características					
<i>(Zantedeschia)</i>	Cartucho	Rizoma	Lenta	10-15		12-25	1.5
<i>Canna spp</i>	Achira	Rizoma	Rápida	20	0	10-25	3
<i>Iris spp</i>	Lirio	Rizoma	Lenta	15	0-0.5	10-20	1.2

De acuerdo a diferentes estudios revisados por Morales et al (2013), en su trabajo de investigación: “*Humedales construidos con Plantas Ornamentales para el Tratamiento de materia orgánica y nutrientes contenidos en Aguas Servidas*”, se concluye que es posible sustituir las macrófitas comunes como: carrizo (*Phragmites spp*), totora (*Typha spp*) y junco (*Schoenoplectus spp*) por macrófitas ornamentales como el cartucho (*Zantedeschia*), achira (*Canna spp*) y lirio (*Iris spp*), en humedales artificiales de flujo subsuperficial, logrando porcentajes de remoción de 86 % para DBO₅ y 80% de nutrientes (Nitrógeno Total y Fósforo total). Por lo tanto, además de lograr porcentajes de remoción requeridos para cumplir con los límites máximos permisibles de acuerdo a la Norma 002, estas macrófitas proporciona como principal valor, mejoramiento estético del entorno. Las tres macrófitas ornamentales son cultivadas en la región sierra del Ecuador, por su fácil adaptación.



4. Costos de Implementación

Los costos de implementación del humedal artificial de flujo subsuperficial en las instalaciones de la Universidad Internacional SEK, se detallan en la Tabla 23.

Tabla 23. Costos de Implementación del Humedal artificial de flujo subsuperficial

Material	Unidad	Cantidad	Precio Unitario \$	Costo Total \$
Retroexcavadora, desalojo de materiales, nivel y perfilado	m ³	30	20	600
Material impermeabilizante	m ²	60	12	720
Arena fina	m ³	4	10	40
Grava diámetro 30 mm	m ³	21	12	252
Grava gruesa diámetro 100 mm	m ³	3	8	24
Tubería PVC (3 pulg)	m	20	6.60	132
Codos PVC 90° (3 pulg)	-	8	2.37	18.9
Reducción de 4 pulg a 3 pulg	-	4	2.50	10
Tapón PVC 75 mm	-	2	1.25	2.5
Tapón PVC 110 mm	-	1	1.85	1.85
Te PVC desagüe 75mm	-	4	3.25	13
Pega tubos PVC 125cc	-	1	2.66	2.66
Rejilla de desagüe 110mm	-	2	1.82	3.64
Macrófita: achira	-	210	3.50	735
Sedimentador primario	m ³	1.14	1	250
Mano de obra				
Obreros (2)				
<ul style="list-style-type: none"> • Colocar geomembrana • Colocar grava de diferente tamaño • Plantar las macrófitas ornamentales 	día	15	30	900
Total				\$3705.61

CONCLUSIONES

- La calidad del agua residual de la UISEK analizada mediante el programa IQA DATA se encuentran en categoría de “MUY MALA”, con valor de 19.07 en el punto 1 (Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO), seguido por las descargas del punto 3 y punto 2, con valores de 19.57 y 22.27, respectivamente.
- Los parámetros que no cumplen los límites máximos permisibles para descargas a un cauce de agua que estable la Norma ambiental 002 para el Distrito Metropolitano de Quito, en los tres puntos de muestreo analizados fueron: DBO₅, DQO, Coliformes fecales y Nitrógeno total, mientras que los parámetros que están dentro de Norma fueron pH, temperatura y SAAM (sustancias activas al azul de metileno).
- La relación DBO₅/DQO obtenida para el agua en el punto 1 (0.52), punto 2 (0.37) y punto 3 (0.69), nos permiten afirmar que los efluentes son de naturaleza biodegradable, es decir que existirá una buena remoción de los contaminantes de naturaleza orgánica mediante los humedales artificiales.
- El diseño del sedimentador primario tiene 1.23 m de largo, 0.62 m de ancho, 1.5 m de profundidad y volumen de 1.14 m³, para tratar un caudal de 24.27 m³/día generados en la UISEK.
- En cuanto a la eficiencia, el sedimentador primario logra un porcentaje de remoción de la DBO₅ igual a un 27.8% y de un 48.4% para sólidos suspendidos.
- El diseño del humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal requerido para alcanzar la reducción deseada en la DBO₅, con concentración final de 100 mg/L tiene 4.21 m de ancho, 8.29 m de largo y 0.7 m de altura, con volumen de 24.48 m³.

- Se estima que el Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial permita disminuir 86 % para DBO₅, 80-90 % para DQO, 90-95% para sólidos en suspensión, 78.8% para coliformes fecales y 80 % para nitrógeno total y fósforo total.
- La eficiencia del humedal artificial se garantiza con la instalación previa de un sedimentador primario, con la finalidad de disminuir la concentración de los sólidos que tenderían a acumularse en la zona de entrada del humedal y producirían atascamientos, malos olores y efectos negativos sobre las plantas.
- Las macrófitas ornamentales seleccionadas como especie vegetal del humedal artificial son: Cartucho (*Zantedeschia*), Achira (*Canna spp*) y Lirio (*Iris spp*), especies con alta eficiencia en la remoción de contaminantes al igual que las macrófitas comúnmente utilizadas.
- El costo total de la implementación del humedal artificial de flujo subsuperficial para tratar los efluentes generados por la UISEK es \$3705.61, constituyéndose una tecnología natural con alta eficiencia.
- Un humedal artificial de flujo subsuperficial en buenas condiciones de operación y mantenimiento adecuado resulta ser en sí un tratamiento fitodepurador de alta eficiencia en términos de remoción de materia orgánica y nutrientes.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda la implementación de un humedal artificial para mejorar la calidad del agua residual de la UISEK de una manera económica y ambientalmente responsable.
- Realizar las podas de las macrófitas del humedal artificial, de acuerdo al ciclo de crecimiento, procurando retirar todas las plantas secas y que se encuentren en mal estado.
- Con el objeto de permitir un adecuado muestreo del efluente tratado, se recomienda instalar un punto de monitoreo al ingreso y final del humedal artificial.
- Se recomienda extraer las basuras que se acumulan en las estructuras de entrada y salidas, así como sacar la maleza y hojarasca dentro del lecho del humedal, para que el agua fluya de manera normal y evitar disminuir la eficiencia de remoción del sistema.
- El problema más frecuente de los sistemas de humedales artificiales de flujo subsuperficial son los cortocircuitos (zonas muertas en el humedal donde el agua pasa sin tratamiento), por lo que se recomienda inspeccionar de manera visual el área del humedal para verificar que no exista líquido en la superficie, de ser ese el caso se deberá suspender el flujo en esa celda y bombear agua a presión buscando restablecer el flujo laminar uniforme en la celda.
- Realizar a escala piloto un estudio de la eficiencia de remoción de las macrófitas ornamentales (cartucho, achira y lirio) seleccionadas como especies vegetales del humedal artificial, con respecto a detergentes, aceites y grasas.
- Se recomienda colocar una capa de 5 a 10 cm de arena, antes de comenzar con el llenado de grava del humedal, para proteger a la geomembrana de pinchazos y cortaduras durante la colocación de grava.

BIBLIOGRAFÍA

Rodríguez, C. Díaz, M. (1992). *Acción depuradora de algunas plantas acuáticas sobre las aguas residuales*. Centro de Investigaciones Hidráulicas. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría. Ciudad Habana Cuba.

Celi, José. Junod, Julio. Sandoval, Marco. (2005). *Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas*. Revista Theoria. Volumen 14 (1): 17-25.

González, J. (2009). *Manual de Fito Depuración filtros de macrófitas en flotación*. Universidad Politécnica de Madrid. Proyecto LIFE. Editorial Fundación Global Nature

Martelo, J. Lara, Jaime. (2012). *Macrófitas flotantes en el tratamiento de aguas residuales: una revisión del estado del arte*. Ingeniería y Ciencia. ISSN 2794-9165. Volumen 8, número 15. Enero-junio. Páginas 221-243.

Barreto Sáenz, P. (2010). *Protocolo de monitoreo de la calidad del agua*. Recuperado de https://biorem.univie.ac.at/fileadmin/user_upload/p_biorem/education/research/protocols/Protocolo_Agua.pdf

Espinosa, Camilo. (2014). *Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Maestría en Ingeniería Civil. Bogotá D.C

Llagas, Wilmer., Gómez, Enrique. (2006). *Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en el UNMSM*. Revista del Instituto de investigaciones FIGMMG. Vol. 1, N°17, 85-96

Delgadillo, Oscar., Camacho, Alan., Pérez, Luis., Andrade, Mauricio. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Centro Andino para la gestión y uso del agua (CENTRO AGUA). Cochabamba, Bolivia.

Shiguango, Nelson. (2014). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales para el centro poblado de la Parroquia Tiptuni del Cantón Aguarico en la Provincia de Orellana*. Tesis de grado para la obtención del título de Ingeniero en Biotecnología Ambiental. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias Químicas. Riobamba-Ecuador.

Lovato, Geovanna. (2018). *Diseño de jardín depurador piloto para tratamiento de aguas residuales en la Hostería Garceta-Sol*. Trabajo de titulación para la obtención del título de Ingeniera Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Facultad en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental. Quito-Ecuador

Chauca, Julia. (2017). *Remoción de coliformes totales, fecales y DBO5 empleando el humedal de flujo vertical con la especie Equisetum Bogotense (cola de caballo), a escala piloto, en Tuyu Ruri-Marcara*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Sanitaria. Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo". Facultad de Ciencias del Ambiente. Huaraz-Ancash-Perú.

Estrada, Islena. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Documento presentado como

requisito para optar el título de Tecnóloga Química. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Escuela de química. Pereira.

Gualoto, Ángel. (2010). *“Tratamiento Biológico Combinado Con Filtración en Tamices Moleculares, de Aguas Contaminadas con Hidrocarburos, Afectadas por el Derrame de la Línea de Flujo Del Pozo Shushuqui 13, Cantón Lago Agrio, Provincia De Sucumbíos, Ecuador.”* Trabajo de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y Remediación. Universidad de las Américas. Facultad De Ingeniería y Ciencias Agropecuarias. Quito-Ecuador.

Vinueza, Juan. (2014). *“Diseño de un Sistema De Pantanos Artificiales para el tratamiento de Aguas negras y grises del Campo Base y Área de Mantenimiento el Coca de La Empresa Triboilgas”*. Tesis de grado para obtener el Título de Ingeniero Ambiental. Universidad Central del Ecuador. Carrera de Ingeniería Ambiental. Quito-Ecuador.

Forero, Andrés., Urrego, Cristian., (2016). *Modelamiento de un Humedal Artificial para el Tratamiento de Aguas Residuales del Barrio Fontanar de Suba*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Católica de Colombia Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Civil. Bogotá D.C

Martínez, Pedro. (2014). *Evaluación y Diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas*. Tesis Doctoral. Universidad de Murcia. Facultad de Química. Murcia-España.

Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales Tratamiento Vertido y Reutilización*. 3ª. ed., Madrid – España., McGraw – Hill Interamericana.

Granados, Mildred. (2018). *Estudio de Factibilidad de la Implementación de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales en Ecosistema de Alta Montaña en Toquilla*. Trabajo de grado. Universidad Libre. Departamento de Postgrados. Colombia.

United States Enviromental Protection Agency. (1993) *Guía para el diseño y construcción de un humedal construido con flujo subsuperficial*. Washington, D.C: Autor.

Crites, R., et al. (2000). *Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones.*, s. ed., Bogotá – Colombia., McGraw – Hill Interamericana.

Orozco, Carmen. et al. (2011). *Contaminación Ambiental. Una visión desde la química*. Editorial Thomson. Paraninfo S.A. Madrid-España.

Acán, Ángel. (2011). *Diseño de un sistema de tratamiento para la disminución de sólidos en el sistema de riego Chambo Guano sector Langos Panamericana La Capilla*. Tesis de grado para la obtención del título de Ingeniero Químico. Escuela Politécnica del Chimborazo. Riobamba-Ecuador.

Villareal, William. (2015). *Diseño para la implementación del sistema de Tratamiento de Aguas Residuales en el Estadio de la Universidad Técnica del Norte, Cantón Ibarra Provincia Imbabura*. Tesis de Grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador.

López, Leonardo. (2018). *Diseño y construcción de un prototipo de humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas domésticas*. Tesis de grado para optar por el título

de Ingeniero Civil Ambiental. Universidad Técnica Federico Santa María. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Valparaíso-Chile.

Reed, S.; Crites, R. & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*.

Pillajo, Roberto. (2017). *Propuesta de Diseño para el tratamiento de las descargas líquidas generadas en El Complejo Turístico Termales Jamanco*. Trabajo de Titulación presentado como requisito para optar por el Título de Ingeniero Ambiental Grado Académico de Tercer Nivel. Universidad Central del Ecuador. Carrera de Ingeniería Ambiental. Quito-Ecuador.

Sánchez, Rodrigo. (2011). *Evaluación del humedal artificial de la hostería Cuicocha, utilizado para el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Proyecto previo a la obtención de Título de Ingeniero Ambiental. Escuela Politécnica Nacional. Quito-Ecuador

Espinoza, Mónica., Lucero, Ana María. (2009). *Estudio de Eichhornia crassipes, Lemma gibba y Azolla filiculoides en el Tratamiento Biológico de aguas residuales domésticas en sistemas comunitarios y unifamiliares del Cantón Cotacachi*. Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en Recursos Renovables. Universidad Técnica del Norte. Ibarra-Ecuador.

Coronel, Bach. (2016). *Eficiencia del Jacinto de Agua (Eichhornia crassipes) y Lenteja de agua (Lemma gibba) en el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez Mendoza de Amazonas*. Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental. Chachapoyas-Perú.

Bajaña, Lenin. (2018). *Calibración del Índice de Calidad del Agua (ICA) para la Cuenca Hidrográfica del Río Paute, Región Sur Interandina del Ecuador, basado en el Acuerdo Ministerial 097-A/2015 del Ministerio del Ambiente (MAE)*. Tesis de grado para la obtención del título de Magister en Gestión Ambiental. Universidad Internacional SEK. Quito-Ecuador

Bustos, Inés. (2012). *“Diseño del Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales de las etapas Ribera y Curtido para la Tenería San José”*. Tesis de Grado Previo a la obtención del Título de Ingeniero Químico. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad De Ciencias. Escuela de Ingeniería Química. Riobamba-Ecuador.

EPA, United States Environmental Protection Agency. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial. Washington D.C. EPA 832-F-00-024.

Vargas, Antonio. (1995). *Estadísticas Descriptiva e Inferencial*. Universidad de Castilla-La Mancha. Editorial: COMPOBELL, S.L. Murcia

Morales, Gabriela et al (2013). *Humedales construidos con plantas Ornamentales para el Tratamiento de Materia Orgánica y Nutrientes contenidos en Aguas Servidas*. Grupo de Ingeniería y Biotecnología Ambiental, Centro de Ciencias Ambientales EULA. Universidad de Concepción, Casilla 160-C, Concepción. Artículo. Theoria, Vol.22 (1):33-46.2013. Chile

Rabat, Jorge. Trapote, Arturo. (2016). *Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración*. Escuela Politécnica Superior. Máster Universitario en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua. España

Bedoya et al, (2014). *Evaluación de un humedal artificial de flujo subsuperficial en el tratamiento de las aguas residuales generadas en la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Colombia*. Rev. Int. Contam.Ambie.30 (3= 275-283. Grupo de Investigación en Biociencias (GIB), Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Grupo de Investigación en Química Básica y Aplicada (QUIBA). Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. Antioquia-Colombia.

ANEXOS A

DISEÑO DEL SEDIMENTADOR PRIMARIO

Carga superficial

La carga superficial expresa la velocidad de sedimentación teórica a partir de la cual las partículas serán removidas por la estructura, por tanto, la capacidad de sedimentación es independiente de la profundidad y del periodo de permanencia de la partícula. (Maroto, 2013).

$$C_s = \frac{Q}{A_s}$$

Donde:

C_s = Carga superficial ($m^3/m*d$)

A_s = Área superficial del sedimentador (m^2)

Q = Caudal de diseño ($m^3/día$)

$$A_s = \frac{24,27 \frac{m^3}{día}}{32 \frac{m^3}{m^2 * día}}$$
$$A_s = 0.75 m^2$$

Se usa una relación 1:2 de ancho: largo para el cálculo de las medidas del sedimentador primario, mediante la siguiente ecuación:

$$A_s = L * a$$

A = Área superficial del sedimentador (m^2)

L = Largo del sedimentador (m)

a = Ancho del sedimentador

$$A_s = 2a * a$$

$$A_s = 2a^2$$

Ancho del sedimentador

$$a = \sqrt{\frac{A_s}{2}}$$
$$a = \sqrt{\frac{0,75 \text{ m}^2}{2}}$$
$$a = 0.62 \text{ m}$$

Largo del sedimentador

$$L = 2 * a$$
$$L = 2 * (0.62 \text{ m})$$
$$L = 1.23 \text{ m}$$

Volumen del sedimentador

$$V = L * a * h$$

V = Volumen del sedimentador (m³)

L = Largo del sedimentador (m)

a = Ancho del sedimentador (m)

h = Altura del sedimentador (m)

$$V = 1.23 \text{ m} * 0.62 \text{ m} * 1.5 \text{ m}$$

$$V = 1.14 \text{ m}^3$$

Tiempo de retención hidráulico

$$T_{rh} = \frac{V}{Q}$$

T_{rh} = Tiempo de retención hidráulico (h)

Q = Caudal de diseño (m³/h)

V = Volumen del sedimentador (m³)

$$T_{rh} = \frac{1.14 \text{ m}^3}{1.01 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$T_{rh} = 1.12 \text{ h}$$

Área de la sección transversal

$$A_t = \frac{V}{L}$$

A_t = Área de la sección transversal (m^2)

V = Volumen del sedimentador (m^3)

L = Largo del sedimentador (m)

$$A_t = \frac{1.13 \text{ m}^3}{1.23 \text{ m}}$$

$$A_t = 0,92 \text{ m}^2$$

Remoción de sólidos suspendidos y DBO₅

La eficiencia de remoción de DBO₅ y sólidos suspendidos, está en función de la concentración del afluente y del tiempo de retención

$$R = \frac{T_{rh}}{a + b * T_{rh}}$$

Donde:

R = Porcentaje de remoción esperado (%)

T_{rh} = Tiempo de retención hidráulico (h)

a = Constante empírica

b = Constante empírica

$$R_{DBO5} = \frac{1.12 \text{ h}}{0.018 + 0.02 * 1.12 \text{ h}}$$

$$R_{DBO5} = 27.8 \%$$

$$R_{SS} = \frac{1.12 \text{ h}}{0.0075 + 0.014 * 1.12 \text{ h}}$$

$$R_{SS} = 48.4 \%$$

ANEXO B

DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Caudal de diseño

Punto 1: 0.23 L/s

Punto 2: 0.031 L/s

Punto 3: 0.02 L/s

$$Q = 0.281 \frac{L}{s} = 24.27 \frac{m^3}{día}$$

Área superficial

$$k_T = k_{20} * 1.06^{T_2-20}$$
$$k_T = 1.104 * 1.06^{18-20}$$
$$k_T = 0.982/día$$

Donde:

k_T = constante cinética (días⁻¹)

k_{20} = constante cinética corregida a 20 °C

T_2 = Temperatura del agua 18 (° C)

$$A_s = \frac{Q * [\ln \frac{C_o}{C_e}]}{k_T * h * n}$$
$$A_s = \frac{24.27 \frac{m^3}{día} * [\ln \frac{145.72 \frac{mg}{l}}{100 \frac{mg}{l}}]}{0.982 \text{ día}^{-1} * 0.7 \text{ m} * 0.38}$$
$$A_s = 34.97 \text{ m}^2$$

Donde:

A_s = área de superficie del humedal de flujo subsuperficial (m²)

Q = caudal de diseño

C_e = Concentración final de DBO5

C_o = Concentración inicial de DBO5

n =porosidad de la estructura del filtro 38 (%)

h = profundidad promedio del agua en el humedal artificial 0.7 (m)

k_T = Constante cinética

Tiempo de retención:

$$t = \frac{n * h * A_s}{Q}$$

$$t = \frac{0.38 * 0.7 \text{ m} * 34.97 \text{ m}^2}{24.27 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}$$

$$t = 0.38 \text{ días}$$

t = Tiempo de retención (días)

n = porosidad de la estructura del filtro 38 (%)

h = profundidad promedio del agua en el humedal artificial 0.7 (m)

A_s = área de superficie del humedal de flujo subsuperficial (m²)

Q = flujo de entrada (m³/día)

Ancho del humedal artificial

$$W = \frac{1}{h} * \left(\frac{Q * A_s}{m * k_s} \right)^{0.5}$$

$$W = \frac{1}{0.7 \text{ m}} * \left(\frac{24,27 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 34.97 \text{ m}^2}{0.01 * 9750.4 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} \right)^{0.5}$$

Donde:

W = ancho del humedal artificial (m)

Q = caudal de entrada (m³/día)

A_s = área de superficie del humedal artificial de flujo subsuperficial (m²)

h = profundidad del humedal artificial (m)

m = pendiente, recomendado 1%

k_s = conductividad hidráulica (m³/m²/d)

Largo del humedal artificial

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

$$L = \frac{34.97 \text{ m}^2}{4.21 \text{ m}}$$

$$L = 7.64 \text{ m}$$

L = Largo del humedal artificial

A_s = área de superficie del humedal artificial de flujo subsuperficial (m²)

W = Ancho del humedal artificial

Área transversal del humedal

$$A_c = W * h$$

$$A_c = 4.21 \text{ m} * 0.7 \text{ m}$$

$$A_c = 2.95 \text{ m}^2$$

Gradiente hidráulico

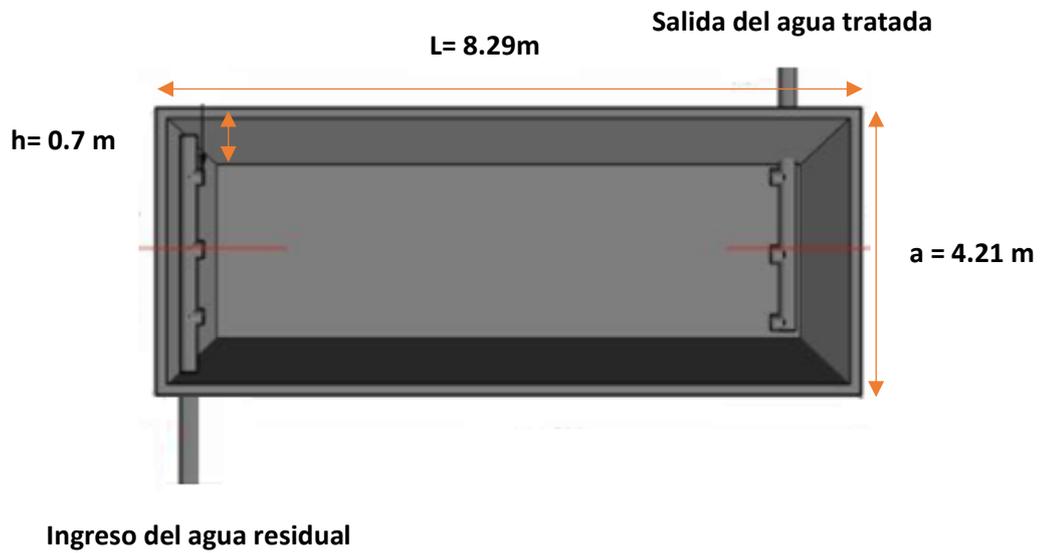
$$s = \frac{m * h}{L}$$

$$s = \frac{0.01 * 0.7 \text{ m}}{8.29 \text{ m}}$$

$$s = 0.0008 \text{ m/m}$$

ANEXO C
HUMEDAL ARTIFICIAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Figura 9. Dimensiones del humedal artificial de flujo subsuperficial



ANEXO D
NORMA TÉCNICA 002

Tabla 23. Límites máximos permisibles para descargas a un cauce de agua

PARÁMETROS	EXPRESADO COMO	UNIDAD	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE	
			Alcantarillado	Cauce de agua
Aceites y grasas	A y G	mg/l	70	30
Explosivos e inflamables	Sustancias	mg/l	Cero	
Alquil Mercurio		mg/l	No detectable	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1	0,1
Bario	Ba	mg/l		2,0
Boro	B	mg/l		2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02	0,02
Cianuro Total	CN	mg/l	1,0	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1	0,1
Cloruros	Cl	mg/l		1000
Cobre	Cu	mg/l	1,0	1,0
Cobalto Total	Co	mg/l	0,5	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml		Remoción>al 99,9%
Color real	Color real	Unidades Pt-Co		*Inapreciable en dilución:1/20
Compuestos fenólicos	Expresado como fenol	mg/l	0,2	0,2
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	170	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	350	160
Dicloroetileno	Expresada como Dicloroetileno	mg/l	1,0	
Estaño	Sn	mg/l		5,0
Fluoruros	F	mg/l		5,0
Fósforo Total	P	mg/l	15	10
Hierro	Fe	mg/l	25	10
Hidrocarburos Totales	TPH	mg/l	20	10
Materia flotante	Visible	-	Ausencia	Ausencia
Manganeso	Mn	mg/l	10,0	2,0
Mercurio (total)	Hg	mg/l	0,01	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l		30
Nitrógeno Total	N	mg/l	60,0	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados Totales	mg/l	0,05	0,05
Organofosforados	Especies Totales	mg/l	0,1	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,5	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,5	0,2
Potencial de hidrógeno***	pH	---	6-9	6-9
Selenio	Se	mg/l	0,5	0,1
Sulfuros	S	mg/l	1,0	0,5
Sólidos Suspendidos	SS	mg/l	100	80
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	120	100
Sólidos Totales	ST	mg/l	1200	1200
Sólidos Sedimentables	SSE	ml /l	20,0	

ANEXO F
MUESTREO Y ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DEL AGUA RESIDUAL DE LA UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Figura 10. Punto de muestreo 1 (Facultad de Administración, Edificio Central Administrativo, Facultad de SSO)



Figura 11. Punto de muestreo 2 (Facultad de Ciencias Ambientales)



Figura 12. Punto de muestreo 3 (Facultad de Mecánica)



Figura 13. Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅)



Figura 14. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)



Figura 15. Determinación de aceites y grasas



Figura 15. Determinación de nitrógeno total



Figura 16. Determinación de sólidos suspendidos



Figura 17. Determinación de detergentes



Figura 18. Determinación de coliformes fecales



Figura 19. Determinación de pH, oxígeno disuelto



