



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas  
Wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes.**

**AUTOR:**

**Gamarra Margary, Carlos Andree**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIERO CIVIL**

**TUTORA:**

**Ing. Glas Cevallos, Clara Catalina**

**Guayaquil, Ecuador**

**20 de septiembre de 2021**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERIA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Gamarra Margary, Carlos Andree**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero Civil**.

### **TUTORA (A)**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Clara Glas Cevallos, M.Sc.**

### **DIRECTOR DE LA CARRERA**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, M.Sc.**

**Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2021**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Gamarra Margary, Carlos Andree**

**DECLARO QUE:**

El Trabajo de Titulación, **Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2021**

**EL AUTOR**

f. \_\_\_\_\_

**Gamarra Margary, Carlos Andree**



UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

## **AUTORIZACIÓN**

Yo, **Gamarra Margary, Carlos Andree**

Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes** previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

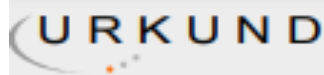
**Guayaquil, a los 20 del mes de septiembre del año 2021**

**EL AUTOR:**

f. \_\_\_\_\_

**Gamarra Margary, Carlos Andree**

## REPORTE URKUND



### Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** GAMARRA\_CARLOS FINAL.docx (D112904015)  
**Submitted:** 9/19/2021 1:57:00 PM  
**Submitted By:** clara.glas@cu.ucsg.edu.ec  
**Significance:** 7 %

#### Sources included in the report:

capitulo1,2.3 01062018.docx (D39926847)  
TESIS ZAIDA.docx (D48446284)  
tesis corregida (2).docx (D37642163)  
PROPUESTA DE HUMEDAL ARTIFICIAL CON VEGETACIÓN HERBÁCEA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE SE ORIGINARÁN POR LA ACTIVIDAD GANADERA EN EL CENTRO DE INVESTIGACIÓN, POSGRADO Y CONSERVACIÓN AMAZÓNICA, CIPCA..docx (D54479833)  
Articulo\_cientifico\_PadrónPalaciosPriscila final.pdf (D32732235)  
Torres\_E\_TESIS.docx (D110441542)  
TESIS ING.CIVILES MES DE NOVIEMBRE REVISION TUTOR ING.PAREDES SIN CONTRASEÑA.docx (D44243495)  
<https://slideplayer.com/slide/9168648/>  
<https://docplayer.es/144706173-Construccion-de-un-humedal-artificial-a-nivel-de-laboratorio-vivo-en-el-predio-mi-ranchito-en-la-vereda-olarte-localidad-usme-bogota.html>  
<https://docplayer.es/7281719-Depuracion-de-aguas-residuales-de-una-poblacion-mediante-humedales-artificiales-pag-1.html>  
[https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/9A13ABA4E16D102F05258175006A9AD1/%2524FILE/1\\_\\_15.247647s.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13ABA4E16D102F05258175006A9AD1/%2524FILE/1__15.247647s.pdf)  
<https://rei.iteso.mx/bitstream/11117/3580/4/Tecnolog%C3%ADas%20sustentables%20y%20estrategias%20de%20dise%C3%B1o%20para%20adecuaci%C3%B3n%20de%20vivienda%20rural%20en%20Benito%20Ju%C3%A1rez%20Tepic.pdf>  
[https://www.researchgate.net/profile/Jaime\\_Lara-Borrero/publication/325722763\\_Humedales\\_de\\_tratamiento\\_alternativa\\_de\\_tratamiento\\_de\\_aguas\\_residuales\\_aplicable\\_en\\_America\\_Latina/links/Sb202e7ea6fdcc69745cf775/Humedales-de-tratamiento-alternativa-de-tratamiento-de-aguas-residuales-aplicable-en-America-Latina.pdf%3Forigin%3Dpublication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Jaime_Lara-Borrero/publication/325722763_Humedales_de_tratamiento_alternativa_de_tratamiento_de_aguas_residuales_aplicable_en_America_Latina/links/Sb202e7ea6fdcc69745cf775/Humedales-de-tratamiento-alternativa-de-tratamiento-de-aguas-residuales-aplicable-en-America-Latina.pdf%3Forigin%3Dpublication_detail)  
<https://iwaponline.com/ebooks/book-pdf/865507/wio9781789062342.pdf>  
[https://sswm.info/sites/default/files/reference\\_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Humedales%20Artificiales%2030.pdf](https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/CONAGUA%202015.%20Manual%20Humedales%20Artificiales%2030.pdf)  
<https://core.ac.uk/download/pdf/71396135.pdf>  
<https://docplayer.es/58296559-Universidad-de-murcia.html>

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de culminar mis estudios. A mis Padres, a mis hermanas por el apoyo brindado en cada una de las etapas de la vida que representaron la ilusión de nunca rendirse y siempre aspirar a ser una mejor persona.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo está dedicado a mis padres Carlos y Mayra quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía y el temor a Dios.

A mis hermanas por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Dios, patria y libertad.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, M.Sc**  
DIRECTOR DE CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Melida Camacho Monar, M.Sc.**  
DOCENTE DE LA CARRERA

f. \_\_\_\_\_

**Ing. Plaza Vera, Fernando Javier, PhD**  
OPONENTE



# ÍNDICE

|   |       |
|---|-------|
| RESUMEN.....  | XVIII |
| ABSTRACT .....  | XIX   |
| INTRODUCCIÓN.....   | 2     |
| CAPÍTULO I – PLANTEAMIENTO INVESTIGATIVO .....                            | 4     |
| 1.1 Antecedentes. ....  | 4     |
| 1.2 Objetivos .....   | 4     |
| 1.2.1 Objetivo General.....   | 4     |
| 1.2.2 Objetivo Específico .....   | 5     |
| 1.2.3 Metodología .....   | 5     |
| CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO .....   | 8     |
| 2.1 Aguas Residuales.....   | 8     |
| 2.2 Clasificación de aguas residuales. ....                               | 9     |
| 2.2.1 Aguas residuales de origen doméstico. ....                          | 9     |
| 2.2.2 Aguas residuales provenientes de actividades agroindustriales. .... | 9     |
| 2.2.3 Aguas residuales provenientes de actividades industriales. ....     | 10    |
| 2.2.4 Aguas residuales de escorrentías.....                               | 10    |
| 2.3 Parámetros de las aguas residuales. ....                              | 10    |
| 2.3.1 Parámetros físicos. ....  | 10    |
| 2.3.2 Características químicas.....                                       | 11    |
| 2.3.3 Características Microbiológicas .....                               | 16    |
| 2.4 Tratamiento de aguas residuales. ....                                 | 17    |
| 2.4.1 Tipos de tratamientos .....   | 18    |
| 2.5 Niveles de tratamiento de aguas residuales.....                       | 19    |
| 2.5.1 Nivel Preliminar.....   | 19    |
| 2.5.2 Nivel Primario.....   | 19    |
| 2.5.3 Nivel Secundario.....   | 20    |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 2.5.4  | Nivel Terciario.....  | 20 |
| 2.6  | Sistemas convencionales de aguas residuales.....  | 21 |
| 2.7  | Sistemas no convencionales de aguas residuales.....   | 22 |
| 2.7.1  | Humedales artificiales.....   | 23 |
| 2.7.2  | Tipos de Humedales artificiales o Wetlands en AARR.....   | 24 |
| 2.7.3  | Uso de humedales artificiales o Wetlands.....   | 28 |
| 2.7.4  | Ventajas y desventajas de humedales artificiales como soluciones alternativas de tratamiento de AARR..... | 29 |
| 2.7.5  | Funcionamiento de los sistemas de humedales artificiales.....   | 30 |
| 2.7.6  | Eficiencia de remoción de contaminantes del humedal artificial.....                                       | 32 |
| CAPÍTULO III – ASPECTOS TÉCNICOS BÁSICOS DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL CON CAÑA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNHT..... |   |    |
|  |   | 34 |
| 3.1  | Generalidades hidráulicas.....  | 34 |
| 3.1.1  | Balance hídrico.....  | 34 |
| 3.1.2  | Tiempo de retención hidráulico (TRH).....   | 36 |
| 3.1.3  | Evapotranspiración (ET).....  | 37 |
| 3.1.4  | Precipitación (P).....  | 38 |
| 3.1.5  | Infiltración (I).....   | 38 |
| 3.1.6  | Temperatura (T).....  | 39 |
| 3.1.7  | Sustrato.....   | 40 |
| 3.2  | Mecanismos de depuración de aguas residuales.....   | 41 |
| 3.2.1  | Remoción de materia orgánica.....   | 41 |
| 3.2.2  | Remoción de sólidos suspendidos.....  | 42 |
| 3.2.3  | Remoción de nitrógeno.....  | 42 |
| 3.2.4  | Remoción de fósforo.....  | 43 |
| 3.2.5  | Remoción de agentes patógenos.....  | 44 |
| 3.3  | Aspectos físicos.....   | 45 |

|  |   |    |
|--|---|----|
| 3.3.1  | Profundidad.....  | 45 |
| 3.3.2  | Pendiente.....  | 45 |
| 3.3.3  | Material filtrante .....  | 46 |
| 3.3.4  | Capa impermeabilizante del lecho o sellado.....   | 46 |
| 3.3.5  | Afluentes y Efluentes del humedal artificial.....   | 47 |
| 3.3.6  | Geometría.....  | 48 |
| 3.3.7  | Biomasa en el humedal artificial. ....  | 49 |
| 3.3.8  | Respuesta de los fertilizantes. ....  | 50 |
| 3.4  | Tipos de plantas utilizadas en los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal..... | 50 |
| 3.4.1  | Plantas sumergidas. ....  | 51 |
| 3.4.2  | Plantas flotantes .....   | 51 |
| 3.4.3  | Plantas emergentes. ....  | 52 |
| 3.5  | Características de la caña guadua angustifolia. ....  | 53 |
| 3.5.1  | Morfología.....   | 54 |
| 3.5.2  | Ciclo de vida de la Guadua.....   | 55 |
| 3.5.3  | Propiedades físicas de la Guadua. ....  | 55 |
| CAPÍTULO IV – ASPECTOS DE DISEÑO PARA LA PTAR PARA POBLACIONES MENORES DE 1000 HAB. .... |   | 58 |
| 4.1  | Definir variables.....  | 58 |
| 4.2  | Datos hidrológicos y climatológicos.....  | 58 |
| 4.3  | Mecanismos de depuración.....   | 58 |
| 4.4  | Aspectos técnicos.....  | 59 |
| 4.4.1  | Población futura.....   | 59 |
| 4.4.2  | Caudales.....   | 59 |
| 4.4.3  | Precipitación .....   | 61 |
| 4.4.4  | Evapotranspiración .....  | 62 |
| 4.4.5  | Canal de llegada .....  | 63 |

|   |   |    |
|---|---|----|
| 4.4.6   | Rejilla .....   | 64 |
| 4.4.7   | Tanque Séptico.....   | 66 |
| 4.4.8   | Humedal Artificial subsuperficial de flujo horizontal. ....                     | 68 |
| CAPÍTULO V – DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....                           |   | 75 |
| 5.1.1   | Caudal de diseño .....  | 76 |
| 5.1.2   | Canal de llegada.....   | 77 |
| 5.1.3   | Rejilla .....   | 77 |
| 5.1.4   | Tanque Séptico.....   | 78 |
| 5.1.5   | Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....                      | 79 |
| CAPÍTULO VI – OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA.....                                |   | 82 |
| 6.1   | Medidas generales y equipos de protección. ....                                 | 82 |
| 6.2   | Mantenimiento de rejillas.....  | 83 |
| 6.2.1   | Función del operador .....  | 83 |
| 6.3   | Tanque Séptico .....  | 84 |
| 6.3.1   | Funciones del Operador .....  | 84 |
| 6.3.2   | Eliminación de lodos y escorias .....   | 84 |
| 6.4   | Humedales artificiales. ....  | 86 |
| 6.4.1   | Funciones del operador. ....  | 86 |
| 6.4.2   | Métodos de control de plagas.....   | 87 |
| 6.5   | Cronograma de mantenimiento de la PTAR.....                                     | 89 |
| CAPÍTULO VII – ANÁLISIS ECONÓMICO ENTRE UN SISTEMA CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL ..... |   | 90 |
| 7.1   | Inversión inicial, Costos constructivos y O&M. ....                             | 90 |
| 7.2   | Presupuesto referencial del sistema diseñado. ....                              | 92 |
| 7.3   | Presupuesto referencial de operación y mantenimiento del sistema diseñado. .... | 92 |
| CONCLUSIONES.....   |   | 92 |
| RECOMENDACIONES .....   |   | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| BIBLIOGRAFÍA.....  | 96  |
| ANEXOS.....  | 103 |
| 11.1    Anexo I: Normas de Calidad de Agua de descarga al efluente. .... | 103 |
| 11.1.1    Anexo 1 del Libro VI TUSLMA 2015.....                          | 103 |
| 11.2    Anexo III: Planos del caso de estudio. ....                      | 105 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.- Concentración de pH.....  | 15 |
| Tabla 2.- Material que remueve conforme a los niveles del tratamiento de aguas residuales. ....                             | 19 |
| Tabla 3.- Rendimientos medios de depuración en función del tipo de tratamiento...   | 21 |
| Tabla 4.- Comparación de características resaltantes entre un sistema convencional y el Humedal Artificial. ....            | 22 |
| Tabla 5.- Características de algunas plantas macrófitas comunes y ornamentales.   | 32 |
| Tabla 6.- Cuadro de eficiencia de remoción de diferentes parámetros de humedales subsuperficial de flujo horizontal.....    | 34 |
| Tabla 7.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo. ....                    | 42 |
| Tabla 8.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo. ....                    | 42 |
| Tabla 9.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo. ....                    | 43 |
| Tabla 10.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales según el tipo de flujo. ....                    | 44 |
| Tabla 11.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo. ....                   | 45 |
| Tabla 12.- Ventajas y desventajas para los diferentes tipos de materiales para impermeabilización.....                      | 47 |
| Tabla 13.- Materiales recomendados para tuberías de un humedal artificial.....  | 48 |
| Tabla 14.- Cantidad de biomasa generada por las plantas macrófitas usadas en los humedales artificiales. ....               | 49 |
| Tabla 15.- Resultados de contenido de humedad obtenido en laboratorio.....  | 57 |
| Tabla 16.- Coeficiente de retorno conforme la complejidad del sistema. ....   | 60 |
| Tabla 17.- Valores típicos para caudal de infiltración según el área.....   | 60 |
| Tabla 18.- Periodo de retención de los desalojos, por rango de cotización diaria. ...                                       | 66 |
| Tabla 19.- Aportación diaria de aguas residuales (C) y lodos frescos (L <sub>f</sub> ) por tipo de edificio y ocupante..... | 66 |

|  |    |
|--|----|
| Tabla 20.- Tasa total de acumulación de lodos (K), en días, por intervalo entre la limpieza y la temperatura del mes más frío. ....              | 66 |
| Tabla 21.- Profundidad mínima y máxima utilizable por rango de volumen utilizable. ....  | 67 |
| Tabla 22.- Ecuaciones utilizadas para calcular el tiempo de retención hidráulica. ...  | 68 |
| Tabla 23.- Ecuaciones utilizadas para calcular caudal de infiltración. ....  | 69 |
| Tabla 24.- Conductividad eléctrica de suelo para humedales artificiales de flujo subsuperficiales.....   | 69 |
| Tabla 25.- Características típicas del medio filtrante para humedales artificiales de flujo subsuperficial. ....                                 | 70 |
| Tabla 26.- Ecuaciones para determinar la remoción de DBO.....  | 70 |
| Tabla 27.- Ecuación para determinar la remoción de nitrógeno. ....   | 71 |
| Tabla 28.- Ecuación para determinar la remoción de fósforo. ....   | 71 |
| Tabla 29.- Ecuación para determinar la remoción de sólidos totales. ....   | 72 |
| Tabla 30.- Ecuación para calcular la relación larga/ancho. ....  | 72 |
| Tabla 31.- Aportes per cápita para aguas residuales domésticas .....   | 76 |
| Tabla 32.- Cálculo de caudal de diseño. ....   | 76 |
| Tabla 33.- Parámetros para dimensionar el canal de llegada. ....   | 77 |
| Tabla 34.- Diseño final del canal de llegada.....  | 77 |
| Tabla 35.- Parámetro de diseño para la rejilla.....  | 77 |
| Tabla 36.- Diseño final de la rejilla.....   | 77 |
| Tabla 37.- Parámetros para diseño de tanque séptico. ....  | 78 |
| Tabla 38.- Volumen, base y longitud del tanque séptico. ....   | 78 |
| Tabla 39.- Borde superior e inferior y área de paso de orificios. ....   | 78 |
| Tabla 40.- Altura adicional libre y altura total.....  | 78 |
| Tabla 41.- Remoción de contaminantes (DBO y SST) .....   | 78 |
| Tabla 42.- Parámetro de diseño para el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....  | 79 |
| Tabla 43.- Área para remoción de DBO del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método EPA. ....                     | 79 |
| Tabla 44.- Área para remoción de Nitrógeno del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método Reed, Crites & E.J..... | 79 |
| Tabla 45.- Área para remoción de Fósforo del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método Reed, Crites & E.J.....   | 80 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 46.- Relación largo/ancho del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.....   | 80  |
| Tabla 47.- Tiempo de retención hidráulica del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método de la Comisión Nacional del Agua. .... | 80  |
| Tabla 48.- Caudal de infiltración y velocidad de infiltración del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método de Delgadillo..... | 80  |
| Tabla 49.- Cantidad de macrófitas con 2 m de separación para el humedal artificial. ....   | 80  |
| Tabla 50.- Concentración estimada de remoción para SST. ....   | 81  |
| Tabla 51.- Formato de registro de limpieza de las rejillas. ....   | 83  |
| Tabla 52.- Formato de registro de incidencias y medidas correctoras en las rejillas.   | 84  |
| Tabla 53.- Formato de registro para los humedales. ....  | 87  |
| Tabla 54.- Cuadro de inspección y mantenimiento semanal. ....  | 89  |
| Tabla 55.- Límites de descarga a un cuerpo de Agua Dulce. ....   | 103 |
| Tabla 56.- Límite de descarga a un cuerpo de agua marina. ....   | 104 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1.- Descarga de aguas residuales.....   | 8  |
| Ilustración 2.- Ejemplo de fosa séptica. ....   | 20 |
| Ilustración 3.- Vista típica de un humedal artificial.....  | 24 |
| Ilustración 4.- Esquema transversal de un humedal superficial. Extraído de<br>:(Taberham et al., 2018) .....                                | 26 |
| Ilustración 5.- Representación esquemática de una sección transversal típica de un<br>humedal artificial por flujo subsuperficial. ....     | 27 |
| Ilustración 6.- Representación esquemática de una sección transversal típica de un<br>humedal artificial por flujo vertical.....            | 28 |
| Ilustración 7.- Funcionamiento. Principios Básicos. Elaboración Propia. ....  | 31 |
| Ilustración 8.- Idealización de un flujo ideal. Extraído de (Wallace & Knight, 2006)  | 36 |
| Ilustración 9.- Gradientes de temperatura y evapotranspiración en un humedal.<br>Extraído de Kadlec & Wallace (2008).....                   | 39 |
| Ilustración 10.- Transferencia de energía en el humedal. Extraído de (Wallace &<br>Knight, 2006) .....                                      | 40 |
| Ilustración 11.- Esquema de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.<br>Extraído de (Jan Vymazal & Kröpfelová, 2010) ..... | 46 |
| Ilustración 12.- Morfología de <i>Guadua Angustifolia</i> Kunth.....  | 54 |
| Ilustración 13.- Esquema de la distancia de siembra. ....   | 73 |
| Ilustración 14.- Diagrama de flujo de la PTAR con humedal Artificial. Caso de<br>estudio. Elaboración Propia.....                           | 75 |
| Ilustración 15.- Equipos de medida de seguridad del personal. ....  | 83 |
| Ilustración 16.- Ejemplo de aplicación de fungicidas e insecticidas. Extraído de<br>Jiménez Martínez (2009).....                            | 88 |

## RESUMEN

La presente investigación de tipo bibliográfica partió de buscar soluciones alternativas para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones menores de 1000 habitantes.

Por ende, se planteó la indagación “**Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes**” previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil**”. Por lo cual, se realizó un análisis de las investigaciones hechas en torno a plantas operadas con dicho sistema, en cuanto a su eficiencia, aspectos técnicos, diseño y económicos, así como la revisión de implementación en otras poblaciones.

Posterior, se planteó un caso de estudio donde se implementan 3 niveles conforme dicta la literatura investigada, entre ellos: pretratamiento (canal de llegada y rejilla), primario (Tanque séptico) y secundario (Humedal artificial). Obteniendo eficiencias del 40% en DBO y 65% en SST para el nivel primario y 56.94% en SST, 78.99% en DBO, 63.71% en N, 56.94% en P y 90% en coliformes para el tratamiento secundario.

Finalmente, se concluyó en base a las eficiencia que el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal junto con la macrófita *Guadua Angustifolia* Kunth forma parte de una solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un asentamiento menor de 1000 habitantes, además que este tipo de sistemas son comunes en comunidades de baja densidad poblacional en vista que a nivel económico son más factible para su construcción y O&M.

**Palabras claves:** Nivel de pretratamiento, nivel primario, nivel secundario, Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, económico y eficiencias.

## ABSTRACT

This bibliographic research was based on the search for alternative solutions for wastewater treatment in communities with less than 1,000 inhabitants.

Therefore, the inquiry "Design of sewage system for the implementation of wetland systems in communities of less than 1000 inhabitants" was proposed. Therefore, an analysis was made of the research done on plants operated with this system, in terms of their efficiency, technical, design and economic aspects, as well as the review of implementation in other populations.

Subsequently, a case study was proposed where 3 levels are implemented according to the literature researched, among them: pretreatment (inlet channel and grate), primary (septic tank) and secondary (artificial wetland). Efficiencies of 40% in BOD and 65% in TSS were obtained for the primary level and 56.94% in TSS, 78.99% in BOD, 63.71% in N, 56.94% in P and 90% in coliforms for the secondary treatment.

Finally, it was concluded based on the efficiencies that the subsurface artificial wetland with horizontal flow together with the macrophyte *Guadua Angustifolia* Kunth is part of an alternative solution for the treatment of domestic wastewater in a settlement of less than 1000 inhabitants, and that this type of system is common in communities with low population density since it is more economically feasible for its construction and O&M.

**Key words:** Pretreatment level, primary level, secondary level, subsurface horizontal flow constructed wetland, economics, and efficiencies.

## INTRODUCCIÓN

Desde la aparición del hombre sobre el planeta, se ha puesto en práctica la creación de medios para satisfacer sus necesidades. Producto del crecimiento desmesurado de la población en las últimas décadas a nivel mundial, y de las actividades realizadas por el ser humano en procura de la satisfacción de necesidades e inclusión en la dinámica socioeconómica; se ha generado una descarga importante de aguas residuales no tratadas cuyos efectos traen consigo graves problemas de contaminación.

Por consiguiente, el aumento poblacional, uso y abuso del medio ambiente para el logro de aspiraciones humanas y falta de conciencia ambiental han generado graves problemas ambientales entre ellos, por sus características la contaminación del agua, cuyo deterioro en su calidad posee efectos negativos para el hombre, el medio ambiente y el empobrecimiento del ecosistema; motivo por el cual actualmente se ha recurrido al uso de soluciones alternativas, que aun cuando no solucionan definitivamente la problemática, contribuyen para no agravarla.

Según datos aportados por la “Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA)”, en su figura como el órgano de gobierno encargado de la administración de la dotación del servicio de agua y desarrollo de políticas pertinentes, el Ecuador es considerado uno de los países que posee mayores recursos hídricos en Sudamérica.

Sin embargo, del levantamiento de información realizado en abril del 2016 por la “Agencia de Regulación y Control de Agua (ARCA)” se desprende en forma general, una cobertura de agua potable del 68.7% por parte de la población y la existencia del servicio de alcantarillado, de un 51.17%. Donde, alrededor de un 10% de las aguas residuales producidas por los asentamientos humanos, poseen algún nivel de tratamiento antes de su descarga final a fuentes hídricas.

Actualmente se están ejecutando los proyectos de construcción de las plantas de tratamiento de aguas servidas en Guayaquil y Quito, con lo cual se espera aumentar la dotación de tratamiento de aguas servidas a un 80% de la población, quedando pendiente el mejoramiento de la cobertura para recoger y tratar las aguas servidas en el área rural.

En consecuencia y con base en los estudios realizados se percibe la ausencia de medidas pertinentes y en su defecto, la generación de aguas residuales y sus efectos contaminantes, obliga a emplear tecnologías de fácil operación y

mantenimiento eficientes y económicas para eliminar las partículas contaminantes que se encuentran disueltas en el agua, antes de verterlas al medio ambiente para mitigar sus efectos dañinos y al mismo tiempo utilizarla en labores agrícolas, industriales e incluso uso doméstico, en el entendido que no se recomienda para el consumo humano por cuanto sus características la definen como no apta para consumo.

Por tales motivos, y a objeto de aportar soluciones alternativas a la problemática existente relacionada con la contaminación del agua, se plantea la investigación sobre “Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes”; a cuyos efectos se requiere un análisis de eficiencia en cuanto al tratamiento de las aguas servidas, en términos de aspectos técnicos y económicos; que permita la escogencia del tipo de sistema adaptable a las condiciones preestablecidas.

## **CAPÍTULO I – PLANTEAMIENTO INVESTIGATIVO**

### **1.1 Antecedentes.**

La ocupación del suelo urbano, ha generado la proliferación de desarrollos habitacionales espontáneos que carecen de los sistemas de disposición final reglamentarios y en el mejor de los casos se realiza en fosas sépticas y sumideros, lagunas de oxidación o similares y en su ausencia, se vierten de forma directa al terreno, generando escorrentías superficiales y subterráneas que saturan el suelo y disminuyen su resistencia provocando derrumbes y/o deslizamientos que afectan notablemente la seguridad de usuarios y bienes.

Por ende, la presente investigación parte de la necesidad de aportar soluciones alternativas y eficientes que contribuyan a minimizar los efectos contaminantes del agua y su influencia en la contaminación ambiental que, vistas las consecuencias, amenaza la humanidad.

El punto de partida lo constituye un estudio práctico por parte de (Gamez & Marmol, 2020) titulado “Evaluación de un sistema Wetland con caña guadua para el tratamiento de aguas servidas”, en la que se operó una planta piloto Wetland subsuperficial de flujo horizontal con las respectivas cuantificaciones de caudales y producción de biomasa, cuyas conclusiones permitieron encontrar valores favorables del parámetro que mide la demanda bioquímica de oxígeno, en la degradación de la materia orgánica contenida en una muestra de agua.

A partir de esta premisa, se plantea una investigación más profunda al objeto de la determinación de eficiencia, aspectos técnicos, aspecto de diseño y económicos que permitan el dimensionamiento de un sistema de tratamiento con humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal para el tratamiento de las aguas servidas en comunidades con población menor de 1.000 habitantes.

### **1.2 Objetivos**

#### ***1.2.1 Objetivo General***

Determinar la eficiencia en términos de aspectos técnicos y económicos del Humedal Artificial para tratamiento de aguas residuales, en comunidades con una población menor de 1000 habitantes.

### **1.2.2 Objetivo Específico**

- Revisar y definir conceptos referente aguas residuales (Características, tipos de tratamientos, entre otros) y Humedal Artificial (Características, tipos, entre otros).
- Comparar eficiencias en parámetros de calidad de agua de diferentes humedales artificiales para seleccionar el óptimo tratamiento.
- Determinar los aspectos técnicos básicos de diseño del Humedal Artificial seleccionado, tales como tipo de flujo, velocidad de filtración, material de enraizamiento de las plantas, evapotranspiración, percolación, dirección del viento y temperatura.
- Dimensionar el sistema para el caso de estudio y elaborar una aproximación a un manual para operar y mantener el sistema, asumiendo dotación, contribución del lodo fresco y tiempos de retención estimados entre otros.
- Determinar en términos generales costos de inversión inicial necesaria para su ejecución.
- Definir consideraciones de operación y mantenimiento para garantizar el funcionamiento del sistema.

### **1.2.3 Metodología**

La presente investigación tiene como finalidad de investigar la eficiencia del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, tomando como referencia un estudio realizado por (Gamez & Marmol, 2020), el cual, obtuvieron buenos resultados implementando este tipo de sistema, añadiéndole que el tipo de macrófitas utilizada es la misma que se va a analizar como la guadua *Angustifolia* Kunth.

Para lograr esta análisis se parte de una investigación de tipo bibliográfico, con indagaciones referentes a la materia objeto de estudio. Por lo cual, la búsqueda se divide en capítulos:

- El 2do Capítulo, hace mención del marco teórico en donde se hace mención a conceptos como el de agua residual, sus características físicas, químicas y microbiológicas, los diferentes tipos y etapas de tratamientos de AARR, se indagó sobre los sistemas convencionales y no convencionales, se centralizó en los diferentes tipos de humedales artificiales que se pueden implementar,

adicional, se plantea la eficiencia que tiene este sistema, con diferentes tipos de macrófitas relacionadas a una misma cantidad de población o caudal de la cual se está analizando en el caso de estudio.

- El 3er Capítulo menciona los diferentes aspectos técnicos del humedal artificial subsuperficial con la Caña guadua *Angustifolia Kunht*, el cual se detallan las generalidades hidráulicas de este sistema entre ellos el tiempo de retención hidráulica, el sustrato, el balance de agua y se da a detalle los aspectos físicos del humedal artificial a considerar para un diseño. Además de los tipos de planta que se implementan en los humedales artificiales.
- En el 4to Capítulo menciona los aspectos de diseño del humedal artificial subsuperficial con la caña *Guadua Angustifolia Kunht*, en este capítulo se expresa las ecuaciones para el dimensionamiento del sistema, adicional, se representa de manera gráfica el diagrama de flujo de cómo se va a implementar el tratamiento.
- En el 5to Capítulo hace mención del dimensionamiento de un caso de estudio en base a la investigación realizada en los capítulos anteriores, para este caso de estudio se asume ciertos parámetros como la población de diseño, la dotación, adicional, se selecciona concentraciones de los parámetros de DBO, SST, N, P y Coliformes, valores típicos de AARR domestica por (Metcalf & Eddy, 1995), misma que se reflejan en la **tabla# 31** y remarcadas. A su vez, se establecen eficiencias, para el tanque séptico según (ABNT, 1993) una eficiencia del 40% para DBO y 65% SST, mientras que para el humedal se obtiene un porcentaje promedio de eficiencias conforme la **tabla# 6**, por ende, se obtiene un 78,99% para DBO, 80,41% para SST, 56,94% para P, 63,71% para N y 90% para Coliformes.
- En el capítulo 6to se realiza un pequeño manual de operación y mantenimiento del sistema, el cual, menciona las acciones a llevar por el operador de la PTAR mencionando ciertos parámetros que son de vital importancia como el control de flujos en el sistema, así como sus niveles, y de la biomasa del sistema, que al no ser corregidos pueden provocan inconformidad a sus alrededores. Adicional, se presenta un cronograma de mantenimiento de la PTAR que influye en como el operador puede mantener la eficiencia del sistema.



- El capítulo 7mo se enfoca en realizar un análisis comparativo entre un sistema convencional y no convencional (Humedal artificial), el cual, se realiza un enfoque investigativo de diversos estudios para obtener un promedio de cuanto es el costo constructivo de un sistema convencional vs no convencional, así mismo, tener en conocimiento los costos operaciones y mantenimientos de ambos sistemas. Adicional, se realiza un propuesta referencial del sistema diseñado en el caso de estudio, tanto del sistema constructivo como del sistema O&M.

Finalmente, se procede a realizar los respectivos planos del caso de estudio diseñado, junto con las conclusiones y recomendaciones.

## CAPÍTULO II – MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aguas Residuales

También son conocidas como “aguas servidas” o “efluentes” y se les puede definir de diferentes maneras, por ende, no existe una definición universal.

“Son aquellas que, por uso del hombre, representan un peligro y deben ser desechadas, debido al, gran contenido de sustancias y/microorganismos perjudiciales para el ser humano.” (García & Pérez, 2019)

El concepto se refiere a las aguas utilizadas con parámetros dudosos de calidad por su afectación, producto de las actividades realizadas por el hombre y se consideran en términos generales, como un producto inevitable de las actividades humanas y la polución del medio.

Incluyen las aguas usadas que provienen de actividades domésticas, urbanas, provenientes de alcantarillados, comerciales e industriales; a las que se agregan los residuos de la actividad industrial, minería y producto de su unión con aguas de lluvia y no canalizadas por ausencia de sistemas de recolección y disposición final.



*Ilustración 1.- Descarga de aguas residuales.*

## 2.2 Clasificación de aguas residuales.

| Autores                | Definición  |
|------------------------|---|
| (López, 1995)          | Las aguas residuales pueden tener varios orígenes: aguas residuales domésticas, aguas residuales industriales y aguas lluvias   |
| (García & Pérez, 2019) | Las aguas tienen diversos orígenes: aguas residuales domésticas o aguas negras, aguas blancas, aguas residuales industriales y aguas residuales agrícolas   |
| (Bokova & Ryder, 2017) | Las aguas residuales se consideran como una combinación de uno o más de los siguientes efluentes: efluentes domésticos que consisten en aguas negras (excremento, orina y lodos fecales) y aguas grises (aguas servidas de lavado y baño); aguas de establecimiento comerciales e instituciones, incluidos hospitales; efluentes industriales, aguas pluviales y otras escorrentías urbanas; y escorrentías agrícolas, hortícola y acuícola |

Al igual que su definición, no existe acuerdo en cuanto a la clasificación de las aguas residuales. No obstante, se adopta una clasificación en función del origen:

### **2.2.1 Aguas residuales de origen doméstico.**

Son las aguas originadas producto de las actividades diarias realizadas por el hombre en edificaciones de uso residencial, comercial y cualquier otro uso con características similares. Proviene de servicios sanitarios, inodoros, lavaderos, lavaplatos y otros artefactos domésticos.

### **2.2.2 Aguas residuales provenientes de actividades agroindustriales.**

Son las aguas residuales producidas por la realización de actividades de origen agrícola con fines industriales, poseen características similares a las aguas provenientes de actividades domésticas, es decir, Los agentes contaminantes son los mismos, a excepción de los producidos por los detergentes.

### **2.2.3 Aguas residuales provenientes de actividades industriales.**

Son las aguas residuales provenientes de procesos manufactureros generados por las actividades industriales, se caracterizan por la gran variedad de agentes contaminantes. Su naturaleza depende del tipo de industria, procesos de fabricación utilizados, producción, transformación, consumo, limpieza o mantenimiento.

### **2.2.4 Aguas residuales de escorrentías.**

Provenientes de las precipitaciones por lluvia, que se moviliza hacia los puntos de recolección, arrastrando a su paso en suspensión y disolución, todo tipo de material acumulado en las superficies. Este tipo incluye las aguas residuales que provienen de desarrollos residenciales generalmente, que no poseen sistemas de recolección y disposición final de aguas negras y servidas, cuyas escorrentías tanto superficiales como subterráneas poseen efectos contaminantes.

## **2.3 Parámetros de las aguas residuales.**

Se reconocen de acuerdo con su naturaleza y composición, como parámetros físicos, químicas y biológicas.

### **2.3.1 Parámetros físicos.**

#### **a. Contenido total de sólidos.**

Sin excepción, todas las aguas independientemente de su naturaleza contienen sustancias extrañas en cantidades variables, producto de la contaminación por desechos urbanos, desechos industriales o por rastreo de lluvias y corrientes de agua. Dichas sustancias pueden presentarse como: **Materia en suspensión**, aquella visible que flota entre la superficie y el fondo de las aguas residuales y permite su remoción mediante procesos físicos o mecánicos por filtración o sedimentación. A su vez comprenden la materia coloidal y sedimentable. Cabe señalar que no se considera como materia sólida la que desaparece durante el proceso de evaporación por la acción de la presión del vapor. **Materia disuelta**, constituida por sólidos que son retenidos cuando se filtran. **Sólidos totales**, incluyen toda la materia sólida presente en las aguas residuales, constituidos por el residuo obtenido, luego de evaporar el agua a temperaturas mayores que 100°C.

b. Olor.

Generalmente desagradable, el olor se debe al desprendimiento de los gases que se liberan en la descomposición de la materia orgánica, desechos industriales y sales minerales de diferente naturaleza contenidas en el agua.

“Los olores son, debido a, los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica.” (Franco, 2010).

c. Color.

Ocasionalmente está ligada a la turbidez y el color depende por lo general de la edad del agua y es así como el agua residual recién utilizada posee un color gris claro, que, al transcurrir el tiempo, debido al proceso de descomposición de las impurezas, varía gradualmente de gris a gris oscuro y posteriormente negro.

d. Temperatura.

Generalmente, las aguas residuales poseen una temperatura mayor que la del agua potable apta para el consumo humano, debido aparentemente al uso de agua caliente en las tareas domésticas y actividades industriales. Su valor puede afectar la velocidad de las reacciones químicas y suele amplificar los olores.

### **2.3.2 Características químicas.**

En el caso de las características químicas de las aguas residuales varían con la naturaleza de la materia orgánica que contienen. Poseen gran importancia en lo referido al tratamiento de aguas residuales y específicamente en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas, por cuanto pueden interactuar con las características del suelo, ocasionando la variación de valores de parámetros presentes en los componentes del agua. Además, por la importancia que tienen en la gestión de la calidad del agua. Dentro de ellas se distinguen dos tipos: materia orgánica e inorgánica.

**a. Materia Orgánica.**

Está referida a la materia sólida de origen animal, vegetal, resultante de las actividades humanas constituida por compuestos orgánicos con presencia de impurezas que pueden constituir aproximadamente una tercera parte de los elementos componentes de las aguas residuales. Resultan por combinaciones de oxígeno, con hidrógeno y carbono y en pequeñas cantidades nitrógeno, azufre, fósforo o hierro y también urea. “Las sustancias orgánicas presentes en las aguas

residuales son: proteínas de 40 a 60%, hidratos de carbono de 25 a 50%, aceites en un 10% y pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas con estructuras que van desde muy simples hasta muy complejas” (Chonqui, 2019).

Con respecto al contenido de sustancias orgánicas en las aguas residuales, se han desarrollado varios tipos de ensayos. En términos generales, se considera que entre los métodos existentes hay dos grupos a saber: los métodos que se emplean para determinar altas concentraciones de materia orgánica cuyos valores son mayores de 1mg/l y aquellos utilizados para determinar contenidos menores a nivel de trazas. Dentro del primer grupo se encuentran las pruebas para determinar la demanda bioquímica de oxígeno (DBO); la demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT), que son considerados como los indicadores de contaminación por materia orgánica a ser analizados.

- *Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)*: Su determinación está relacionada con la cantidad del oxígeno disuelto, consumido por los microorganismos en la realización del proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. Constituye el parámetro de contaminación por materia orgánica más empleado en los análisis realizados para aguas residuales y aguas superficiales. Se determina mediante la elaboración de la prueba DBO a los 5 días a 20°C (DBO<sub>5</sub>), considerado este como el período de incubación, aunque también pueden tomarse diferentes períodos de tiempo y temperaturas siempre y cuando la temperatura se mantenga constante. Con relación al procedimiento utilizado Delgadillo, Camacho, & Serie, 2010 aducen que para su determinación el mismo consiste en tomar una muestra del agua residual a analizar y verterla en una botella de DBO, conocida como botella Whinkler. A este contenido se le agrega agua saturada con oxígeno disuelto y todos los nutrientes requeridos para estos fines, hasta llenar totalmente la botella. El valor del oxígeno disuelto se mide con un oxímetro y se somete a incubación a una temperatura de 20°C durante un lapso de cinco días. Esta medición debe realizarse antes y después del período de incubación.

Los valores de DBO<sub>5</sub> en las aguas residuales domésticas varían generalmente entre 200 y 400 mg/l.

Siendo que los valores más elevados normalmente corresponden a poblaciones pequeñas cuyos sistemas de recolección son muy deficientes.

Su determinación permite el conocimiento de la cantidad de oxígeno requerido para la estabilización biológica de la materia orgánica presente en el agua y la medición de eficiencia de remoción de sustancias orgánicas en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

- *Demanda química de oxígeno (DQO)*: La medición a través de ensayo de la demanda química de oxígeno se utiliza para determinar el contenido de materia orgánica en las aguas naturales y residuales y se refiere a la cantidad de oxígeno necesaria para producir la oxidación de la materia orgánica por medio de productos reactivos químicos oxidantes como el dicromato potásico empleado en la depuración de aguas residuales.

El parámetro se usa para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general el dicromato de potasio, en un medio ácido y ante la acción de altas temperaturas. Para facilitar la oxidación de algunos tipos de compuestos orgánicos, se necesita la presencia de un catalizador como el sulfato de plata.

Este ensayo también se emplea para medir la concentración de materia orgánica en aguas residuales provenientes de industrias o de alcantarillados, que contengan agentes tóxicos para la vida biológica.

El valor de la DQO de un agua residual generalmente es mayor que el valor de la DBO, y esto se debe a la oxidación realizada por la vía química, de la mayoría de los compuestos, comparado con el número de compuestos que se oxidan por vía biológica, que evidentemente es menor.

Es de hacer notar que es posible determinar la DQO en un tiempo de 3 horas, considerado menor que el tiempo utilizado para determinar la DBO que es aproximadamente de 5 días. “Las aguas residuales provenientes de uso doméstico tienen un valor de DQO promedio situado de 250 a 1000 mg/l, con relaciones de DQO/DBO que comúnmente varían de 1.2 a 2.5” (Romero Rojas, 2008).

- *Oxígeno disuelto (OD)*: Es por excelencia el elemento requerido para favorecer la respiración de organismos aerobios y otros organismos similares, por cuanto evita que se desarrollen procesos anaerobios generadores de malos olores.

Las plantas acuáticas enraizadas poseen la particularidad de aportar grandes cantidades de oxígeno a sus raíces a través de un mecanismo utilizado para extraer el contaminante del agua residual, de allí su utilización en los humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales. El aire que por exceso no ha sido aprovechado por la especie es absorbido por los microorganismos entre ellos hongos y bacterias que se asocian a la raíz, encargándose de metabolizar los contaminantes que entran al sistema de tratamiento.

- Carbono orgánico total (COT): El método (COT) está considerado como otra vía para medir la materia orgánica presente en el agua y es utilizado en aquellos casos donde las concentraciones de materia orgánica son relativamente pequeñas. El carbono orgánico total (COT) es un parámetro por medio del cual se mide la cantidad de materia orgánica considerada como biodegradable y no degradable que se encuentra en el agua. Se emplea para determinar la cantidad de carbono orgánico total contenida en una muestra de agua.

“El ensayo se realiza en un lapso relativamente corto. Para ello se le inyecta al agua una cantidad de muestra determinada previamente, y se introduce en un horno a alta temperatura o en un medio considerado químicamente oxidante. En presencia del carbono orgánico considerado como catalizador, se oxida dando por resultado anhídrido carbónico, cuya producción se mide con un dispositivo analizador de infrarrojos” (Zaragoza, 2010).

- Grasas y aceites: Son sustancias de naturaleza lipídica, y su porcentaje de contenido es aproximadamente del 10%. Son insolubles en el agua y consecuentemente permanecen en la superficie, generando natas y espuma, pudiendo provocar inconvenientes en las tuberías de recolección y disposición final de aguas negras y residuales. En caso de no eliminarse previo al vertido de aguas residuales se crean películas y acumulación de materia flotante.

#### **b. Materia Inorgánica.**

En los controles y detección de la calidad del agua, son varios los componentes inorgánicos y naturales que ejercen directamente su influencia, de manera tal que



su concentración puede aumentar por el contacto del agua a su paso con formaciones geológicas, ya que por choque las corrientes provocan la desintegración de las rocas y minerales con los que entran en contacto; así como por las aguas residuales tratadas o sin tratar que son vertidas directamente en los cursos de agua. Por lo general las aguas residuales provenientes del uso doméstico no incluye impurezas de esta naturaleza, salvo en el caso de las aguas provenientes de industrias cuyos desperdicios contienen componentes inorgánicos. Su concentración aumenta por en el caso de evaporación ya que la acción de altas temperaturas elimina parte del agua superficial, pero la materia inorgánica permanece intacta.

- **pH:** El índice de acidez es un parámetro de calidad que se refiere al grado de concentración del ion hidrógeno. Posee gran importancia dentro del análisis de aguas bien sea naturales o residuales. Sirve para conocer el grado de acidez o alcalinidad de una solución en una escala de 0 a 14. Se determina mediante procedimientos muy sencillos. Uno de ellos consiste en el uso de soluciones y papel de pH que producen cambios de color ante determinados valores, comparables con la escala. El color de la solución o del papel se compara con el color de series contenidas en dichas escalas. También se puede realizar mediante un pH metro digital.

Tabla 1.- Concentración de pH.

| Ácido   |         | Neutro | Alcalino |          |
|---------|---------|--------|----------|----------|
| Fuerte  | Medio   |        | Medio    | Fuerte   |
| 0 a 4.3 | 4.3 a 7 | 7      | 7 a 8.2  | 8.2 a 14 |

Extraído de: (Delgadillo et al., 2010)

- **Nitrógeno:** Es un elemento importante para fomentar el crecimiento de plantas, de allí su denominación como bioestimuladores o nutriente. El contenido total de nitrógeno está formado por porciones de nitrógeno orgánico, nitrito, amoníaco y nitrato. En las aguas residuales de origen doméstico la concentración de nitrógeno total puede oscilar entre 30 y 100 mg/l; nitrógeno amoniacal, 5 a 20 mg/l; y en el caso de nitritos y nitratos la concentración es menor de 1 mg/l.
- **Fósforo:** Este elemento suele presentarse en diferentes formas en las soluciones acuosas, siendo las formas más comunes el ortofosfato, polifosfato y fosfatos orgánicos. El fósforo también se considera como

nutriente o bioestimuladores, por su importancia para el crecimiento de algas y otros organismos microbiológicos. Esta condición exige la necesidad de controlar y limitar la cantidad de compuestos de fósforo contenidos en las aguas superficiales provenientes de las descargas de aguas residuales domésticas, industriales o escorrentías, con la finalidad de impedir la proliferación de algas y microorganismos en la superficie de las aguas. Al igual que éste, el fósforo propicia la eutrofización, referida a la proliferación de algas en lechos de agua, producto de la acumulación de materia orgánica. “En aguas residuales domésticas el contenido de fósforo oscila entre 6 y 20 mg/L” (García & Pérez, 2019).

- **Cloruros**: Es un parámetro importante en la medición de calidad del agua. Los cloruros se encuentran en el agua natural por efectos de partículas disueltas en el agua provenientes de suelos y rocas fragmentados y arrastrados por las corrientes de agua y por la acción de otros agentes naturales. “Comúnmente están presentes en las aguas residuales domésticas, agrícolas e industriales o también por la infiltración de las aguas subterráneas, que los contienen en grandes cantidades, en los sistemas de alcantarillado que se encuentran cerca de aguas saladas” (Franco, 2010).
- **Alcalinidad**: En condiciones normales, el agua residual es alcalina, siendo esta una propiedad adquirida de las aguas de tratamiento, agua subterránea y materiales utilizados en las tareas y actividades domésticas. Esta propiedad se define en las aguas residuales por la presencia de compuestos entre los cuales los más frecuentes son los bicarbonatos magnésico y cálcico. También compuestos tales como: hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos, a partir de calcio, magnesio, sodio, potasio y amoníaco. En un agua residual la presencia de sustancias alcalinas y su concentración, contribuye para la regulación del índice de acidez y sus variaciones producidas por la adición de ácidos.

### **2.3.3 Características Microbiológicas**

Los parámetros microbiológicos son aquellos que determinan la presencia de organismos considerados como patógenos presentes en las aguas residuales, provenientes de materia fecal y desechos humanos infectados o portadores de

alguna enfermedad, que permiten la aplicación de medios físicos o químicos que facilitan su desinfección. Se trata generalmente de bacterias presentes en la flora saprofita intestinal entre ellas: bacteroides fragilis, mesófilas, coliformes totales y coliformes fecales.

- Coliformes Totales: Genéricamente se designan como tal a un grupo de bacterias que poseen características biológicas y químicas en común. Se consideran como muy importantes en su condición como parámetros para definir el grado de contaminación de las aguas residuales.  
Se encuentran principalmente en los intestinos de los seres humanos y de los animales y en menor proporción, en el agua, suelos, plantas e incluso en los desechos orgánicos como la cáscara del huevo. Dentro de los coliformes totales existe un subgrupo denominado coliformes fecales
- Coliformes fecales: Incluyen bacterias del tipo Escherichia y también especiales de Klebsiella, Enterobacteria y Citrobactere.  
Son de origen fecal, sin embargo, pueden provenir de aguas enriquecidas, efluentes industriales, suelo y materia vegetal en proceso de descomposición. Los ensayos para evaluar la contaminación de las aguas por presencia de materia fecal son muy sencillas y por lo tanto constituyen un parámetro al alcance, para controlar las condiciones sanitarias en el proceso de preparación de alimentos.

#### **2.4 Tratamiento de aguas residuales.**

Las aguas residuales derivadas de las actividades humanas poseen un alto porcentaje de compuestos contaminantes en forma de materia sólida de naturaleza orgánica e inorgánica que modifica su calidad pudiendo causar daños al hombre y al ambiente.

Su tratamiento comprende un proceso de descomposición de materia de naturaleza orgánica compleja para transformarla en compuestos simples, estables y libres de contaminantes.

El tratamiento de las aguas residuales tiene por finalidad, la aplicación de una serie de procesos de naturaleza física, química y biológica cuyo objetivo principal consiste en recoger las aguas producto de la realización de actividades humanas y eliminar las sustancias contaminantes, para convertirlas en aguas depuradas que pueden

ser reutilizadas o vertidas en cuerpos de agua o efluentes receptores, sin riesgo de contaminación.

La selección del sistema de tratamiento adecuado a los fines propuestos depende básicamente de:

- Las propiedades y características del agua residual
- Requerimiento de calidad del efluente previo a su vertido en un curso de agua
- Disponibilidad del terreno apto para los fines propuestos
- Disponibilidad económica para cubrir costos de ejecución, operación y mantenimiento del sistema de tratamiento escogido
- Determinación de eficiencia de funcionamiento del sistema de tratamiento
- Optimización de procesos a largo plazo para satisfacer requerimientos futuros.

#### **2.4.1 Tipos de tratamientos**

Depende del método utilizado, las necesidades del medio y las disponibilidades existentes tenemos:

- a. Tratamientos físicos: Aquellos tratamientos cuyo principio consiste en la separación física de la materia sólida. Su aplicación depende de la calidad del agua y consecuentemente, de las propiedades presentes en los agentes contaminantes tales como: tamaño de partículas, viscosidad y densidad entre otras. Entre ellos se encuentran el tamizado, separación y filtración de sólidos y precipitación.
- b. Tratamientos químicos: Su naturaleza depende de las propiedades químicas de la sustancia contaminante y del reactivo que se requiere incorporar al agua ya que se basan en la adición de productos que favorezcan la eliminación de componentes contaminantes.
- c. Tratamientos biológicos: Utilizando procesos de naturaleza biológica aeróbicos o anaeróbicos tendentes a eliminar los contaminantes coloidales. Son utilizados por sus bajos costos y su naturaleza ecológica. Entre ellos filtros percoladores, filtros verdes, lagunaje y lodos activos.

## 2.5 Niveles de tratamiento de aguas residuales.

El tratamiento comprende cuatro niveles a saber: nivel preliminar, tratamiento primario, secundario y terciario:

Tabla 2.- Material que remueve conforme a los niveles del tratamiento de aguas residuales.

| Niveles                       | Remueve   |
|-------------------------------|---|
| Preliminar                    | Sólidos suspendidos grandes (material grande y arenas)  |
| Primario                      | Sólidos suspendidos sedimentables   |
|                               | Partículas (suspendidas) DBO (asociado al componente de materia orgánica de los sólidos suspendidos sedimentables)  |
| Secundario                    | Partículas (suspendidas) DBO (asociado al componente de materia orgánica particulada presente en las aguas residuales sin tratar, o a la materia orgánica particulada no sedimentable, no eliminada en el posible tratamiento primario existente) |
|                               | DBO soluble (asociado a la materia orgánica en forma de sólidos disueltos)  |
| Terciario                     | Nutrientes  |
|                               | Organismos patógenos  |
|                               | Compuestos no biodegradables  |
|                               | Metales   |
|                               | Sólidos inorgánicos disueltos   |
| Sólidos suspendidos restantes |   |

Tomada de (Von, 2008)

### 2.5.1 Nivel Preliminar.

La etapa de pretratamiento o etapa preliminar consiste en la separación de la fase líquida y la fracción gruesa de los sólidos, para eliminar las partículas de mayor tamaño. Comprende la regulación y medición del caudal de las aguas residuales que entran en la estación.

“Las unidades de tratamiento preliminar más comunes son las rejillas y las cámaras de desarenado” (Jan Vymazal & Kröpfelová, 2010).

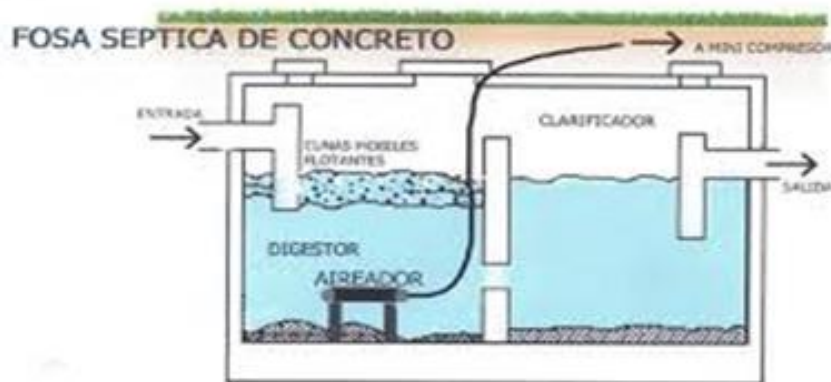
En algunos casos suele realizarse un proceso de pre-aireación con el fin de disminuir los compuestos orgánicos volátiles disueltos en el agua, que producen mal olor y aumentan el DQO del agua.

### 2.5.2 Nivel Primario.

Utilizados para efectuar mediante el uso de procedimientos físicos, la separación de partículas sólidas en suspensión, contenidas en las aguas residuales mediante un proceso de decantación o sedimentación primarias que involucra la eliminación de tanta materia sólida como sea posible.

“Los tratamientos primarios comúnmente utilizados, son la decantación primaria y los tratamientos fisicoquímicos” (Toro, 2015).

La materia sólida retenida, pasa a una trituradora, posteriormente el drenaje fluye hacia los tanques de sedimentación donde se efectúa la separación de las partículas en suspensión y de allí pasan a la cámara de sedimentación al objeto de separar las partículas sólidas, mediante precipitación asistida o agregando sustancias que sirven para aumentar el proceso de sedimentación de los sólidos disueltos. Uno de estos procesos puede ser la fosa séptica.



*Ilustración 2.- Ejemplo de fosa séptica.*

Los tratamientos fisicoquímicos se realizan agregando reactivos químicos cuya acción permite la reducción de la materia sólida en suspensión por incremento de su tamaño y densidad mediante procesos de coagulación y floculación.

### **2.5.3 Nivel Secundario.**

Consiste en eliminar la materia orgánica disuelta y en estado coloidal, mediante procesos de naturaleza aeróbica o anaeróbica y oxidación de naturaleza bioquímica. Son procesos biológicos, del tipo aerobios y anaerobios, es decir en presencia o no del aire, que favorecen la degradación de la materia orgánica biodegradable. El tratamiento biológico se realiza utilizando bacterias que, en contacto con el aire, actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas.

Los procesos comúnmente utilizados son los de lodos activos, lagunas aireadas, lechos bacterianos y digestión anaeróbica.

### **2.5.4 Nivel Terciario.**

Este tipo de tratamientos permiten obtener efluentes de mejor calidad. Constituye la etapa final del tratamiento de aguas residuales en la eliminación de agentes patógenos contenidos en las materias fecales y la eliminación del nitrógeno generado, mediante el proceso de oxidación biológica de bacterias.

El procedimiento consiste en la aplicación de procesos físicos y químicos, cuyo objetivo consiste en eliminar totalmente los contaminantes del tipo: fósforo, nitrógeno, metales pesados, compuestos minerales, compuestos orgánicos y virus, entre otros.

*Tabla 3.- Rendimientos medios de depuración en función del tipo de tratamiento.*

|                          | <b>Sólidos en suspensión (%)</b> | <b>DBO5 (%)</b> | <b>E.Coli (%)</b> |
|--------------------------|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| Pretratamiento           | 5 a 15                           | 5 a 10          | 10 a 25           |
| Tratamientos Primarios   | 40 a 70                          | 25 a 40         | 5 a 15            |
| Tratamientos Secundarios | 80 a 90                          | 80 a 95         | 90 a 98           |
| Tratamientos Tercerarios | 50 a 75                          | 95 a 98         | 98 a 99           |

*Extraída de (Salas, Pidre, & Cuenca, 2015)*

## **2.6 Sistemas convencionales de aguas residuales.**

El tratamiento de las aguas residuales con sistemas convencionales se efectúa mediante procesos realizados en estricto orden secuencial, comenzando por el tratamiento primario, siguiendo luego el secundario y terciario.

En el tratamiento primario se elimina la materia que no es soluble en agua mediante procesos físicos. Los sólidos sedimentados de naturaleza orgánica sin fermentar se convierten luego del tratamiento en lodos, de los cuales el fango bruto pasa al tratamiento secundario al objeto de disminuir la carga orgánica y los valores de DBO y DQO, mediante procesos biológicos.

El efluente que pasa por el tratamiento secundario contiene cierta cantidad de materia orgánica e inorgánica en suspensión, así como bacterias y microorganismos patógenos que requieren la realización del tratamiento terciario con la finalidad de sedimentar las sustancias sólidas, mediante el uso de coagulantes, filtros de carbón activo y procesos de ósmosis que favorecen la eliminación de solutos inorgánicos.

En los sistemas convencionales los procesos de depuración de las aguas ocurren en tanques y reactores, mediante procesos que siguen una secuencia a velocidades aceleradas por los aportes de energía.

La depuración convencional de aguas residuales forma parte de los llamados sistemas centralizados de gestión del ciclo del agua y se trata del tratamiento utilizado generalmente en grandes y medianas ciudades, cuyos resultados han constituido soluciones que, una vez evaluados, resultan ser antieconómicos por sus elevados costos de construcción y mantenimiento constante, uso de tecnologías

muy costosas, alto consumo energético, así como producción de malos olores, y presencia de residuos en forma de grasas, arenas y lodos.

## 2.7 Sistemas no convencionales de aguas residuales.

Entre los sistemas no convencionales, existen diferentes tipos de sistemas, cuyo funcionamiento depende de los procesos biológicos utilizados. Entre ellos podemos citar: los filtros verdes, lagunajes, filtros de turba y humedales artificiales.

Las técnicas alternativas tales como los denominados Humedales Artificiales se presentan como solución alternativa para el tratamiento de las aguas residuales de los asentamientos humanos no planificados, dispersos y desarrollados espontáneamente. Se caracterizan por el uso de procedimientos simples cuya construcción e insumos generan muy bajos costos en comparación con los tratamientos convencionales. Por otra parte, se consideran de naturaleza ecológica porque armonizan con el entorno, no producen impacto ambiental y su acción resulta muy eficiente en cuanto a la depuración de efluentes.

Bajo tales preceptos en asentamientos humanos con pequeñas densidades de población, tipo desarrollos espontáneos, cuyos habitantes no disponen de los recursos técnicos y económicos necesarios para abordar el tratamiento de las aguas residuales; se requiere el uso de soluciones que, aunque más económicas debido a su mínimo costo representado por los costos de ejecución, insumos y mantenimiento; su funcionamiento cumple con los requerimientos exigidos en términos de eficiencia.

Tabla 4.- Comparación de características resaltantes entre un sistema convencional y el Humedal Artificial.

|   | Tratamiento Convencional  | Tratamiento con Humedal   |
|---|---|---|
| <b>Inversión</b>                        | Moderado - Alto   | Moderado  |
| <b>Instalaciones</b>                    | Muchas / Grandes piezas mecánicas y equipos sofisticados  | No requiere partes mecánicas (tal vez bombas)                                   |
| <b>Costos de operación</b>              | Alto  | Bajo  |
| <b>Funcionamiento</b>                   | Efluente de alta calidad  | Efluente de alta calidad  |
| <b>Materia Prima</b>                    | Uso de materiales no renovables durante la construcción y para la operación el uso de electricidad y productos químicos | Uso de casi exclusivo de fuentes renovables (sol, viento) - netamente ecológico |
| <b>Entrada de energía</b>               | Alto  | Bajo  |
| <b>Emisiones de gases de efecto</b>     | Alto  | Bajo  |
| <b>Tiempo de vida</b>                   | 5 a 10 años, 20 a 25 años (lodos activados)   | 25 a 30 años o más  |
| <b>Monitoreo</b>                        | Necesita frecuentemente de monitoreos   | Necesita de monitores periódicos  |
| <b>Supervisión durante la operación</b> | Requiere de personal especializado  | No necesita de personal especializado   |
| <b>Mantenimiento</b>                    | Necesidad alta/ Costos regulares  | Bajo  |
| <b>Periodo de recuperación</b>          | Tiempo prolongado para volver a ganar por completo el rendimiento de tratamiento  | Robusto en tiempo de actividad  |
| <b>Apariencia</b>                       | No atractivo  | Estéticamente aceptado  |
| <b>Responsabilidad Social</b>           | Baja  | Alta  |
| <b>Mejora de la biodiversidad</b>       | No  | Si  |



### **2.7.1 Humedales artificiales.**

También conocidos como sistemas Wetlands, consiste en un sistema natural o artificial de tratamiento de aguas residuales que cumple una función muy importante con respecto a la protección ambiental además de suministrar las condiciones requeridas para el tratamiento de aguas residuales, ejerce su influencia en la preservación de la calidad ambiental.

“Los humedales artificiales se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales entre ellas las aguas domésticas y urbanas, aguas industriales (incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinería y mataderos, entre otros), aguas de drenaje de extracciones mineras, aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana” (Delgadillo et al., 2010). Su funcionamiento se lleva a cabo mediante intercambios físicos, químicos y biológicos y posee similitud con los procesos biológicos naturales, razón por la cual se incluyen en el ciclo del agua sin producir alteraciones, así como facilitando la recarga natural de los cursos de agua sin contaminar las aguas y tierras superficiales.

Intervienen en el mismo, la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial, en íntima relación para ejercer los efectos consiguientes, con la acción del oxígeno por la presencia de aire, razón por la cual se trata de un proceso aeróbico.

Su principio como sistema, parte de condiciones naturales. Su uso genera ambientes naturales que favorecen el ambiente y protegen los ecosistemas, permitiendo el asentamiento de la fauna y la flora en sus inmediaciones.

A través de funciones específicas de los vegetales y microorganismos presentes, se efectúan los procesos físicos, químicos y biológicos. Dichos organismos vivos, cuyas características les permite depurar el agua contaminada, ejercen su acción mediante la eliminación de grandes cantidades de materia orgánica, sólidos en suspensión, nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, y en algunos casos, productos tóxicos.

El sistema consiste en un canal artificial en excavación de poca profundidad provista de una capa impermeable y sobre dicha capa un sustrato o lecho constituido por un firme de grava con tamaño variable de partículas. Dicho sustrato se halla plantado con especies vegetales acuáticas cuyas raíces conformadas generalmente por

rizomas provistos de filamentos, les confiere alta resistencia a las condiciones de saturación del suelo (Peña Varon, Van Ginneken, & Madera P., 2003).



*Ilustración 3.- Vista típica de un humedal artificial.*

### **2.7.2 Tipos de Humedales artificiales o Wetlands en AARR.**

| <b>Autor</b>                               | <b>Definición</b>   |
|--|---|
| (Von, 2008)                                | Los humedales están compuestos por cuencas o canales poco profundos en los que crecen las plantas acuáticas. El sistema puede ser de agua libre superficial (nivel de agua sobre el nivel del suelo) o subterráneo (nivel de agua bajo el nivel del suelo). Los mecanismos actúan sobre el sistema de suelo de las raíces                     |
| (American Journal of Sociology, 2019)      | Los humedales se clasifican de acuerdo con su hidrología en humedal de flujo superficial (FS) y subsuperficial (FSS). De la misma manera, estos últimos se han dividido con relación a la dirección del flujo, ya sea horizontal (HFSS) o vertical (VFSS). Asimismo, estos sistemas se han combinado formando los conocidos sistemas híbridos |
| (Bracho, Marcos, Moreno, & Olivares, 2016) | Los humedales artificiales se clasifican dependiendo de cómo circula el agua, son: en superficial aquella que se encuentra por encima de sustrato de plantas, y subterránea donde el agua circula por los espacios intersticiales. Además, se pueden dividir en   |

Existen diferentes conceptos sobre el particular, sin embargo, llevan a una misma clasificación que es la dirección del flujo del agua en flujo superficial y subsuperficial, por ende, se adoptada dicha postura. De acuerdo con los mismos, se distinguen:

**a. Humedal de flujo superficial.**

También conocidos en inglés como “Surface Flow constructed Wetlands” o “Free Water Surface Constructed Wetlands”.

Se trata de aquellos sistemas donde el agua está expuesta al aire libre. Se caracterizan porque el agua está en contacto permanente con el aire circulante, es decir que está expuesta en forma permanente a la acción del oxígeno contenido en el aire, y fluye en sentido horizontal a través de la superficie, circulando por el medio de los tallos de las plantas entrando en contacto con la capa superior del suelo.

Este tipo de humedales se considera como un sistema de lagunas convencionales, modificado puesto que el principio es similar, aunque la diferencia radica en un canal poco profundo impermeabilizado (su profundidad puesto que poseen profundidad menor que 60 cm), provisto de una capa de suelo de 30 a 40 cm de espesor, en la cual se encuentran las plantas macrófitas. La especie comúnmente utilizadas son las cañas comunes (*Phragmites australis*), espadañas (*Typha* spp.), espadaña (*Scirpus* spp.) y hierbas (*Juncus* spp.) (Taberham, Lane, Norton, & Ryan, 2018).

Su rendimiento en cuanto al tratamiento se refiere, es bueno para el caso de los sólidos que se encuentran en suspensión (SS) así como el oxígeno bioquímico, que consiste en el factor que se toma en consideración, para medir la cantidad de dióxígeno que se consume en el proceso de degradación de la materia orgánica, contenida en una muestra de agua residual. Igualmente, su eficiencia en el proceso de eliminación de la demanda biológica de oxígeno (DBO) y del nitrógeno (N) en su condición como nutriente en microorganismos y patógenos. Sin embargo, en el caso del fósforo (P) la eliminación no es muy satisfactoria y por el contrario generalmente es limitada.



Ilustración 4.- Esquema transversal de un humedal superficial. Extraído de :(Taberham et al., 2018)

### **b. Humedal de flujo subsuperficial.**

En inglés se conoce como “Subsurface Flow Constructed Wetlands”. Se caracterizan porque contrariamente a los anteriores, la circulación del agua se realiza a través de un medio o sustrato granular subterráneo, con una profundidad de agua que se aproxima a los 60 cm. Las plantas macrófitas se asientan en este medio granular constituido por partículas de grava y el agua está permanentemente en contacto con los rizomas y filamentos de la planta.

A su vez los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal.

Se trata de un Humedal Artificial subsuperficial, donde las aguas residuales a tratar fluyen en sentido horizontal a través del canal que les sirve como conductor, mientras que el material de relleno se encarga de filtrar las partículas de sólidos en suspensión filtra y los microorganismos que se adhieren a la superficie, producen la degradación de la materia orgánica contenida. La profundidad del sustrato varía entre 45 cm a 1,00 m y la pendiente de 0,5 a 1 % es la mínima y suficiente como para permitir que el agua escurra. El agua ingresa en forma permanente, su superficie no está expuesta a la acción de la atmósfera y el nivel del agua se mantiene entre 5 y 10 cm por debajo de la superficie de grava, es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie.

Las aguas se introducen por la parte superior de uno de los extremos del canal y a unos pocos centímetros por debajo de la superficie, lo traspasa en sentido horizontal, a través de un medio granular de relleno entre las raíces. Las aguas se

recogen por un tubo de drenaje ubicada en la parte opuesta inferior, aprovechando la pendiente.

El tamaño de las partículas que reposan en el suelo al ingreso y salida de las aguas oscila entre 50 mm y 100 mm. Este tipo de sistemas son muy eficaces en cuanto a la eliminación de agentes contaminantes, materia orgánica y demanda biológica de oxígeno (DBO), aunque en cuanto a la eliminación de nitrógeno y fósforo el comportamiento es diferente, siendo generalmente menor suele ser menor.



Ilustración 5.- Representación esquemática de una sección transversal típica de un humedal artificial por flujo subsuperficial.

- Humedal de flujo subsuperficial vertical.

A este tipo de sistemas se les conoce como filtros intermitentes, por cuanto los flujos son discontinuos, variando el caudal con la influencia del factor clima, de manera tal que por las noches y en tiempo de sequía es casi nulo, mientras que en época de lluvias aumenta considerablemente. Reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema conformado por tubos perforados con entradas verticales; conectados en su parte inferior, con la tubería de recolección de drenaje que fluye a través del sustrato constituido por varias capas, con predominio de grava compuesta de partículas, cuyo tamaño es muy pequeño denominándosele árido fino o gravilla. Es así como se logra el ingreso intermitente del agua residual, con la finalidad de garantizar y estimular el contacto directo con el oxígeno del aire o lo que es lo mismo garantizar las condiciones aeróbicas.

Por tratarse de un medio poroso, y a los fines de favorecer el contacto directo con el aire y por tanto la condición aeróbica, en algunos sistemas se coloca un sistema de tuberías tipo ventilador constituido por tubos con perforaciones similares a una rejilla, provistos de una chimenea con salidas al exterior.

Contrariamente a las características del Humedal Artificial subsuperficial de flujo horizontal las partículas más finas están dispuestas en la parte superior, y las de mayor diámetro hacia abajo.

Las aguas penetran al canal en sentido vertical y se distribuyen de manera homogénea sobre toda la superficie del lecho conformado por material inerte compuesto por arena y grava cuyas características permite a las plantas su crecimiento normal, así como a sus raíces la adhesión a la superficie del sustrato. Además, el medio facilita el asentamiento definitivo de las plantas que a su vez permiten que el agua tratada se filtre entre sus raíces. “Las plantas que suelen ser utilizadas en este tipo de sistema son la caña común (*Phragmites australis*) y *Typha latifolia*” (Taberham et al., 2018).

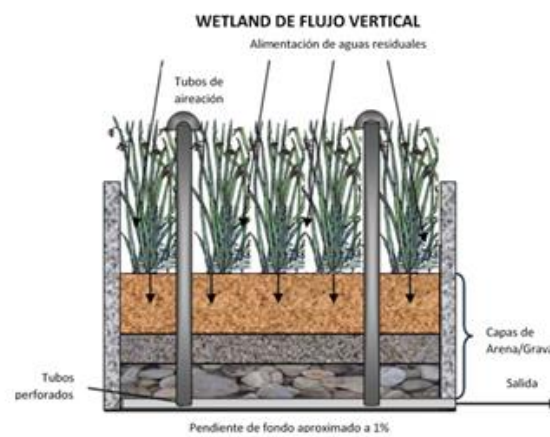


Ilustración 6.- Representación esquemática de una sección transversal típica de un humedal artificial por flujo vertical.

### 2.7.3 Uso de humedales artificiales o Wetlands.

Acorde (Taberham et al., 2018) en su aplicación, se conocen tres áreas principales, donde pueden ejercer su acción este tipo de sistemas

- **Creación de hábitat:** Su propia conformación mediante un diseño práctico y sencillo, ejerce su influencia sobre el ambiente favorable a los ecosistemas, mediante el aporte de un hábitat de vida silvestre mejorado, cuya finalidad consiste en el aumento de los beneficios ecológicos existentes, por ejemplo, atracción de aves silvestres, creación de espacios verdes adaptables a la flora y fauna existente, mientras se realiza naturalmente el tratamiento o depuración de las aguas residuales provenientes del uso en actividades humanas.

- Control de inundaciones: Son sistemas cuyas partes constitutivas funcionan como receptores de escorrentías tanto superficiales como subterráneas, durante incidentes provocados por erosión, desprendimientos de taludes, derrumbes o inundaciones. Por otra parte, incrementar la capacidad de almacenamiento de aguas lluvias, especialmente en áreas urbanas.
- Tratamiento de aguas residuales: Son sistemas diseñados y operados especialmente para recibir y tratar aguas residuales de diferente origen en caso de la inexistencia de un sistema de recolección convencional. El origen de las aguas es variado, aunque siempre se generan por las actividades humanas. Bajo tal premisa puede tratarse de aguas domésticas rurales o urbanas. Aguas provenientes de actividades manufactureras e industriales, incluyendo todo tipo de industria independientemente de la naturaleza de sus actividades. Aguas provenientes de drenajes practicados en campos de extracciones mineras. Aguas de escorrentía superficial, subterránea, agrícola y producida por lluvias.

#### **2.7.4 Ventajas y desventajas de humedales artificiales como soluciones alternativas de tratamiento de AARR.**

##### **a. Sus ventajas radican en:**

- Constituyen una forma de tratamiento que se adapta al ciclo del agua sin que se produzcan alteraciones en los ecosistemas y por ende en el ambiente.
- No son portadores de agentes contaminantes y por lo tanto no producen contaminación en las aguas y tierras superficiales.
- Por cuanto no son portadores de agentes contaminantes, los efluentes pueden ser vertidos directamente en cursos de agua o reutilizados para uso agrícola, actividades referidas a la construcción y consumo animal.
- Las operaciones requeridas para su funcionamiento y el manejo del sistema como tal, es sencillo y por lo tanto no precisa de maquinaria especializada y tampoco de mano de obra especializada.

- El consumo de energía es mínimo, si se compara con el consumo requerido por los sistemas convencionales, porque las aguas se conducen por efectos de la gravedad.
- Poseen una perfecta integración con el medio ambiente, por consiguiente, no generan ningún tipo de impacto ambiental y, por el contrario, propician un hábitat natural para la flora y fauna existente, así como riego con nutrientes para sembradíos.

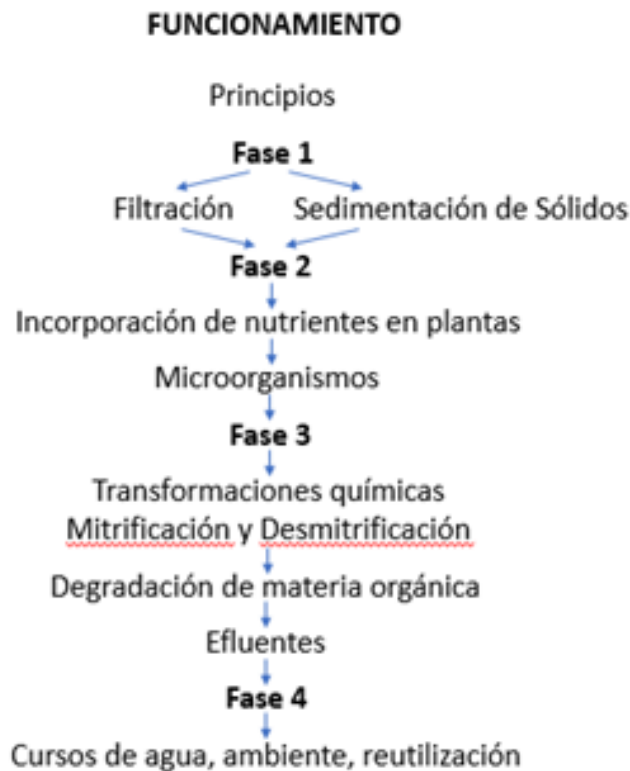
**b. Sus desventajas radican en:**

- El requerimiento de un área considerable de terreno, para su localización, pudiendo encarecer los costos de ejecución.
- El funcionamiento definitivo, requiere de un lapso prudencial para la adaptación al medio, de las especies vegetales utilizadas.
- Se generan grandes pérdidas de agua por evapotranspiración, que consiste en la evaporación del agua de una superficie con la consiguiente pérdida de humedad juntamente con la pérdida de agua por transpiración que ocurre en las especies vegetales, ocasionando a su vez, el incremento salinidad de los efluentes de aguas depuradas.
- Generación de plagas que depositan sus huevos y larvas en el agua y en las plantas, debido al libre flujo del sistema, específicamente mosquitos.

***2.7.5 Funcionamiento de los sistemas de humedales artificiales.***

El proceso comprende tres fases o etapas a saber: las aguas residuales pasan por un decantador para separar la materia sólida.





*Ilustración 7.- Funcionamiento. Principios Básicos. Elaboración Propia.*

De allí, las partículas de menor tamaño contenidas en suspensión en el agua se someten a un proceso de sedimentación de sólidos, las partículas quedan en el fondo y el agua aun sin depurar, se conecta con un humedal artificial, cuyo contenido líquido escurre bajo un lecho de grava de grano grueso. Sobre el mismo un firme de grava fina cuyas partículas mínimas les confiere propiedades semejantes a la de la arcilla coloidal que constituye el medio propicio y sirve de lecho a las plantas acuáticas.

La descarga final del agua se realiza en una laguna con plantas flotantes en la superficie donde ocurren los intercambios fisicoquímicos y se renuevan los nutrientes producto del desprendimiento de nitrógeno y fósforo que ocurre en la fase final del proceso dando lugar a los nutrientes que alimentan los microorganismos que se adhieren a la superficie, completando así la depuración de las aguas residuales, para ser vertidas al ambiente o reutilizada en condiciones óptimas.

Una vez depuradas las aguas, el efluente puede reutilizarse para riego en uso agrícola y jardinería, para uso doméstico que no incluya el consumo humano, tales como limpieza de equipos, vehículos y superficies; para labores de construcción o para ser vertida en cursos de agua, sin problemas de contaminación.

A continuación, algunas especies de plantas macrófitas, comunes y ornamentales utilizadas en los sistemas de tratamiento de aguas residuales que se identifican con los humedales, así como sus características más resaltantes.

*Tabla 5.- Características de algunas plantas macrófitas comunes y ornamentales.*

| PLANTAS    |                          |                  | CARACTERÍSTICAS       |                     |       |
|------------|--------------------------|------------------|-----------------------|---------------------|-------|
| FAMILIA    | NOMBRE CIENTIFICO        | NOMBRE COMÚN     | METODO DE PROPAGACIÓN | TASA DE PROPAGACIÓN | H MAX |
| Poaceae    | Phragmites spp           | Carrizo          | Rizoma                | Rápida              | 5m    |
| Poaceae    | Guadua angustifolia      | Guadua o tacuara | Rizoma                | Rápida              | 6m    |
| Thypaceae  | Thypa spp                | Espadaña         | Rizoma                | Muy rápida          | 3m    |
| Cyperaceae | Schoenoplectus spp       | Junco            | Rizoma                | Moderada            | 3m    |
| Araceae    | Zantaedeschia ahetiopica | Cala             | Rizoma                | Lenta               | 1,5m  |
| Canaceae   | Canna sp                 | Achira           | Rizoma                | Rápida              | 3m    |
| Iridaceae  | Iris sp                  | Lirio de agua    | Rizoma                | Lenta               | 1,2m  |
| Cyperaceae | Cyperus sp               | Papiro           | Rizoma                | Rápida              | 1,8m  |

*Fuente Morales, López, Vera, & Vidal (2013)*

### **2.7.6 Eficiencia de remoción de contaminantes del humedal artificial.**

A continuación, las siguientes numeraciones con citas referentes a la eficiencia de humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal están relacionados con la **tabla# 6.**

1. Rendimiento de los humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales municipales en zonas rurales de montaña por (Merlin, Pajean, & Lissolo, 2002).
2. Humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales en la República Checa - Estado del Arte por (Jan Vymazal, 1995)
3. Humedal construido subsuperficial de flujo horizontal con nivel de agua pulsante por (J. Vymazal & Masa, 2003)
4. Evaluación de un sistema Wetland con caña guadua para el tratamiento de aguas servidas por (Gamez & Marmol, 2020)

5. Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua Angustifolia* Kunth por (Marín & Correa, 2010)
6. Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita por (Solís, López, Bautista, Hernández, & Romellón, 2016).
7. Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial por (Arroyave, 2010)
8. Implantación y evolución de un humedal artificial de flujo subsuperficial en Cogua, Cundinamarca, Colombia por (Lara & Vera, 2005)
9. Eficiencia de la *Guadua angustifolia* (Bambú) en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedal artificial en el centro poblado Santa Catalina, distrito y provincia de Moyobamba, 2017 por (Herrera, 2020)
10. Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo subsuperficial utilizando *Stipa ichu* para el tratamiento de aguas residuales domésticas por (D. Hernández, Ramos, Castillo, & Orduña, 2015)

Tabla 6.- Cuadro de eficiencia de remoción de diferentes parámetros de humedales subsuperficial de flujo horizontal.

| Nº | Tipo de Humedal                                   | Año  | Población (hab) | Caudal (m3/día) | Tipos de Plantas  | PARÁMETROS |         |       |                                |            |       |
|----|---|------|-----------------|-----------------|---|------------|---------|-------|--------------------------------|------------|-------|
|    |   |      |                 |                 |   | DBO (%)    | DQO (%) | N (%) | Coliformes Fecales (UFC/100ml) | SST (mg/l) | P (%) |
| 1  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2002 | 350             |                 | Helófitos: Typha latifolia, Phragmites australis y Scirpus maritimus. | 90,00      | 90,00   | 57,00 | 90 - 99,98                     | 95,60      | 69,00 |
| 2  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 1995 | 1000            |                 | Phragmites australis, Phalaris arundinacea L. y Glyceria maxima       | 90,80      |         | 41,50 | ---                            | 91,10      | 51,60 |
| 3  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 1999 | 522             |                 | Phalaris arundinacea y Phragmites australis                           | 54,00      | ---     | ---   | ---                            | 32,00      | ---   |
| 4  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2020 | ---             | 2,51            | Caña Guadua   | 93,89      | ---     | ---   | ---                            | 98,95      | ---   |
| 5  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2010 | ---             | 0,47            | Guadua Angustifolia Kunth lecho con grava                             | 92,21      | 84,32   | 62,60 | ---                            | ---        | ---   |
|    |   |      |                 | 0,52            | Guadua Angustifolia Kunth lecho con grava                             | 72,88      | 64,35   | 32,35 | ---                            | ---        | ---   |
| 6  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2016 | ---             |                 | P. Paniculatum  | 95,30      | 95,10   | 93,40 |                                | 93,60      | 51,90 |
|    |   |      |                 |                 | C. Articulatus  | 86,00      | 86,10   | 81,00 |                                | 83,70      | 84,20 |
| 7  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2009 | ---             | 23,33           | Policultivo (h=55 cm)   | 66,57      | 48,92   |       | 1,83                           |            |       |
|    |   |      |                 |                 | Monocultivo (h=55 cm)   | 67,83      | 53,73   |       | 2,04                           |            |       |
|    |   |      |                 |                 | Policultivo (h=33 cm)   | 60,31      | 47,65   |       | 1,68                           |            |       |
|    |   |      |                 |                 | Monocultivo (h=33 cm)   | 58,65      | 43,60   |       | 1,58                           |            |       |
| 8  | Humedal de Flujo subsuperficial (HSS)             | 2004 | 5               | 1,34            | Junco   | 73,00      |         | 50,00 |                                | 67,00      | 28,00 |
| 9  | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2017 |                 | 2,72            | Guadua Angustifolia (Bambú)   | 89,31      | 87,42   |       | 92,20                          | 81,31      |       |
| 10 | Humedal de Flujo subsuperficial horizontal (HSSF) | 2015 |                 | 0,01            | Stipa ichu  | 94,15      | 99,55   | 91,80 |                                |            |       |

Elaboración Propia.

En conclusión, de las investigaciones realizadas por diferentes autores se puede inferir sobre la eficiencia de este tipo de Humedal Artificial subsuperficial de flujo horizontal, como solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un asentamiento menor de 1000 habitantes. En cuanto al uso de las especies vegetales, se detectan diferencias, no obstante, la caña Guadua Angustifolia Kunth posee un buen comportamiento.

Acorde a (American Journal of Sociology, 2019), “Los Humedales artificiales de Flujo Horizontal Subsuperficial (HFSS) han demostrado ser una solución atractiva en el tratamiento de aguas servidas de pequeñas comunidades, especialmente aquellas ubicadas en entornos rurales”.

## **CAPÍTULO III – ASPECTOS TÉCNICOS BÁSICOS DEL HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL CON CAÑA GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNHT.**

### **3.1 Generalidades hidráulicas.**

#### **3.1.1 Balance hídrico.**

En términos generales, el balance de aguas se define como la diferencia existente entre la entrada de aguas residuales a un humedal y la consiguiente salida, por cuanto sirve para definir cuantitativamente la cantidad de agua y a su vez define también la capacidad de almacenamiento de este.

Con respecto al balance hídrico, es de hacer notar que el flujo que entra en un humedal artificial de flujo subsuperficial, rara vez es igual al que sale del mismo por cuanto se ve afectado por la evapotranspiración (ET), entendida como la combinación de la evaporación del agua contenida en el subsuelo y la transpiración del agua ocasionada por los organismos vegetales, debido al efecto de la luz solar y los agentes climatológicos. La precipitación (P) y la infiltración (I)” (Wallace & Knight, 2006).

A medida que el agua fluye a través del sistema, se va perdiendo energía debido a la resistencia que ejercen los detritos o partículas de la masa sólida de las plantas y otros materiales. En términos generales, los humedales artificiales experimentan cortocircuitos y dispersión, por lo que el flujo real nunca funciona con hidráulica de flujo de descarga ideal.

“Durante los períodos de sequía intensa, las entradas de aguas residuales al Humedal Artificial exceden la cantidad de agua en las salidas, debido a las pérdidas ocasionadas por efectos de evapotranspiración (ET), lo cual origina una mayor salinidad en los flujos de salida, mientras que, durante los periodos lluviosos, ocurre todo lo contrario y es así como los flujos de salida exceden los flujos de las entradas, disminuyendo en consecuencia la salinidad de salida”. (S. Eslamian, S. Okhravi, 2019).

Al objeto del análisis de eficiencia de un humedal artificial, se toman en consideración los parámetros DBO, coliformes totales, termoestables y turbidez para lo cual resulta imprescindible el estudio del balance de agua del suelo donde se va a ejecutar, por cuanto el mismo interfiere en forma directa en su determinación y constituye junto con el tiempo de retención hidráulica, evapotranspiración,

precipitación, infiltración y temperatura, la base de los cálculos a los fines de su diseño.

El exceso de agua no contabilizada que entra en el sistema limita los asentamientos y aumenta las tasas de descarga, mientras que la falta de agua en un humedal los estresa debido a las características propias de la vegetación, acostumbrada al medio húmedo saturado, lo que seguramente da lugar a una pérdida de capacidad de tratamiento vegetal. Ambas condiciones reducen los objetivos de diseño del tratamiento de las aguas residuales.

Consecuentemente, sin una consideración adecuada de las condiciones de balance de aguas en el diseño del humedal artificial, la solución propuesta tendrá invariablemente problemas de funcionamiento y rendimiento.

Sin embargo, suponiendo que no sucede un cambio neto en el volumen hidráulico del humedal, la tasa de flujo que sale del sistema puede relacionarse con el flujo del influente de la siguiente manera, según (Wallace & Knight, 2006):

$$Q_{out} = Q_{in} - ET - P - I$$

Donde:

$Q_{out}$ = Flujo saliendo del Humedal ( $m^3/d$ )

$Q_{in}$ = Flujo entrando del Humedal ( $m^3/d$ )

$ET$ = evapotranspiración ( $m^3/d$ )

$P$ = Precipitación ( $m^3/d$ )

$I$ = Infiltración

Otros autores como (Kadlec & Wallace, 2008) afirman que el balance hídrico global y dinámico de un humedal artificial es:

$$Q_i - Q_o + Q_c - Q_b - Q_{gw} + Q_{sm} + (P \times A) - (ET \times A) = \frac{dV}{dt}$$

Donde:

$A$ = Superficie superior del Humedal ( $m^2$ )

$ET$ = Tasa de evapotranspiración ( $m/d$ )

$P$ = Tasa de precipitación ( $m/d$ )

$Q_b$ = Índice de pérdidas ( $m^3/d$ )

$Q_c$ = Tasa de escorrentía de la cuenca ( $m^3/d$ )

$Q_{gw}$ = Infiltración de las aguas subterráneas ( $m^3/d$ )

$Q$ = Caudal de entrada del agua residual ( $m^3/d$ )

$Q_o$ = Caudal de salida del agua residual ( $m^3/d$ )

$Q_{sm}$ = Tasa de deshielo ( $m^3/d$ )

$t$ = Tiempo (d)

$V$ = Almacenamiento del agua en el humedal ( $m^3$ )

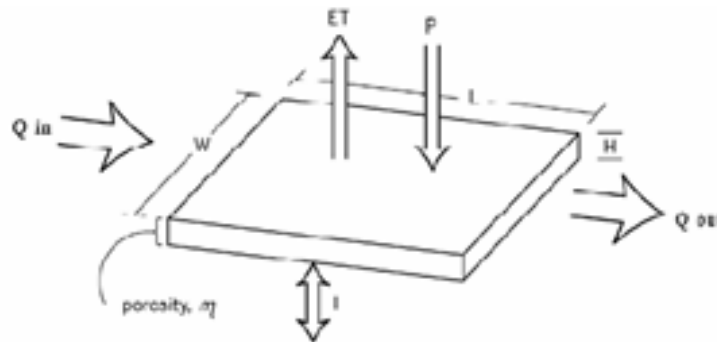


Ilustración 8.- Idealización de un flujo ideal. Extraído de (Wallace & Knight, 2006)

### 3.1.2 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulica (TRH o sus siglas en inglés HRT), representa un cálculo crítico en el diseño de los humedales artificiales.

Se define como el tiempo medio necesario para que las aguas pasen de la entrada del sistema a la salida, es decir es el tiempo transcurrido entre el momento en que un líquido que entra en un recipiente independientemente de su forma y capacidad tarda en salir del mismo.

El tiempo de retención real del agua dentro del humedal es relativamente variable, pudiendo ser más corto que el nominal, en aquellos casos en que aparecen zonas muertas, o en otros casos más largo motivado a imprecisiones surgidas en las mediciones del volumen del humedal o del caudal de las aguas.

“Tanto los agentes climatológicos y sus variaciones, como las precipitaciones y la evapotranspiración, pueden provocar la variación dinámica del tiempo de retención real en un humedal artificial. Además, se debe tomar en consideración, que los humedales artificiales poseen un rango de distribución de los tiempos de retención, motivado a la diversidad de tamaños de granos o partículas del material granular, la dispersión y las ineficiencias hidráulicas” (S. Eslamian, S. Okhravi, 2019)

Es decir, las corrientes de agua que entran en un humedal en el momento cero no salen simultáneamente en el tiempo calculado a los efectos, puesto que influyen

tanto el contenido de materia sólida como de los agentes contaminantes, de manera tal que saldrán del sistema después de períodos de tiempo variables, que podrán ser menores o mayores que el tiempo nominal estipulado. ( $t_n$ ).

Esta distribución de los tiempos utilizados por las diferentes fracciones de agua que pasan por un humedal se denomina distribución del tiempo de residencia. (RTD).

El rendimiento hidráulico de los Humedal puede ser analizado y calculado mediante el uso de los patrones de flujo de agua o las distribuciones del tiempo de retención. (RTD).

### **3.1.3 Evapotranspiración (ET)**

Se define como tal, la combinación del agua resultante de la evaporación y la que se genera por la transpiración de organismos de origen vegetal o lo que es lo mismo la combinación del agua evaporada que cae al suelo por las precipitaciones y el agua producto de la transpiración de agua por parte de los organismos vegetales.

Su determinación no es muy sencilla porque su medida se toma directamente en sitio. Se requiere la ayuda de herramientas específicas, así como la medición exacta de marcadores ambientales.

Debido a que la ET sigue un ciclo diurno con un valor máximo durante las primeras horas de la tarde y un valor mínimo en las últimas horas de la noche, la salida de agua puede disminuir durante las horas del mediodía cuando los valores de ET obtienen un valor intermedio.

Las pérdidas de ET reducen el volumen de agua en el humedal artificial, aumentando la concentración de agentes contaminantes, aunque no aumenta la masa de contaminantes descargados en el efluente.

Acorde a (Kadlec & Wallace, 2008) existen varias mediciones relacionadas con las pérdidas de agua en lagos y humedales. Estas mediciones no son intercambiables y su uso indiscriminado puede llevar a confusión. La información a utilizar para estimar la ET incluye lo siguiente:

1. La evaporación lacustre, definida como la pérdida de grandes masas de agua sin vegetación (E)
2. La transpiración, interpretada como la pérdida de agua a través de las partes de las plantas que se encuentran sobre el agua o sobre el suelo (T)



3. La evapotranspiración de los Humedales, entendida como la pérdida de las masas de agua con vegetación (ET). Pudiendo ser la vegetación enraizada o flotante, emergente o sumergida.

#### **3.1.4 Precipitación (P)**

Se define como la captación directa de la lluvia a la cual se añade cualquier escorrentía proveniente de taludes, diques o similares captadas por el humedal artificial, independientemente que se trate de las superficiales o subterráneas.

En este sentido es de hacer notar que la mayoría de los humedales utilizados para el tratamiento de aguas residuales están diseñados para minimizar la captura de las escorrentías.

Los eventos producidos por las precipitaciones de alguna manera se ven impulsados por las variaciones del clima; por cuanto suele suceder que en época de lluvias algunas zonas experimentan precipitaciones diarias, mientras que, en las regiones secas, las precipitaciones ocurren en lapsos de tiempo muy distanciados o poco frecuentes y alta intensidad. Por consiguiente, se hace necesario tomar en cuenta estas variaciones con relación al volumen de las aguas, así como la concentración de contaminantes diluidos y en suspensión.

“La ocurrencia de lluvias hace que las precipitaciones aumenten el volumen de agua en el humedal, máxime en las zonas donde el índice de pluviosidad es alto. En estos casos suele ocurrir una disminución considerable de la concentración de contaminantes” (Wallace & Knight, 2006).

#### **3.1.5 Infiltración (I)**

Se define como tal el flujo de agua entre el humedal artificial y la capa freática. Cuando el nivel de la capa freática es inferior al nivel de agua del sistema, el agua saldrá del humedal hacia las aguas subterráneas. Si el nivel freático es mayor que el nivel de agua del sistema, el agua fluirá hacia el humedal. La pérdida de agua caracterizada por el flujo del humedal a la capa freática es la más común.

Cuando esto sucede, la infiltración puede llegar a reducir el volumen de agua en el Humedal y los agentes contaminantes son conducidos a la capa freática. Como resultado, se reduce considerablemente la masa de contaminantes en el efluente del Humedal, pero la concentración de los contaminantes en el efluente permanece invariable.

### 3.1.6 Temperatura (T)

Dependiendo del tiempo de retención hidráulica, y de la carga de agua un humedal artificial se puede presentar una o dos zonas térmicas. Cuando los tiempos de retención son muy extensos, hay una zona de entrada donde la temperatura del agua se adapta a las condiciones meteorológicas existentes y una región de salida en la que tal ajuste se completa. Después del ajuste, no hay variaciones de la temperatura y no cambia ni con la distancia, ni con el tiempo de retención.

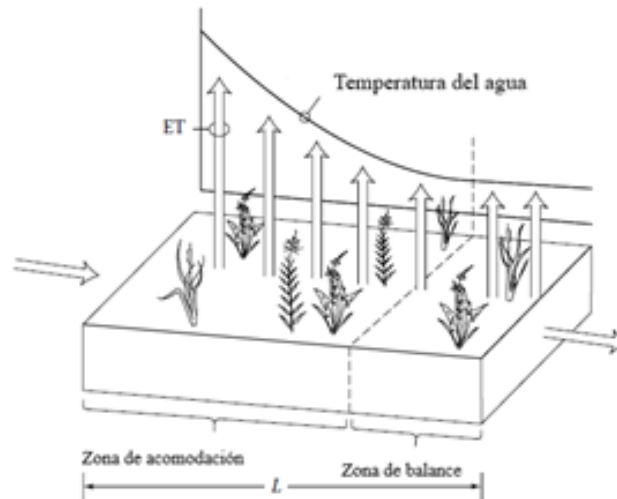


Ilustración 9.- Gradientes de temperatura y evapotranspiración en un humedal. Extraído de Kadlec & Wallace (2008)

Las variaciones de temperatura experimentadas en estos sistemas se deben a la energía proveniente del sol que ingresa al sistema, cuya entrada neta se propaga en forma de radiación solar (RN) y, por lo tanto, las temperaturas del agua en los humedales sufren variaciones notables debido a los cambios de energía experimentados. A la energía producida por la radiación solar, se suma la energía generada por la presión que ejerce el agua a su entrada al sistema.

Hay variaciones diurnas a corto plazo, motivado a los ciclos diurnos y nocturnos, así como cambios estacionales a largo plazo.

En cuanto a las temperaturas del agua es importante señalar que las variaciones ocurridas a corto plazo en el transcurso del día revisten mucha menos importancia, desde el punto de vista del diseño; que las variaciones estacionarias a largo plazo. (Wallace & Knight, 2006)

Por otra parte, se tienen que considerar, las pérdidas de energía ocasionadas por efecto de la evapotranspiración (ET), y la que sale del sistema producida por el flujo de los efluentes.

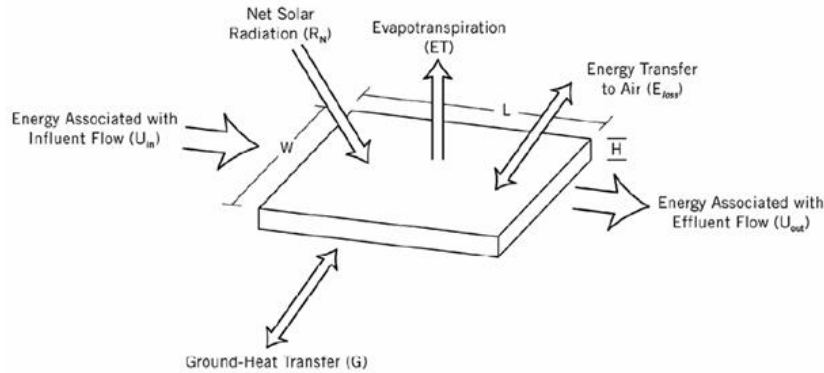


Ilustración 10.- Transferencia de energía en el humedal. Extraído de (Wallace & Knight, 2006)

El efecto neto resultante de los pasos de energía se hace sentir en el sistema a través del punto de equilibrio de la temperatura,  $T_b$ .

Al equilibrarse las entradas y salidas de energía, se obtiene el punto de equilibrio de la temperatura alcanzándose en la región de entrada del humedal artificial. Allí se mantiene estable por efectos de nivelación de la temperatura en el Humedal con lo que se obtiene lográndose un valor estable de la temperatura del agua. (Wallace & Knight, 2006).

### 3.1.7 Sustrato

El sustrato del humedal artificial es el lecho o fondo que sirve de soporte a la vegetación seleccionada, permitiendo que el agua circule a través de la vegetación. Constituye un elemento fundamental dentro del sistema por ser la zona donde se efectúa la remoción de agentes contaminantes, así como el establecimiento de las condiciones adecuadas para el enraizamiento de las plantas macrófitas, las cuales requieren de un medio saturado, por lo cual afecta en forma directa la hidráulica del humedal artificial debido al tipo y granulometría del material granular que lo compone y su influencia depende de la cantidad y tamaño de granos de partículas constituyentes.

Las funciones del sustrato quedan especificadas como sigue:

- Proporciona un entorno apropiado para el enraizamiento de la vegetación.
- Mejora la distribución del flujo a través de las celdas del Humedal Artificial.
- Favorece la adaptación de las biopelículas y el crecimiento de microorganismos
- Filtra partículas y reduce la velocidad del flujo para permitir la sedimentación.
- Influye en la hidráulica del sistema

En este sentido reviste gran importancia el comportamiento de las especies vegetales y por lo tanto la selección del material agregado para la ejecución del sustrato debe realizarse tomando en consideración las características de las plantas seleccionadas, puesto que hay algunas especies cuyo comportamiento y funciones dependen del material sobre el cual se arraiguen sus raíces.

La conductividad hidráulica del sustrato constituye un parámetro de diseño importante y está íntimamente ligado con la granulometría o tamaño de granos de los áridos utilizados para cubrir la superficie. Específicamente, en lo referido al tamaño medio de las partículas que conforman los agregados y el grado de compactación de los áridos que define la densidad aparente.

### **3.2 Mecanismos de depuración de aguas residuales.**

La depuración del agua residual en los humedales artificiales ocurre mediante mecanismos complejos originados por la interacción entre los elementos que componen el sistema y los fenómenos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar dentro.

Mediante la fijación de la materia orgánica y los agentes contaminantes en la superficie del lecho, complementada con la acción resultante de su utilización y transformación mediante microorganismos, se logra la depuración de las aguas residuales, tratamiento éste que involucra procesos de filtración, sedimentación oxidación bacteriana y precipitación química.

A continuación, se detallan los más importantes, entre estos tenemos:

#### ***3.2.1 Remoción de materia orgánica.***

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente por un proceso de biodegradación aeróbica de la materia disuelta mediante la acción de microorganismos que en presencia de procesos aeróbicos ejercen su función.

La degradación anaeróbica se lleva a cabo en varias etapas y en zonas donde no existe aporte de oxígeno disuelto y todos los microorganismos involucrados en este proceso, necesitan una fuente de energía y carbono para llevar a cabo la síntesis de nuevas células y nutrientes.

Una pequeña porción de materia orgánica es removida por procesos físicos entre los cuales destaca la sedimentación, proceso mediante el cual es factible separar la parte sólida de la líquida, en una mezcla de agua con materia sólida, por acción

de la gravedad, y finalmente la filtración, para retener el material pasante (Delgadillo et al., 2010).

Tabla 7.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo.

| Contaminante     | Flujo Superficial (FS)  | Flujo Superficial Horizontal (HFSS)  | Flujo Superficial Vertical (VFSS)  |
|------------------|---|--|--|
| Materia Orgánica | Reducción de la materia orgánica soluble por conversión biológica por efecto de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en la superficie de las plantas sobre los detritos. La materia orgánica particulada se elimina por adsorción, por filtración y por sedimentación en el fondo del lecho | Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y los detritos del medio de relleno del Wetland | Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y detritos |

### 3.2.2 Remoción de sólidos suspendidos.

La remoción de sólidos suspendidos y sedimentables presentes en las aguas residuales ocurre fundamentalmente en las unidades de tratamiento primario que permite sedimentar y los humedales que permite filtrar los remanentes de materia sólida, complementando la remoción de tratamientos previos, tomando en consideración que las raíces de las plantas macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua.

Además, estos procesos también se encargan de eliminar una porción significativa de otros agentes contaminantes presentes en las aguas residuales, tales como DBO y nutrientes patógenos.

La materia en suspensión queda retenida en los humedales mediante la combinación de diferentes fenómenos de tipo físico que en su conjunto se denominan “filtración del medio granular.

Según (American Journal of Sociology, 2019) a continuación se especifica el mecanismo de depuración para sólidos suspendidos acorde al tipo de flujo.

Tabla 8.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo.

| Contaminante        | Flujo Superficial (FS)     | Flujo Superficial Horizontal (HFSS) | Flujo Superficial Vertical (VFSS) |
|---------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Sólidos Suspendidos | Filtración y sedimentación | Filtración y sedimentación          | Filtración                        |

### 3.2.3 Remoción de nitrógeno.

Los procesos de eliminación de nitrógeno dependen de la forma que éste se encuentre: nitrógeno orgánico, nitrógeno amoniacal o nitrógeno oxidado. Entre los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales artificiales, se encuentra la volatilización, que en términos generales se trata del proceso mediante

el cual la materia sólida puede pasar a estado gaseoso por influencia de agentes externos generalmente de tipo físico químico.

En este caso se trata del proceso físico químico de transferencia de nitrógeno amoniacal que pasa desde la fase líquida a la gaseosa.

Ocurren también otros mecanismos de remoción como son la nitrificación y desnitrificación, que suceden a nivel del sustrato y tienen por objetivo la eliminación de los contaminantes contenido en un residuo.

Se trata de un proceso donde intervienen microorganismos cuyas características emergentes consisten en la acción ejercida por bacterias autótrofas que provocan la oxidación del amonio contenido, a nitrato en presencia del oxígeno del aire y carbono.

Se conoce como un proceso microbiológico y es seguido por un proceso de desnitrificación, mediante el cual este nitrato es a su vez reducido por bacterias heterótrofas, en ausencia de oxígeno y presencia del carbono orgánico.

Estos dos procesos se caracterizan porque en el caso de la nitrificación, actúa la presencia del oxígeno contenido en el aire, donde se oxida el amoníaco hasta convertirse en nitrato. Por su parte la desnitrificación consiste en un proceso que se lleva a cabo en ausencia del oxígeno donde el nitrato se transforma en nitrógeno gaseoso que posteriormente se une a los componentes de la atmósfera.

En los humedales artificiales de flujo subsuperficial, la remoción del nitrógeno sucede a menudo debido a la incorporación del nitrógeno a los tejidos de las especies vegetales de los cultivos y en menor proporción por volatilización. (Crites & Tchobanoglous, 2000)

*Tabla 9.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo.*

| Contaminante | Flujo Superficial (FS)   | Flujo Superficial Horizontal (HFSS)  | Flujo Superficial Vertical (VFSS)  |
|--------------|--|--|--|
| Nitrógeno    | Nitrificación/Desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización | Nitrificación/Desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización | Nitrificación/Desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización |

### **3.2.4 Remoción de fósforo.**

El fósforo está presente en los sistemas de recolección y tratamiento de aguas residuales, en tres presentaciones diferentes: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico.

El mecanismo para la eliminación de fósforo en los humedales artificiales son las plantas ya que pueden absorber varias formas iónicas de fósforo, principalmente durante la fotosíntesis.

Dependiendo del valor del índice de acidez, pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales construidos. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía notablemente

Según (American Journal of Sociology, 2019) se clasifica:

*Tabla 10.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales según el tipo de flujo.*

| Contaminante | Flujo Superficial (FS)   | Flujo Superficial Horizontal (HFSS)   | Flujo Superficial Vertical (VFSS)                                  |
|--------------|--|---|--|
| Fósforo      | Reducción por sedimentación y por asimilación por parte de las plantas y microorganismos | Por filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por parte de las plantas y microorganismos | Filtración, sedimentación, adsorción y asimilación por las plantas |

### **3.2.5 Remoción de agentes patógenos.**

Los agentes patógenos están presentes en casi todas las aguas residuales provenientes de uso doméstico. Suelen quedarse en la superficie y se combinan con otros agentes contaminantes y en el caso de los humedales los mismos están para promover su remoción, así como la de otros agentes contaminantes, por medio de los procesos que les son característicos.

Todos los agentes patógenos capaces de producir enfermedades pueden sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y son altamente resistentes a las bajas temperaturas con presencia de materia orgánica, como en el caso de las aguas residuales.

“Su remoción requiere de la combinación de procesos físicos, químicos y biológicos” (Delgadillo et al., 2010).

Los procesos físicos incluyen la sedimentación, filtración, adición y acción de rayos ultravioleta. Entre los mecanismos biológicos se encuentra la depredación, entendida como una interacción mediante la cual una especie animal caza a otro para alimentarse y poder subsistir y ataque por bacteriófagos, que constituye otro tipo de interacción biológica. Entre los mecanismos de tipo químico se encuentran la oxidación, adsorción y exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas.

Según American (American Journal of Sociology, 2019) clasifica acorde al flujo el mecanismo de depuración para los patógenos:

Tabla 11.- Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales, según el tipo de flujo.

| Contaminante | Flujo Superficial (FS)                                  | Flujo Superficial Horizontal (HFSS) | Flujo Superficial Vertical (VFSS)         |
|--------------|---|-------------------------------------|---|
| Patógenos    | Volatilización, adsorción, biodegradación, radiación UV | Adsorción, biodegradación           | Volatilización, adsorción, biodegradación |

### 3.3 Aspectos físicos.

Para enfatizar este tema se tomará referencias de autores como (F. Hernández, 2018); (Wallace & Knight, 2006); (Delgadillo et al., 2010), (Jan Vymazal & Kröpfelová, 2010); (Comisión Nacional del Agua, 2015) y (Cronk & Fennessy, 1988).

#### 3.3.1 Profundidad.

La profundidad de un humedal de flujo subsuperficial se determina con base en la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las macrófitas, de modo que garantice que se encuentren en contacto con el agua y tengan un efecto en el tratamiento.

En general, la profundidad del sustrato en un humedal artificial de flujo subsuperficial alcanza la profundidad de las raíces de las plantas utilizadas, las cuales suelen ser del tipo superficiales, de tal manera que las plantas estén en contacto permanente con el afluente para garantizar su efectividad en el tratamiento de las aguas. La profundidad de los humedales artificiales oscila entre **60 y 80 cm** aproximadamente. No obstante, es recomendable usar un promedio de **70 a 50 cm** de profundidad, tomando en consideración que el agua proveniente de las precipitaciones puede originar un flujo superficial. Y en todo caso **para seleccionar la profundidad adecuada**, debe tomarse en consideración el **tiempo de retención hidráulica** (TRH).

#### 3.3.2 Pendiente.

La pendiente en estos casos se requiere para facilitar el paso del agua, ya que la misma debe fluir normalmente. A los efectos, se prevé el uso de **pendiente mínima** establecida en **1%**, estimándose que es el valor requerido a los fines previstos.



### 3.3.3 Material filtrante

Las zonas de entrada y salida de las aguas residuales se rellenan con material inerte grueso o grava con tamaño de partículas de **40 a 80 mm**, a los fines de proporcionar una buena distribución del agua a lo largo de la zona de entrada y una salida uniforme del agua a lo largo del canal, dispuesto para tal fin y además evitar o al menos minimizar las obstrucciones.

En el caso de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal se recomienda que las partículas de los agregados a ser utilizados en los lechos, específicamente en las zonas de entrada y salida del agua, posean un tamaño de partículas que oscile entre **40 y 80 mm** de diámetro con el fin de minimizar las obstrucciones. Asimismo, deben extenderse desde la parte superior a la parte inferior del sistema. Mientras que, en la zona de tratamiento, el diámetro de las partículas oscila de 5 a 20 mm por cuanto allí se disponen las especies vegetales. (F. Hernández, 2018)

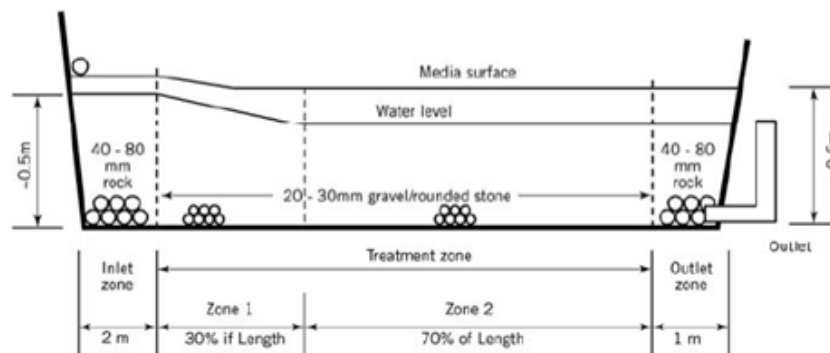


Ilustración 11.- Esquema de un humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal. Extraído de (Jan Vymazal & Kröpfelová, 2010)

### 3.3.4 Capa impermeabilizante del lecho o sellado.

En el caso de terrenos arcillosos, cuya cohesión entre partículas les confiere la propiedad como impermeabilizante, pueden llegar a proporcionar un sellado importante para el lecho. En caso de suelos permeables con predominio de partículas medias y grandes, puede usarse un aglomerante hidráulico para disminuir la permeabilidad.

La selección del tipo de impermeabilizante está en función de su disponibilidad y costo, así como de las condiciones del sitio. A continuación, en la siguiente tabla se muestran diversos tipos de permeabilización:

Tabla 12.- Ventajas y desventajas para los diferentes tipos de materiales para impermeabilización.

| Material                     | Ventajas  | Desventajas   |
|------------------------------|---|---|
| Policloruro de vinilo (PVC)  | Tiene una excelente resistencia a la abrasión y es difícil de perforar  | Los revestimientos de PVC se dañan fácilmente por los rayos ultravioleta (UV) |
|                              | Es también muy flexible, lo que permite que el revestimiento se ajusta con precisión a la base.                 |   |
|                              | Es fácil de unir, y es resistente a los productos químicos industriales más comunes                             |   |
| Poliétileno de alta densidad | Específico para condiciones extremas  | Las desventajas son el costo y la rigidez del producto.                       |
|                              | Estabilizada a los rayos UV   |   |
|                              | Excelente resistencia a rompimientos y ofrece una excepcional estabilidad dimensional.                          |   |
| Polipropileno                | Es uno de los materiales de revestimiento más duraderos (hasta 40 años)   | El polipropileno es más caro que el PVC y polietileno de alta densidad        |
|                              | El PP reforzado tiene una excelente resistencia al desgarro y a los rayos UV, y resistente a químicos.          |   |
|                              | Se trata de grandes hojas.  |   |
| Arcilla                      | Es adecuada dependiendo las condiciones locales. Puede ser suficiente una compactación del terreno con arcilla. | ---   |

### 3.3.5 Afluentes y Efluentes del humedal artificial.

En las entradas y salidas del sistema se prevé la ejecución de estructuras cuya función consiste en distribuir el caudal del agua y mantener su profundidad.

Las de entrada están constituidas por colectores superficiales y subsuperficiales dispuestos a lo ancho del humedal, que se logran con el uso de excavaciones tipo zanjás abiertas y tuberías perforadas, cuyo diámetro o sección dependiendo de la solución adoptada, depende de la velocidad del caudal.

Las salidas igualmente requieren estructuras que contribuyen con la uniformidad del caudal a través del sistema. En este caso se utiliza un colector subsuperficial perforado que se conecta con una salida provista de una compuerta ajustable.

Se recomienda que para reducir costos de operación utilizar tubería de calidad:

Tabla 13.- Materiales recomendados para tuberías de un humedal artificial.

| Material                               | Características  | Comparación  |
|--|--|--|
| Tubería de Policloruro de Vinilo (PVC) | Se considera uno de los polímeros más durables, para sistemas de tuberías tanto subterráneas como superficiales. | <ul style="list-style-type: none"> <li>• El PVC tiene un control de calidad más riguroso, además tiene un mejor rendimiento térmico.</li> </ul>                                |
| Tubería de Polietileno                 | Es el segundo termoplástico en importancia que se usa en el mercado de las tuberías.                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las uniones de PE requieren de equipos de fusión a tope.</li> <li>• Las tuberías de PVC presentan una hidráulica superior.</li> </ul> |

El tamaño de los tubos, y el tamaño y el espaciamiento de los orificios dependerán de la velocidad de flujo de aguas residuales y el sistema hidráulico de las estructuras de entrada y salida.

### 3.3.6 Geometría.

La forma geométrica en los tratamientos está ligada a la ubicación de las estructuras de entrada y salida, teniendo así influencia en el comportamiento hidráulico que se desarrolla en el humedal artificial.

Una geometría cuadrada con una relación largo/ancho 1:1 disminuye el riesgo de taponamientos, sin embargo, reduce la eficiencia de remoción de contaminantes. No obstante, se recomienda una sección rectangular con una amplia relación largo//ancho, entre ellas una relación mayor de 2:1 y menor de 4:1.

Según (Comisión Nacional del Agua, 2015) no se cuenta con estudios específicos que determinen la óptima sección, sin embargo, de manera general entre más angosto sea el canal, mayor es el riesgo de colmatación, pero también, puede asumirse que entre más angosto sea el canal, se reduce el riesgo de formación de flujos preferenciales y de zonas muertas, obteniendo mayor eficiencia en la remoción de contaminantes.

Acorde a (Delgadillo et al., 2010) recomienda una relación largo/ancho de 2:1, 3:1 y 4:1.

### **3.3.7 Biomasa en el humedal artificial.**

La biomasa es el producto de la fotosíntesis de las plantas, susceptible de convertirse en combustible a ser utilizado por el hombre en sus actividades.

“Se suele dividir en biomasa subterránea constituida por las partes de la planta que se encuentran bajo tierra: raíces, tubérculos y rizomas y biomasa aérea, constituida por aquellas partes que están fuera de la tierra, tallos, ramas, hojas y en general todas las partes vegetativas y reproductivas que se encuentran por encima del nivel del suelo” (Kadlec & Wallace, 2008).

Asociada con la biomasa, se habla de la Producción Primaria Bruta de un ecosistema, (PPB) representada por la cantidad total de energía producto de la fotosíntesis fijada por las plantas.

Normalmente se habla de la asimilación de materia orgánica por parte de una comunidad vegetal durante un periodo determinado de tiempo, incluyendo la cantidad utilizada para la respiración de las plantas. Puede ser: Producción Primaria Neta, o PPN, la cual se define como la biomasa que se incorpora a una comunidad vegetal durante un intervalo de tiempo determinado, que excluye la cantidad utilizada para la respiración.

Esta cantidad se mide mediante los métodos de cosecha denominados asimilación neta o fotosíntesis aparente.

La Producción Primaria Neta Aérea o “Aboveground” (NAPP) se define como la biomasa incorporada a las partes aéreas constituidas por tallos, hojas, ramas, flores y semillas de la comunidad vegetal. (Milner, Elfyn Hughes, Gimmingham, Miller, & Slatyer, 1970)

*Tabla 14.- Cantidad de biomasa generada por las plantas macrófitas usadas en los humedales artificiales.*

| <b>Autor</b>           | <b>Especies utilizadas para sistemas de Wetlands</b> | <b>Generación de biomasa (gr/m<sup>2</sup>*día)</b> |
|------------------------|--|---|
| (Santacruz, 2018)      | Lenteja de Agua                                      | 88.47   |
| (Canales, 2010)        | Lenteja de Agua                                      | 33.04   |
| (Quinde, 2017)         | Guadua Angustifolia (Bambú)                          | 8.33  |
| (Glas, 2000)           | Lenteja de Agua                                      | 92  |
| (Gamez & Marmol, 2020) | Guadua Angustifolia                                  | 24.5  |

*Elaboración propia.*

### **3.3.8 Respuesta de los fertilizantes.**

El crecimiento de las plantas en el humedal artificial, al igual que el de las plantas terrestres, se ven estimulados por la fertilización.

Cuando el humedal se convierte en receptor de aguas con mayor contenido en nutrientes que las que venía experimentando normalmente, se produce una repuesta lógica de la vegetación, tanto en la composición de especies como en la biomasa total. A mayor disponibilidad de nutrientes produce más vegetación durante la temporada de crecimiento, lo que significa más hojarasca durante la temporada en que cesa el crecimiento. Esta hojarasca tarda varios años en descomponerse, por lo que el conjunto total de material vivo y muerto crece lentamente a lo largo de varios años hasta alcanzar un nuevo y mayor valor.

La adición de aguas residuales al sistema suele aumentar la disponibilidad de agua y nutrientes y, en consecuencia, da lugar a la estimulación de la productividad primaria bruta y neta de estos ecosistemas.

### **3.4 Tipos de plantas utilizadas en los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal.**

En este tipo de sistemas las plantas desempeñan un papel muy importante ya que tanto la vegetación como sus restos, son estrictamente necesarios para lograr el tratamiento requerido. Poseen la capacidad de transferir el oxígeno que toman del aire hasta la raíz. Las hojas y tallos sumergidos se degradan transformándose en restos de naturaleza orgánica que sirven como sustrato, para el desarrollo de la biopelícula microbiana encargada en gran parte del tratamiento de depuración de las aguas. Por consiguiente, contribuyen a estabilizar el sustrato, permiten los procesos de incorporación de nutrientes a los tejidos vegetales, facilitan el intercambio de gases entre los componentes de la atmósfera y los sedimentos y propician la oxigenación del sustrato.

Su uso como solución alternativa se basa en los procesos biológicos propios de su especie que permiten la reducción y remoción de contaminantes presentes en las aguas residuales que, en el caso de los sistemas convencionales requieren de tratamiento secundario y terciario que encarecen el proceso. (Romero Rojas, 2008).

Según (S. Eslamian, S. Okhravi, 2019), las consideraciones de selección de las especies a plantar incluyen:

- Uso de especies macrófitas dominantes en el sitio de emplazamiento del sistema.
- Especies provistas de raíces fuertes, fibrosas y rizomas que garanticen una profunda penetración en el sustrato.
- Especies con alta densidad de tallos para que permitan la transferencia del agua.
- Especies con alta densidad de raíces.
- Especies con capacidad de transporte de oxígeno a la zona de las raíces para facilitar la oxidación de los metales tóxicos reducidos.

Las características fisiológicas y morfológicas de las macrófitas utilizadas en los humedales artificiales, definen: Plantas Enraizadas y Plantas Flotantes.

Las de forma enraizada son las plantas acuáticas más utilizadas en los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal y esta se divide en tres grupos: Sumergidas, Flotantes y Emergentes.

#### **3.4.1 Plantas sumergidas.**

Las plantas sumergidas son plantas acuáticas que crecen por debajo de la superficie del agua, toman el oxígeno disuelto y el dióxido de carbono del agua y muchas son capaces de utilizar el bicarbonato disuelto ( $\text{HCO}_3^-$ ) en la fotosíntesis. Suelen pasar todo su ciclo vital bajo la superficie del agua y se distribuyen en hábitat costeros, estuarios o tramos de río muy anchos y con caudal abundante invadido por las aguas del mar y agua dulce. La mayoría de las especies están enraizadas en el suelo. Entre ellas la *Elodea canadensis*, *Ceratophyllum demersum* y *Egeria densa*.

Los tallos y las hojas de las especies sumergidas carecen de lignina y por lo tanto sus tallos suelen ser blandos. Las hojas son alargadas algunas poseen forma de cinta, otras muy segmentadas lo que les confiere gran flexibilidad para soportar sin sufrir daños, la fuerza de las corrientes de aire y del agua. (Cronk & Fennessy, 1988)

#### **3.4.2 Plantas flotantes**

Las hojas y los tallos de las plantas flotantes, también conocidas como flotantes no adheridas, flotan en la superficie del agua. Las raíces cuelgan libres en el agua y no

están ancladas en los sedimentos. Estas plantas flotantes se mueven en la superficie del agua con los vientos y corrientes de agua.

Según (Martelo & Lara, 2012) las plantas flotantes ejercen su acción mediante tres tipos de mecanismos primarios:

- Filtración y sedimentación de sólidos.
- Incorporación de nutrientes en plantas.
- Degradación de la materia orgánica por el conjunto de microorganismos facultativos que se hallan asociados a las raíces de las plantas, y en los detritos del fondo, dependiendo del diseño.

Una familia muy extendida de plantas flotantes es la de las Lemnaceae, que incluye los géneros Lemna, lenteja de agua; Spirodela, lenteja de agua mayor y Wolffia y Wolffia harina de agua.

### **3.4.3 Plantas emergentes.**

Las plantas emergentes son plantas acuáticas cuyo medio lo constituye las aguas poco profundas con tallos y hojas fuera del agua arraigadas en el suelo pudiendo alcanzar alturas de hasta 3 m.

Están enraizadas en el suelo, arraigadas al fondo, aunque algunos de sus tallos, hojas y flores crecen fuera del agua; y porciones basales bajo la superficie del agua. Las hojas y tallos se caracterizan por ser las partes fotosintéticas.

“Entre los tipos de plantas macrófitas, las plantas emergentes son las más parecidas a las especies terrestres, por reproducirse por encima del agua y del suelo como fuente exclusiva de nutrientes” (Cronk & Fennessy, 1988).

Entre este tipo de plantas tenemos:

- Espadaña (TYPHA SP): La porción sumergida de los tallos tiene menos capacidad de filtración y soporte de crecimiento bacterial que las raíces de las plantas flotantes, pero puede extenderse a lo largo de la superficie de agua.
- Arena o Enea (Scirpues SP): Crece en sitios pantanosos hasta alcanzar 2m de altura. Los tallos son cilíndricos y sin nudos, hojas envainadoras por la base, flores en forma de espiga maciza y vellosa, utilizada como relleno. Se le conoce como espadaña y posee características similares en cuanto a su uso en el tratamiento de aguas residuales.

- Cañas: Son plantas gramíneas de tallos leñosos, huecos, flexibles, de 3 a 4m de altura y hojas anchas ásperas. Variedades típicas son la caña común (*Phragmites communis* y *Phragmites australis*), de crecimiento rápido. Sus rizomas se extienden lateralmente formando una capa muy densa. En la costa ecuatoriana existe una sola especie nativa y esa es la *Guadua angustifolia kunth*.

### **3.5 Características de la caña *Guadua angustifolia*.**

Es una planta gramínea perteneciente al grupo de las angiospermas, de la subfamilia Bambusoideae. Crecen preferencialmente en zonas cercanas a fuentes de agua. Su conformación y desarrollo permite que los tallos crezcan juntos y se entrelacen.

Sus raíces permiten la absorción de agua y nutrientes que almacenan en el rizoma, de allí que abunda en la orilla de los cursos de agua. El rizoma tiene una conformación muy particular, una parte central de la cual se desprenden filamentos laterales denominadas raicillas alimentadoras, provistas de pelos absorbentes superficiales que son las encargadas de facilitar la absorción del agua y minerales que nutren la planta.

Los rizomas y hojas en descomposición actúan como esponjas evitando que el agua contenida en su interior fluya de forma rápida, propiedad ésta que les permite actuar como reguladoras del caudal de las aguas, así como protectoras de la capa vegetal para evitar la erosión. Los tallos son leñosos y huecos, poseen nudos y entrenudos. Se utiliza como medio favorecedor del proceso utilizado por sistemas basados en soluciones alternativas para el tratamiento de aguas residuales.

Presenta condiciones aptas en cuanto a remoción en los parámetros fisicoquímicos como: demanda química de oxígeno (DQO) con un valor de 90,72% y demanda biológica de oxígeno (DBO) con un valor de 80,77 % y 8,43 mg/l de sólidos suspendidos. En cuanto a la generación de biomasa, su valor es de 8,33 gr /m<sup>2</sup>/día. La *Guadua* tiene un óptimo de temperaturas entre los 20 y 26°C, con elongaciones que pueden estar por debajo de los 11 y los 36°C. Requiere precipitaciones entre los 1300 y 4000 mm, con buena distribución a lo largo de todos los meses del año y humedad relativa del 80%.



### 3.5.1 Morfología

Las raíces están conformadas por una parte central denominada rizoma, que constituye la base de la planta dentro del suelo, consecuencia de las modificaciones de los tallos que van creciendo en sentido opuesto y cumplen un papel fundamental en obtención de agua y nutrientes.

Los tallos se denominan comúnmente culmos. Son cilíndricos leñosos y huecos y se originan en la punta del rizoma tomando una dirección ascendente o vertical y se encuentran divididos o segmentados en su interior por nudos y entrenudos que exteriormente se aprecian como anillos con diámetros y longitudes diferentes según la parte donde se ubiquen.

Las ramas se hallan dispuestas a lo largo del tallo, presentando diferentes características. En la parte cercana al rizoma se encuentran las ramas basales; el tramo siguiente esta desprovisto de ramas y el tercio final es más delgado y está provisto de ramas con hojas.

Las hojas poseen diferentes funciones y dependiendo del tramo del tallo donde se encuentren se denominan láminas foliares, de color verde oscuro, las que elaboran las sustancias nutritivas de la planta. Las hojas caulinares, cumplen funciones de protección, y se encuentran en el tallo durante los primeros meses de crecimiento, posteriormente se convierten en hojarasca.

Las semillas de la guadua se encuentran contenidas en una espiga, poseen forma y tamaño similares a los de un grano de arroz. Tiene una coloración blanca en su interior y café claro en su exterior.

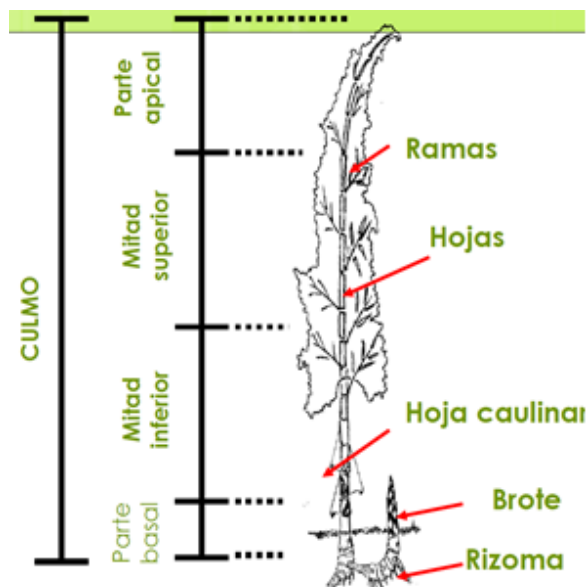


Ilustración 12.- Morfología de *Guadua Angustifolia* Kunth.

### **3.5.2 Ciclo de vida de la Guadua.**

Posee un ciclo de vida promedio de 11 años, pudiendo variar según las condiciones del sitio donde crece.

Se distinguen:

- Rebrote o renuevo: Es de color verde intenso y sus nudos con blancos. Con el transcurrir del tiempo la planta genera nuevos rebrotes que dependiendo de las condiciones climáticas y del suelo logra una altura de 10 y 13cm y diámetros que se incrementan a un promedio de 0.10 mm mensuales.
- Guadua juvenil: se denomina así la planta cuya edad oscila entre los 6 a 24 meses, cuyas raíces y tallos no han logrado el grado de resistencia ideal para ser utilizados, debido al alto contenido de humedad.
- Guadua madura: Esta fase dura entre 2 y 4 años y es la época adecuada para su aprovechamiento, porque tiene su máxima resistencia. En esta edad la guadua se caracteriza por la desaparición del lustre del entrenudo en el tallo, coloración más clara y se hace evidente la aparición de manchas de hongos.
- Guadua sobre madura: En esta fase los hongos y líquenes comienzan a desaparecer del tallo, y comienza a observarse hongos en forma de plaquetas alargadas y de color rojizo. Se inicia la decoloración y el tallo se va tornando amarillento, indicativo del inicio de la finalización del ciclo vegetativo.
- Guadua seca: Las guaduas adultas no aprovechadas están completamente degradadas, debido a la pérdida de humedad y por consiguiente escasa o nula actividad fisiológica, el tallo se torna amarillento, presenta manchas rojizas en toda su longitud y disminuye hasta el 80% de la resistencia.

### **3.5.3 Propiedades físicas de la Guadua.**

#### a. Contenido de humedad.

La humedad es una propiedad física esencial de análisis, ya que de dicho valor depende el comportamiento mecánico de la guadua. Depende de las condiciones del medio donde se encuentre, con marcadas diferencias en las distintas épocas del año y por tanto los valores son mayores en época de lluvias que en épocas de

sequía. Según (Moreno & Cendales, 2018), el contenido de humedad se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$C.H = \frac{m - m_o}{m_o} * 100\%$$

Donde:

m = Masa de la probeta antes del secado.

m<sub>o</sub> = Masa de la probeta después del secado.

Acorde a (Cobos & León, 2007), el procedimiento para aplicar la fórmula anterior consiste en un ensayo de laboratorio, mediante el cual:

- Se pesan previamente las piezas a ensayar, a una confiabilidad de 0.1gr y luego se introducen en un horno para ser secados a una temperatura de 101 a 105 °C.
- Transcurridas 24 horas la pieza debe ser analizada y verificada para calcular los pesos respectivos.
- Una vez pesadas las muestras, se procede al cálculo basándose en los resultados obtenidos en la muestra inicial y la muestra una vez secada al horno.

En un experimento realizado en el Laboratorio de Suelos y Pavimentos, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, conforme a la norma ISO/DIS-22157, los autores (Cobos & León, 2007) concluyeron que la guadua puede tener un porcentaje promedio de 30.12% de contenido de humedad, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15.- Resultados de contenido de humedad obtenido en laboratorio.

| CONTENIDO DE HUMEDAD          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| MUESTRA                       | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
| PESO DE TARA (g)              | 37,90 | 12,70 | 13,90 | 38,10 | 37,80 | 12,60 | 12,80 | 14,10 | 14,20 | 38,30 | 37,00 | 12,90 |
| PESO DE TARA+GUADÚA HUMEDA(g) | 43,00 | 18,80 | 18,40 | 43,00 | 43,10 | 18,80 | 18,90 | 18,60 | 18,80 | 43,20 | 42,00 | 19,00 |
| PESO DE TARA+GUADÚA SECA (g)  | 41,80 | 17,30 | 17,30 | 42,00 | 41,70 | 17,20 | 17,40 | 17,60 | 17,80 | 42,20 | 41,00 | 17,60 |
| PESO DE LA GUADÚA (g)         | 5,10  | 6,10  | 4,50  | 4,90  | 5,30  | 6,20  | 6,10  | 4,50  | 4,60  | 4,90  | 5,00  | 6,10  |
| PESO DE LA GUADÚA SECA (g)    | 3,90  | 4,60  | 3,40  | 3,90  | 3,90  | 4,60  | 4,60  | 3,50  | 3,60  | 3,90  | 4,00  | 4,70  |
| CONTENIDO DE HUMEDAD (%)      | 30,77 | 32,61 | 32,35 | 25,64 | 35,90 | 34,78 | 32,61 | 28,57 | 27,78 | 25,64 | 25,00 | 29,79 |
| CH PROMEDIO (%)               | 30,12 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |

Extraído de: (Cobos & León, 2007)

b. Densidad.

Se define la densidad como la magnitud referida a la cantidad de masa en un determinado volumen o unidad de volumen.

“Se define densidad como la cantidad de masa de una unidad de volumen. La densidad del culmo es medida en función de las sustancias sólidas. Existe una relación constante entre las masas y el volumen para la determinación de la densidad de las sustancias puras” (Moreno & Cendales, 2018).

El mismo autor propone la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

$m$ = Masa

$v$ = Volumen

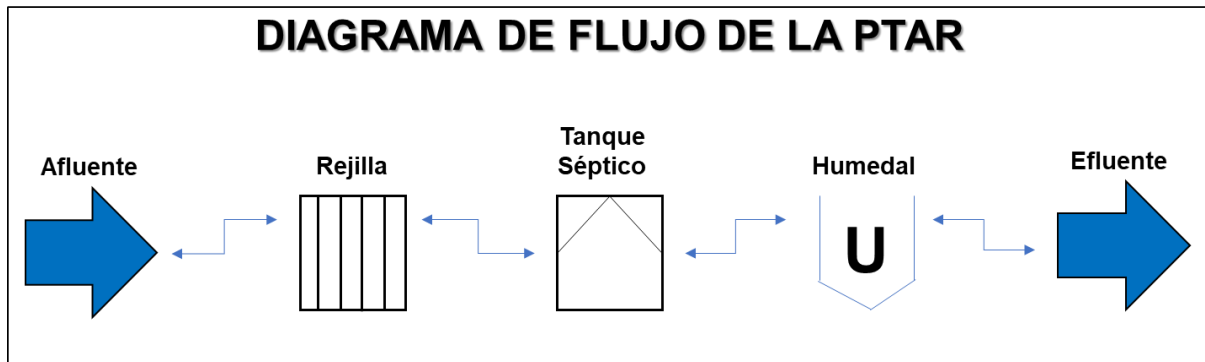
c. Durabilidad.

“La guadua tiene una alta resistencia contra el ataque de los insectos, moho y la putrefacción. Sin embargo, se debería obtener una protección contra estos tres factores, cuando la guadua este en contacto con la tierra o suelo” (Cobos & León, 2007).

d. Remoción de contaminantes.

Según (Gamez & Marmol, 2020) la caña guadua angustifolia es una planta que además de ornamental y constructiva ha reaccionado de forma favorecedora como medio para ser utilizado en los humedales artificiales, siendo así, que además de ayudar con el tratamiento de aguas residuales produce biomasa de valor económico, presenta mayor remoción en los parámetros fisicoquímicos como DQO, DBO5, nitrógeno amoniacal y fosfato, misma que se ve reflejado en la **tabla# 6**.

## CAPÍTULO IV – ASPECTOS DE DISEÑO PARA LA PTAR PARA POBLACIONES MENORES DE 1000 HAB.



### 4.1 Definir variables.

- a. Población a servir.
- b. Determinación del caudal.
- c. Caracterización de la calidad del AARR del afluente.
- d. Identificación del lugar de descarga del efluente del humedal artificial en un todo de acuerdo con las normas técnicas respectivas.
- e. Características del terreno como sitio de emplazamiento, tipo de suelo, topografía y especies de plantas de humedales artificiales nativos predominantes.

### 4.2 Datos hidrológicos y climatológicos.

- a. Condiciones y limitaciones de descarga de aguas residuales.
- b. Índice de pluviosidad. Datos históricos de precipitación media.
- c. Temperatura media.
- d. Tasa de evaporación.
- e. Determinación de las tasas de flujo de diseño y la relación área/volumen.
- f. Tiempo de retención.

### 4.3 Mecanismos de depuración.

- a. Demanda biológica de oxígeno (DBO).
- b. Demanda química de oxígeno (DQO).
- c. Sólidos suspendidos totales (SST).
- d. Nitrógeno, fósforo y coliformes fecales.

#### 4.4 Aspectos técnicos.

##### 4.4.1 Población futura.

Según el (CPE INEN, 1992) para el cálculo de la población futura se harán las proyecciones de crecimiento utilizando métodos conocidos (proyección aritmética, geométrica, incrementos diferenciales, comparativo, etc.) que permitan establecer comparaciones que orienten el criterio del proyectista.

a. Método aritmético.

$$P_f = P_{uc} + k_a(T_f - T_{uc})$$

$$k_a = \frac{P_{uc} - P_{ci}}{T_{uc} - T_{ci}}$$

Donde:

|            |                        |
|------------|------------------------|
| $P_f$ :    | Población proyectada   |
| $T_f$ :    | Año proyectado         |
| $T_{uc}$ : | Último censo           |
| $P_{uc}$ : | Población último censo |
| $K_a$ :    | Tasa de crecimiento    |

b. Método geométrico.

$$P_f = P_{uc} * (1 + r)^{(T_f - T_{uc})}$$

Donde:

|            |                           |
|------------|---------------------------|
| $P_f$ :    | Población proyectada      |
| $T_f$ :    | Año proyectado            |
| $T_{uc}$ : | Último censo              |
| $P_{uc}$ : | Población último censo    |
| $r$ :      | Tasa de crecimiento anual |

##### 4.4.2 Caudales.

a. Caudal de aguas residuales domésticas

El aporte de caudal diario del agua residual urbana se realiza a partir de la dotación y población servida, de la siguiente forma:

$$Q = \frac{DxPx C}{86400}$$

Donde :

Q= Caudal medio de las aguas residuales domésticas (l/s)

D= Consumo neto de agua potable (L/hab\*d)

C= Coeficiente de retorno (adimensional)

P= Número de habitantes de la zona

Tabla 16.- Coeficiente de retorno conforme la complejidad del sistema.

| Nivel de complejidad del sistema | Coeficiente de retorno |
|----------------------------------|------------------------|
| Bajo - Medio                     | 0,7 - 0,8              |
| Medio Alto - Alto                | 0,8 - 0,85             |

b. Caudal Máximo horario

$$Q_{m\acute{a}x_h} = Q * M$$

Según el (CPE INEN, 1992) para aquellos que no disponen de alcantarillado o donde por alguna circunstancia plenamente comprobada, no sea posible o no sean representativas las mediciones, se podrá utilizar coeficientes de mayoración de ciudades de características similares o de la literatura técnica.

Según (López, 1995) los factores de mayoración se obtiene:

- Ecuación de Babbit: Para poblaciones menores de mil habitantes.

$$M = \left[ \frac{5}{p^{0.2}} \right]$$

- Ecuación de Harmon: Para poblaciones entre mil y un millón de habitantes.

$$M = \left[ \frac{18 + p^{0.5}}{4 + p^{0.5}} \right]$$

- Ecuación de Los Ángeles: Para caudales entre 2.8 l/s y 28.3 m<sup>3</sup>/s.

$$M = \left[ \frac{3.53}{Q^{0.0914}} \right]$$

- Ecuación de Tchobanoglous: Para caudales entre 4 l/s y 5 m<sup>3</sup>/s, en poblaciones con aportes de aguas residuales domésticas superiores al 75% del total de aportes.

$$M = \left[ \frac{3.70}{Q^{0.0733}} \right]$$

c. Caudal de aguas infiltradas

Según (López, 1995) en el libro “Diseño de Acueductos y Alcantarillado” presenta algunos valores de infiltración, que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 17.- Valores típicos para caudal de infiltración según el área.

| Condiciones         | Infiltración l/s*km |       |      |
|---------------------|---------------------|-------|------|
|                     | Alta                | Media | Baja |
| Tuberías existentes | 4,0                 | 3,0   | 2,0  |
| Cemento             | 3,0                 | 2,0   | 1,0  |
| Polietileno         | 1,5                 | 1,0   | 0,5  |



También la bibliografía presenta la posibilidad de calcular el aporte por filtración en función de área drenada, estableciendo los siguientes rangos de infiltración:

- Bajo: 0.05 – 0.2 l/s\*ha
- Medio: 0.1 – 0.3 l/s\*ha
- Alto: 0.15 – 0.4 l/s\*ha

d. Caudal de aguas erradas

La bibliografía establece que cuando existe red de alcantarillado pluvial el valor puede variar de 0.1 – 0.2 l/s\*ha, mientras que, al no existir alcantarillado pluvial, el valor puede alcanzar hasta 2 l/s\*ha

e. Caudal de diseño

La siguiente expresión denota el caudal de diseño para la planta de tratamiento:

$$Q_d = Q_{\max\_h} + Q_{inf} + Q_{erra}$$

#### 4.4.3 Precipitación

Se presentan los siguientes métodos según (SIAR, 2010):

a. Porcentaje Fijo

$$P_e = a * P_t$$

a= 0.7 – 0.9

b. Precipitación Fiable

$$P_e = 0.6P_t - 10 \quad \text{Para } P_t < 70 \text{ mm}$$

$$P_e = 0.8P_t - 24 \quad \text{Para } P_t > 70 \text{ mm}$$

c. USDA SCS (P)

$$P_e = P_t \left( 125 - \frac{0.2P_t}{125} \right) \quad \text{Para } P_t < 250 \text{ mm}$$

$$P_e = 125 + 0.1P_t \quad \text{Para } P_t > 250 \text{ mm}$$

Donde:

$P_e$ = Precipitación efectiva mensual (mm)

$P_t$ = Precipitación total mensual (mm)

#### 4.4.4 Evapotranspiración

##### a. Evapotranspiración Potencial (ETP)

Es la cantidad de agua que perderá la superficie que está completamente cubierta por vegetación en crecimiento activo.

$$ETP = e * L$$

Donde:

e= Evapotranspiración mensual sin ajustar (mm)

L= Factor de corrección del número de días del mes.

$$e = 16 * \left(10 * \frac{tm}{I}\right)^a$$

Donde:

tm= Temperatura media mensual en °C

I= Índice de calor anual

a= parámetro en función de I

$$a = 0.000000675 * I^3 - 0.0000771 * I^2 + 0.01792 * I + 0.49239$$

##### b. Evapotranspiración de referencia

Es la pérdida de agua por evaporación y transpiración de un cultivo debido a condiciones climáticas. Se lo calcula a través del método Penman-Monteith:

$$ET_o = \frac{0.408 * \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 * u_2)}$$

Donde:

ET<sub>o</sub>= Evapotranspiración de referencia (mm\*día)

R<sub>n</sub>= Radiación neta en la superficie de cultivo (MJ\*m<sup>2</sup>\*día)

T= Temperatura media del aire a 2 metros de altura en °C

u<sub>2</sub>= Velocidad del viento a 2 metros de altura (m\*s<sup>-1</sup>)

e<sub>s</sub>= Presión de vapor de saturación (kPa)

e<sub>s</sub> - e<sub>a</sub>= Déficit de presión de vapor (kPa)

Δ= Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa\*°C<sup>-1</sup>)

γ= Constante psicométrica (MJ\*m<sup>2</sup>\*día<sup>-1</sup>)

c. Evapotranspiración de Cultivo (ETC)

Es aquella cuando no existe restricción de agua en el suelo y depende de los cultivos como el ritmo de desarrollo de las plantas, condiciones climáticas, viento, entre otros. Podemos obtenerla a través de:

$$ETC = K_c * ET_o$$

Donde:

ETC= Evapotranspiración de cultivo (mm/día)

ET<sub>o</sub>= Evapotranspiración de referencia (mm\*día)

K<sub>c</sub>= Coeficiente de cultivo (adimensional)

d. Evapotranspiración real (ETR)

Es la humedad existente en el suelo, debe ser inferior a la evapotranspiración potencial debido a la falta de agua en ciertos periodos. Podemos obtenerla a través de:

$$ETR = K * ETP$$

Donde:

K= 0.1 – 0.9, aproximándose a 1 cuando la planta está en su máximo desarrollo de foliación y fruto.

#### **4.4.5 Canal de llegada**

Para el diseño de un canal de llegada se debe tener en cuenta algunos elementos geométricos y factores como: tipo de material, coeficiente de rugosidad, velocidad máxima y mínima, pendiente del canal, entre otros.

- Coeficiente de Manning:

$$k = \frac{Q * \eta}{b^{8/3} * S^{1/2}}$$

Donde:

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/s)

η = Coeficiente de rugosidad de Manning (Adimensional)

b= Ancho del canal (m)

S= Pendiente del canal (m/m)

- Altura del agua:

$$h = 1.6624 * K^{0.74232} * b$$

Donde:

K= Coeficiente de Manning (adimensional)

b= Ancho del canal (m)

- Radio hidráulico (Rh):

$$R_h = \frac{b * h}{b + 2 * h}$$

Donde:

b= Base del canal (m)

h= Altura del agua (m)

- Velocidad del canal (v).

$$v = \frac{1}{\eta} * R^{2/3} * S^{1/2}$$

Donde:

R= Radio hidráulico (m)

S= pendiente (m/m)

$\eta$  = Coeficiente de rugosidad de Manning (Adimensional)

La velocidad máxima que puede soportar un canal de hormigón es de 10 m/s, la velocidad debe ser menor que **2.5 m/s** y mayor a **0.6 m/s**, para evitar la sedimentación de materiales pétreos retenidos en el canal.

#### **4.4.6 Rejilla**

- Área libre al paso del agua.

$$Al = \frac{Q}{V_b}$$

Donde:

Q= Caudal de diseño (m<sup>3</sup>/s)

V<sub>b</sub>= Velocidad mínima a través de las barras (m/s)

- Área neta proyectada de la rejilla.

$$An = \frac{s}{s + t} * Al$$

Donde:

An= Área neta proyectada (m<sup>2</sup>)

s= separación entre barrotes.

Al= Área libre al paso del agua (m<sup>2</sup>)

t= diámetro del barrote

- Velocidad de paso.

$$V_p = \frac{Q}{An}$$

Donde:

An= Área neta proyectada (m<sup>2</sup>)

Q= Caudal (m<sup>3</sup>/s)

- Número de barrotes.

$$(n + 1) * s + n(t) = b_{canal}$$

Donde:

n= número de barrotes

$b_{canal}$ = Ancho del canal (m)

t= diámetro del barrote

s= separación entre barrotes.

#### 4.4.7 Tanque Séptico

Para el dimensionamiento se implementa (ABNT, 1993) que es la Asociación Brasileña de Normas Técnicas.

##### a. Periodo de retención de desperdicios (T)

Tabla 18.- Periodo de retención de los desalojos, por rango de cotización diaria.

| Contribución diaria (L) | Tiempo de retención (T) |       |
|-------------------------|-------------------------|-------|
|                         | días                    | horas |
| Hasta 1,500             | 1.00                    | 24    |
| De 1,501 a 3,000        | 0.92                    | 22    |
| De 3,000 a 4,500        | 0.83                    | 20    |
| 4,501 a 6,000           | 0.75                    | 18    |
| 6,001 a 7,500           | 0.67                    | 16    |
| 7,501 a 9,000           | 0.58                    | 14    |
| mas de 9,000            | 0.50                    | 12    |

Elaborado por: Autor. Extraído de: (ABNT, 1993)

##### b. Contribución de aguas residuales (C) y lodo fresco (L<sub>r</sub>)

Tabla 19.- Aportación diaria de aguas residuales (C) y lodos frescos (L<sub>r</sub>) por tipo de edificio y ocupante.

| Predio  | Unidades       | Contribución de aguas residuales (C) y lodo fresco L <sub>r</sub> (L / día) |                |
|---|----------------|---|----------------|
|   |                | C   | L <sub>r</sub> |
| <b>Ocupantes permanentes</b>                  |                |   |                |
| Residencia                                    |                |   |                |
| Clase alta                                    | persona        | 160   | 1              |
| Clase media                                   | persona        | 130   | 1              |
| Clase baja                                    | persona        | 100   | 1              |
| Hotel (excepto lavandería y cocina)           | persona        | 100   | 1              |
| Alojamiento provisional                       | persona        | 80  | 1              |
| <b>Ocupantes temporales</b>                   |                |   |                |
| Fábrica en general                            | persona        | 70  | 0.30           |
| Oficinas temporales                           | persona        | 50  | 0.20           |
| Edificios públicos o comerciales              | persona        | 50  | 0.20           |
| Escuelas                                      | persona        | 50  | 0.20           |
| Bares   | persona        | 6   | 0.10           |
| Restaurantes                                  | comida         | 25  | 0.01           |
| Cines, teatros o locales de corta permanencia | local          | 2   | 0.02           |
| Baños públicos                                | tasa sanitaria | 480   | 4.0            |

Elaborado por: Autor. Extraído de: (ABNT, 1993)

##### c. Tasa total de acumulación de lodos (K)

Tabla 20.- Tasa total de acumulación de lodos (K), en días, por intervalo entre la limpieza y la temperatura del mes más frío.

| Intervalo de limpieza (años) | Valores de K por intervalo temperatura ambiente (t) en °C |             |        |
|------------------------------|---|-------------|--------|
|                              | t ≤ 10  | 10 ≤ t ≤ 20 | t ≥ 20 |
| 1                            | 94  | 65          | 57     |
| 2                            | 134   | 105         | 97     |
| 3                            | 174   | 145         | 137    |
| 4                            | 214   | 185         | 177    |
| 5                            | 254   | 225         | 217    |

Elaborado por: Autor. Extraído de: (ABNT, 1993)

d. Volumen de tanque séptico.

$$V = 1000 + N(CT + KL_f)$$

Donde:

V= Volumen útil (lts)

N= Número de personas por unidades de contribución.

C= Contribución de aguas residuales (lts/hab\*d)

T= Periodo de retención (d)

K= Tasa total de acumulación de lodos digeridos (d)

L<sub>f</sub>= Contribución de lodo fresco (l/hab\*d)

e. Medidas internas mínimas del tanque séptico.

La norma establece los siguientes parámetros para el dimensionamiento del tanque séptico:

- Profundidad útil: varía entre los valores mínimos y máximos recomendados en la tabla que se muestra a continuación y está en función del volumen útil obtenido.

Tabla 21.- Profundidad mínima y máxima utilizable por rango de volumen utilizable.

| Volúmen útil (m <sup>3</sup> ) | Profundidad útil mínima (m) | Profundidad útil máxima (m) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| hasta 6                        | 1.2                         | 2.2                         |
| de 6 a 10                      | 1.5                         | 2.5                         |
| mas de 10                      | 1.8                         | 2.8                         |

Elaborado por: Autor. Extraído de: (ABNT, 1993)

- Diámetro interno mínimo: 1.10 m
- Ancho interno mínimo: 0.8 m
- Relación de compartimiento entre largo/ancho (para tanques prismáticos rectangulares): Mínimo 2:1; máximo 4:1

f. Número de cámaras.

Se recomienda el uso de varias cámaras en serie especialmente para tanques con pequeños, con capacidad para 30 personas. Para obtener el mejor rendimiento en términos de calidad del efluente, se recomienda el siguiente número de cámaras:

- Tanques cilíndricos: tres cámaras en serie
- Tanques prismáticos rectangulares: dos cámaras en serie.

g. Otras consideraciones.

- El primer y segundo compartimiento deben tener un volumen útil respectivamente de 2/3 y 1/3 del volumen útil total.
- La longitud del primer compartimiento es de 2/3 de L y el segundo de 1/3 de L.
- El borde inferior de los orificios de paso entre los compartimientos debe ser localizados a una altura igual a los 2/3 del valor de la altura útil y debe ser medida desde el fondo.
- Los bordes superiores de estos orificios deben ser localizados a una distancia de 0.3m bajo del nivel de líquido como mínimo.
- El área total de los orificios de paso debe ser del 5 al 10% de la sección transversal útil de la fosa.
- El ancho no debe ser mayor a la profundidad ( $0.8 < b < 2h$ )

#### 4.4.8 Humedal Artificial subsuperficial de flujo horizontal.

##### h. Tiempo de retención hidráulico.

Tabla 22.- Ecuaciones utilizadas para calcular el tiempo de retención hidráulica.

| Autor                              | Ecuación   | Descripción  |
|------------------------------------|--|--|
| (Kadlec & Wallace, 2008)           | $\tau = \frac{V_{active}}{Q} = \frac{\varepsilon h A_{active}}{Q}$ | <p>Q= Flujo del agua (m<sup>3</sup>/d)</p> <p>A<sub>active</sub>= Área del humedal artificial (m<sup>2</sup>)</p> <p>h= Altura del humedal artificial (m)</p> <p>V<sub>active</sub>= Volumen del humedal artificial (m<sup>3</sup>)</p> <p>ε= Porosidad</p> <p>τ= Tiempo de retención.</p> |
| (Vymazal & Kröpfelová, 2010)       | $t = \frac{V_n}{Q} = \frac{A d n}{Q}$                              | <p>V= Volumen del humedal artificial (m<sup>3</sup>)</p> <p>n= porosidad del sustrato.</p> <p>Q= Caudal del flujo (m<sup>3</sup>/d)</p> <p>A= Área del humedal artificial (m<sup>2</sup>.)</p> <p>d= Altura del humedal artificial (m)</p>   |
| (Comisión Nacional del Agua, 2015) | $\theta_n = \frac{LWD}{Q_i}$                                       | <p>L= Largo (m)</p> <p>W= Ancho (m)</p> <p>D= Profundidad (m)</p> <p>Q<sub>i</sub>= Caudal medio (l/s)</p>   |

Elaboración propia.



i. Caudal de infiltración.

Tabla 23.- Ecuaciones utilizadas para calcular caudal de infiltración.

| Autor   | Ecuación  | Descripción   |
|---|---|---|
| (Kadlec & Wallace, 2008)                            | $Q_{gw} = KA \left[ \frac{H_w - H_{lb}}{H_{it} - H_{lb}} \right]$   | A= Área del Wetland (m <sup>2</sup> )<br>H <sub>lb</sub> = Elevación del fondo del revestimiento (m)<br>H <sub>it</sub> = Elevación de la parte superior del revestimiento (m)<br>H <sub>w</sub> = Elevación de la superficie del Wetland (m)<br>K= Línea de conductividad hidráulica (m/d)<br>Q <sub>gw</sub> = Tasa de infiltración (m <sup>3</sup> /d) |
| (Delgadillo et al., 2010)<br><br><i>Elaboración</i> | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Primario</div> $K_{sf} = 0.6 * K_s$ $Q_i = A_s * K_{sf} * 3600$ <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">Secundario</div> $Q_i = A_s * K_s * 3600$ | K <sub>sf</sub> = Conductividad Hidráulica para tratamiento primario<br>K <sub>s</sub> = Conductividad Hidráulica (m/s)<br>Q <sub>i</sub> = Caudal de infiltración (m <sup>3</sup> /h)<br>A <sub>s</sub> = Área superficial (m <sup>2</sup> )   |

propia.

j. Conductividad hidráulica

Tabla 24.- Conductividad eléctrica de suelo para humedales artificiales de flujo subsuperficiales.

| Textura del suelo                       | Conductividad hidráulica (m/d) |
|---|--------------------------------|
| Grava, arena gruesa                     | > 36                           |
| Arena gruesa, media                     | 6.0 - 36.0                     |
| Arena fina, arena arcillosa             | 2.4 - 6.0                      |
| Franco arenoso, franco                  | 1.2 - 2.4                      |
| Limo, franco limosa poroso              | 0.6 - 1.2                      |
| Franco arcillo limosa, franco arcilloso | 0.3 - 0.6                      |

Extraído de: (Comisión Nacional del Agua, 2015)

Cuando no se cuenta con datos de conductividad hidráulica, se pueden calcular de la siguiente forma:

$$K_s = 12600 * \frac{D_g^{1.9}}{10}$$

Donde:

K<sub>s</sub>= Conductividad hidráulica  $\left(\frac{m^3}{m^2*d}\right)$

D<sub>g</sub>= Diámetro de grava media (mm)

10 = Constante

k. Porosidad del medio filtrante.

Tabla 25.- Características típicas del medio filtrante para humedales artificiales de flujo subsuperficial.

| Tipo de medio   | Tamaño efectivo (mm) | Porosidad (%) |
|-----------------|----------------------|---------------|
| Arena de cuarzo | 2                    | 32            |
| Arena graduada  | 8                    | 35            |
| Grava fina      | 16                   | 38            |
| Grava media     | 32                   | 40            |
| Roca de cuarzo  | 128                  | 45            |

Extraído de: (Comisión Nacional del Agua, 2015)

l. Remoción de DBO para humedal artificial de flujo subsuperficial.

Tabla 26.- Ecuaciones para determinar la remoción de DBO.

| Autor                     | Ecuación   | Descripción   |
|---------------------------|--|---|
| (Delgadillo et al., 2010) | $AS = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{K_T * h * \eta}$ $KT = 1,104 * 1,06^{T_2 - 20}$ | Q= Caudal de diseño del Wetland (m3/día)<br>C= Concentración de DBO <sub>5</sub> efluente (mg/l)<br>C <sub>0</sub> = Concentración de DBO <sub>5</sub> afluente (mg/l)<br>K <sub>T</sub> = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura<br>h= Profundidad del Wetland (m)<br>η= Porosidad del medio granular (porcentaje expresado en fracción)<br>T <sub>2</sub> = temperatura del agua (°C). |
| (EPA, 1993)               | $A_s = \frac{Q(\ln C_o - \ln C_c)}{K_{v,t} D_M \eta}$ $K_{v,t} = K_{v,20} \theta^{T-20}$       | A <sub>s</sub> = Área superficial del humedal (m <sup>2</sup> ).<br>Q= Caudal del afluente (l/s)<br>K <sub>v,t</sub> = Constante cinética de primer orden (1/d)<br>D <sub>M</sub> = Propuesta de profundidad de lecho (m)<br>η= Porosidad (fracción)<br>T= Temperatura promedio del agua, °C<br>θ= Coeficiente de Arrhenius.  |

Elaboración propia.

Para humedales de flujo subsuperficial K<sub>v,20</sub> es igual a **1.104 d<sup>-1</sup>**, con θ igual a **1.06**.

**m. Remoción de nitrógeno para humedal artificial de flujo subsuperficial.**

Tabla 27.- Ecuación para determinar la remoción de nitrógeno.

| Autor                        | Ecuación  | Descripción  |
|------------------------------|---|--|
| (Reed, Crites, & E.J., 1995) | $AS = \frac{Q * \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{K_T * y * \eta}$ $K_T = K_{NH} * 1,048^{T-20}$ $K_{NH} = 0,01854 + 0,3922r_z^{2,6077}$ | <p>C<sub>0</sub>= Concentración de N en el afluente (mg/l)<br/>                     C<sub>e</sub>= Concentración de N en el efluente (mg/l)<br/>                     A<sub>s</sub>= Área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)<br/>                     r<sub>z</sub>= Porcentaje de la profundidad del lecho del humedal SF ocupado por zona de raíces (decimal de 0 a 1)<br/>                     y= Profundidad promedio del sistema.<br/>                     η= Porosidad promedio del sistema.</p> |
| (Kadlec & Wallace, 2008)     | $AS = \frac{Q}{K} \ln\left(\frac{C_0 - C}{C_e - C}\right)$  | <p>C<sub>0</sub>= Concentración de N en el afluente (mg/l)<br/>                     C<sub>e</sub>= Concentración de N en el efluente (mg/l)<br/>                     C= Concentración de fondo (g/m<sup>3</sup>)<br/>                     A<sub>s</sub>= Área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)<br/>                     k= Constante de primer orden (m/d).</p>   |

Elaboración propia.

**n. Remoción de Fósforo para humedal artificial de flujo subsuperficial.**

Tabla 28.- Ecuación para determinar la remoción de fósforo.

| Autor                        | Ecuación   | Descripción  |
|------------------------------|--|--|
| (Reed, Crites, & E.J., 1995) | $AS = \frac{b * Q * \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{K_p}$ | <p>C<sub>0</sub>= Concentración de N en el afluente (mg/l)<br/>                     C<sub>e</sub>= Concentración de N en el efluente (mg/l)<br/>                     b= Factor de conversión (100 cm/m)<br/>                     A<sub>s</sub>= Área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)<br/>                     k<sub>p</sub>= Constante de primer orden (2.74 cm/d).<br/>                     Q= Caudal (m<sup>3</sup>/d)</p> |
| (Kadlec & Wallace, 2008)     | $AS = \frac{b * Q * \ln\left(\frac{C_0}{C_e}\right)}{K_p}$ | <p>C<sub>0</sub>= Concentración de N en el afluente (mg/l)<br/>                     C<sub>e</sub>= Concentración de N en el efluente (mg/l)<br/>                     b= Factor de conversión (100 cm/m)<br/>                     A<sub>s</sub>= Área superficial del humedal (m<sup>2</sup>)<br/>                     k<sub>p</sub>= Constante de primer orden (2.74 cm/d).<br/>                     Q= Caudal (m<sup>3</sup>/d)</p> |

Elaboración propia

**o. Concentración estimada de remoción de sólidos totales**

*Tabla 29.- Ecuación para determinar la remoción de sólidos totales.*

| Autor                        | Ecuación                          | Descripción                                    |
|------------------------------|-----------------------------------|--|
| (Kadlec & Wallace, 2008)     | ---                               | No tiene modelo propuesto                      |
| (Reed, Crites, & E.J., 1995) | $C_e = C_o(0.1085 + 0.0014 * CH)$ | Ce= Concentración de SST en el afluente (mg/l) |

*Elaboración propia*

**p. Relación Largo/Ancho**

Escoger la relación largo/ancho, conforme a las recomendaciones dadas en el **Capítulo III**, sección “**Geometría**”. Por consiguiente, en base a lo investigado se escoge una relación **2:1**. A su vez se plantea la siguiente ecuación:

*Tabla 30.- Ecuación para calcular la relación larga/ancho.*

| Autor                     | Ecuación            |
|---------------------------|---------------------|
| (Delgadillo et al., 2010) | $L = \frac{A_s}{w}$ |

*Elaboración propia*

**q. Profundidad**

Escoger la profundidad, conforme a las recomendaciones dadas en el **Capítulo II**, sección “**Profundidad**”. Por consiguiente, en base a lo investigado se escoge una profundidad de **60 cm**.

**r. Sistema de drenaje.**

El diseño del sistema de drenaje debe garantizar la conducción de las aguas residuales hacia la entrada del sistema, e igualmente que el agua tratada fluya eficazmente.

Las tuberías del sistema deben ser de materiales resistentes a la corrosión con uniones que soporten la presión ejercida por el caudal de las aguas y diseñadas de forma tal que no requieran mantenimiento. La elección del material debe estar en función de la resistencia a la acción de agentes atmosféricos, para evitar su deterioro.

Todas las tuberías y específicamente las uniones deben someterse previamente a la acción de la presión ejercida por el agua al objeto de garantizar su eficiencia y permitir el flujo normal de las aguas tanto residuales como tratadas.

s. Siembra de especies.

Según (Comisión Nacional del Agua, 2015) recomienda realizar la siembra a una distancia de **separación** de **1 m**. Sin embargo, es posible la siembra con distancias entre **50 y 75 cm**, cuando se requiera acelerar el desarrollo de la vegetación para que luzca densa y verde.

También se deben tener las siguientes recomendaciones:

- a. Considerar plantas autóctonas de la zona de emplazamiento del sistema, libres de enfermedades y moho.
- b. Las raíces deben mantenerse húmedas, evitar exponerlas al aire.
- c. Las raíces deben introducirse en el lecho de cultivo a una profundidad de 5 – 10 cm con los brotes expuestos, mínimo 6 semanas antes de inundar el humedal y preferiblemente en época de verano.
- d. Antes de realizar el traslado de las macrófitas ya deben estar realizados los pozos en donde van a ser sembradas con profundidad aproximada de **30 y 40 cm**.
- e. El agua no debe estar por encima de la superficie superior del medio de plantación.

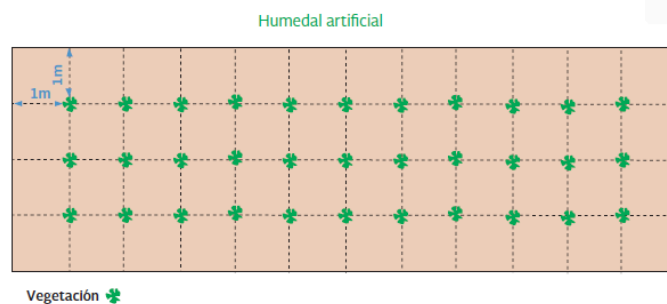


Ilustración 13.- Esquema de la distancia de siembra.

Ecuación para determinar la cantidad de macrófitas que necesita el humedal artificial según (Comisión Nacional del Agua, 2015):

$$Nv = \left( \frac{L}{d_{M-M}} - 1 \right) \left( \frac{W}{d_{M-M}} - 1 \right)$$

Donde:

$d_{M-M}$ = Distancia entre macrófita y macrófita (m)

$L$ = Longitud del humedal artificial (m)

$W$ = Ancho del humedal artificial (m)

## CAPÍTULO V – DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.

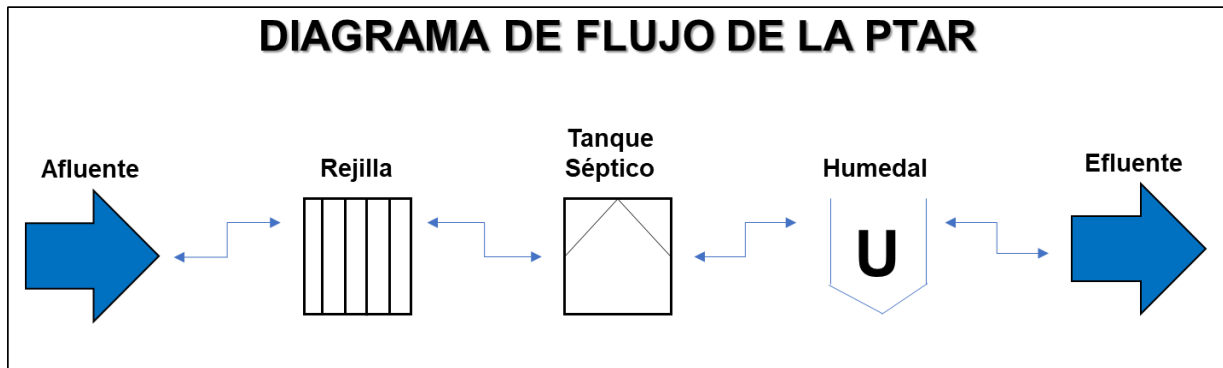


Ilustración 14.- Diagrama de flujo de la PTAR con humedal Artificial. Caso de estudio. Elaboración Propia.

Para el desarrollo de este ítem se asume un caso de estudio tomando aspectos como:

- Población de diseño: 1000 habitantes.
- Dotación: 120 lt/hab-d
- Tratamiento preliminar: Canal de llegada y rejilla.
- Tratamiento Primario: Tanque Séptico.
- Tratamiento Secundario: Humedal Superficial Subsuperficial de flujo Horizontal.
- Para las concentraciones de los parámetros de DBO, SST, N, P y Coliformes, se consideran valores típicos de AARR domestica por Metcalf & Eddy, 1995, misma que se reflejan en la **tabla# 31** y remarcadas.
- Para el tanque séptico según (ABNT, 1993) una eficiencia del 40% para DBO y 65% SST, mientras que para el humedal se obtiene un porcentaje promedio de eficiencias conforme la **tabla# 6**, por ende, se obtiene un 78,99% para DBO, 80,41% para SST, 56,94% para P, 63,71% para N y 90% para Coliformes. Con dichos porcentajes se estaría cumpliendo con los parámetros de descarga a agua dulce de la norma vigente en el país (**Ver Anexo I**).

Tabla 31.- Aportes per cápita para aguas residuales domésticas

| CONSTITUYENTES                          | CONCENTRACIÓN                     |                                   |                                   |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|   | BAJA                              | MEDIA                             | ALTA                              |
| - Sólidos Totales                       | 350                               | 720                               | 1200                              |
| Disueltos Totales                       | 250                               | 500                               | 850                               |
| Fijos                                   | 145                               | 300                               | 525                               |
| Volátiles                               | 105                               | 200                               | 325                               |
| Suspendidos Totales                     | 100                               | 220                               | 350                               |
| Fijos                                   | 20                                | 55                                | 75                                |
| Volátiles                               | 80                                | 165                               | 275                               |
| - Sólidos Sedimentables                 | 5                                 | 10                                | 20                                |
| - DBO <sub>5</sub> a 20°C               | 110                               | 220                               | 400                               |
| - DQO                                   | 250                               | 500                               | 1000                              |
| - COT                                   | 80                                | 160                               | 290                               |
| - Nitrógeno (total como N)              | 20                                | 40                                | 85                                |
| Orgánico                                | 8                                 | 15                                | 35                                |
| Amoniaco libre                          | 12                                | 25                                | 50                                |
| Nitritos                                | 0                                 | 0                                 | 0                                 |
| Nitratos                                | 0                                 | 0                                 | 0                                 |
| - Fósforo (total como P)                | 4                                 | 8                                 | 15                                |
| Orgánico                                | 1                                 | 3                                 | 5                                 |
| Inorgánico                              | 3                                 | 5                                 | 10                                |
| - Cloruros                              | 30                                | 50                                | 100                               |
| - Sulfato                               | 20                                | 30                                | 50                                |
| - Alcalinidad (como CaCO <sub>3</sub> ) | 50                                | 100                               | 200                               |
| - Grasa                                 | 50                                | 100                               | 150                               |
| - Coliformes totales (n.º/100ml)        | 10 <sup>6</sup> - 10 <sup>7</sup> | 10 <sup>7</sup> - 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>7</sup> - 10 <sup>9</sup> |

Nota: Concentraciones en mg/l.

### 5.1.1 Caudal de diseño

Tabla 32.- Cálculo de caudal de diseño.

| Parámetro                    | Abreviatura | Valor  | Unidades     |
|------------------------------|-------------|--------|--------------|
| Población de diseño          | P           | 1000   | hab          |
| Dotación                     | D           | 120    | lt/hab-d     |
| Coefficiente de retorno      | C           | 0,70   | Adimensional |
| Caudal Doméstico             | Qd          | 0,97   | lt/s         |
| Coefficiente de mayorización | F           | 5,00   | adimensional |
| Caudal Máximo horario        | Qmax_h      | 4,86   | lt/s         |
| Caudal de infiltración       | Qinf        | 0,15   | lt/s         |
| Caudal erradas               | Qerr        | 1,00   | lt/s         |
| Caudal de diseño             | Qd          | 6,01   | lt/s         |
|                              |             | 519,26 | m3/d         |



### 5.1.2 Canal de llegada

Tabla 33.- Parámetros para dimensionar el canal de llegada.

| Parámetro                | Abreviatura | Valor  | Unidades          |
|--------------------------|-------------|--------|-------------------|
| Caudal de diseño         | Qd          | 519,26 | L/s               |
|                          | Qd          | 0,519  | m <sup>3</sup> /s |
| Base (Propuesta)         | b           | 0,35   | m                 |
| Coeficiente de rugosidad | $\eta$      | 0,015  | Hormigón          |
| Pendiente                | S           | 1      | %                 |

Tabla 34.- Diseño final del canal de llegada.

| Parámetro                   | Abreviatura | Valor | Unidad         |
|-----------------------------|-------------|-------|----------------|
| Coeficiente de manning      | k           | 4,05  | -              |
| Altura del agua en el canal | h           | 1,64  | m              |
| Radio Hidráulico            | Rh          | 0,16  | m              |
| Velocidad                   | v           | 1,95  | m/s            |
| <b>DISEÑO FINAL</b>         |             |       |                |
| Base                        | b           | 0,35  | m              |
| espesor                     | e           | 0,2   | m              |
| Largo                       | L           | 2,00  | m              |
| Altura                      | h           | 1,64  | m              |
| Borde libre                 | Bo          | 0,30  | m              |
| Altura total                | ht          | 2,00  | m              |
| Área Obtenida               | Ap          | 0,70  | m <sup>2</sup> |
| Pendiente                   | S           | 1,00  | %              |

### 5.1.3 Rejilla

Tabla 35.- Parámetro de diseño para la rejilla.

| Parámetro                           | Abreviatura               | Valor | Unidad            |
|-------------------------------------|---------------------------|-------|-------------------|
| Caudal de diseño                    | Qd                        | 0,519 | m <sup>3</sup> /s |
| Tipo de rejilla                     | <b>De limpieza manual</b> |       |                   |
| Velocidad entre las barras          | Vb                        | 0,30  | m/s               |
| Ancho del canal de llegada          | b                         | 0,35  | m                 |
| Ángulo de inclinación de las barras | $\theta$                  | 45    | °                 |
| Separación entre barras             | s                         | 0,025 | m                 |
| Diámetro de la varilla              | $\varnothing$             | 12    | mm                |
| Coeficiente de pérdidas             | $\beta$                   | 2,42  | -                 |

Tabla 36.- Diseño final de la rejilla.

| Parámetro                  | Abreviatura | Valor | Unidad         |
|----------------------------|-------------|-------|----------------|
| Área libre de paso de agua | Al          | 1,73  | m <sup>2</sup> |
| Área neta                  | An          | 1,17  | m <sup>2</sup> |
| Velocidad de paso          | Vp          | 0,44  | m/s            |
| Longitud de las barras     | Lb          | 2,83  | m              |
| Número de barras           | n           | 9     | barras         |
| Altura                     | h           | 2,00  | m              |
| Área total de las rejillas | A           | 0,70  | m              |

### 5.1.4 Tanque Séptico

Tabla 37.- Parámetros para diseño de tanque séptico.

| Parámetro                                    | Abreviatura | Valor  | Unidades  |
|--|-------------|--------|-----------|
| Población de diseño                          | P           | 1000   | hab       |
| Contribución de aguas residuales por persona | C           | 120    | l/hab-día |
| Contribución de aguas residuales total       | Ct          | 120000 | l/día     |
| Tiempo de retención (T)                      | T           | 0,5    | días      |
| Tasa de acumulación de lodos digeridos       | K           | 57     | días      |
| Contribución de lodos frescos                | Lf          | 1      | l/hab-día |

Tabla 38.- Volumen, base y longitud del tanque séptico.

|                                    |               |            |
|------------------------------------|---------------|------------|
| <b>Vu =</b>                        | <b>118000</b> | <b>lts</b> |
| <b>Número de Tanques Sépticos=</b> | <b>3</b>      |            |
| <b>Vu =</b>                        | <b>39333</b>  | <b>lts</b> |

| Abreviatura | Valor | Unidad         |
|-------------|-------|----------------|
| L/b         | 4     | ---            |
| h           | 2     | m              |
| Vu          | 39    | m <sup>3</sup> |

|            |          |          |
|------------|----------|----------|
| <b>b =</b> | <b>2</b> | <b>m</b> |
|------------|----------|----------|

|            |            |          |
|------------|------------|----------|
| <b>L =</b> | <b>8,0</b> | <b>m</b> |
|------------|------------|----------|

Se pretende realizar doble compartimiento, como resultado se tiene:

- Longitud del primero compartimiento:

|             |            |          |
|-------------|------------|----------|
| <b>L1 =</b> | <b>5,3</b> | <b>m</b> |
|-------------|------------|----------|

- Longitud de segundo compartimiento:

|             |            |          |
|-------------|------------|----------|
| <b>L2 =</b> | <b>2,7</b> | <b>m</b> |
|-------------|------------|----------|

Tabla 39.- Borde superior e inferior y área de paso de orificios.

|             |             |          |
|-------------|-------------|----------|
| <b>Bl =</b> | <b>1,33</b> | <b>m</b> |
|-------------|-------------|----------|

|             |             |          |
|-------------|-------------|----------|
| <b>BS =</b> | <b>0,30</b> | <b>m</b> |
|-------------|-------------|----------|

|             |             |                      |
|-------------|-------------|----------------------|
| <b>Ao =</b> | <b>0,20</b> | <b>m<sup>2</sup></b> |
|-------------|-------------|----------------------|

Tabla 40.- Altura adicional libre y altura total.

|            |             |          |
|------------|-------------|----------|
| <b>Y =</b> | <b>0,30</b> | <b>m</b> |
|------------|-------------|----------|

|             |             |          |
|-------------|-------------|----------|
| <b>Ht =</b> | <b>2,30</b> | <b>m</b> |
|-------------|-------------|----------|

Tabla 41.- Remoción de contaminantes (DBO y SST)

| Remoción de contaminantes |            |      |
|---------------------------|------------|------|
| <b>DBO (40%)</b>          | <b>132</b> | mg/l |
| <b>SST (65%)</b>          | <b>252</b> | mg/l |

### 5.1.5 Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

Tabla 42.- Parámetro de diseño para el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

| Parámetro                                    | Abreviatura | Valor     | Unidad            |
|--|-------------|-----------|-------------------|
| Caudal de diseño                             | Q           | 519,26    | m <sup>3</sup> /d |
|  |             | 0,006     | m <sup>3</sup> /s |
| Concentración de efluente DBO (AI 78,99%)    | Cc          | 27,73     | mg/l              |
| Concentración de afluente DBO                | Co          | 132       | mg/l              |
| Concentración de efluente N (AI 63,71%)      | Cc          | 14,52     | mg/l              |
| Concentración de afluente N                  | Co          | 40        | mg/l              |
| Concentración de afluente SST                | Co          | 252       | mg/l              |
| Concentración de efluente P (AI 56,94%)      | Cc          | 3,44      | mg/l              |
| Concentración del afluente P                 | Co          | 8         | mg/l              |
| Concentración de efluente Coliforme (AI 90%) | Cc          | 100000,00 | mg/l              |
| Concentración del afluente Coliforme         | Co          | 1,00E+06  | mg/l              |
| Profundidad                                  | h           | 0,6       | m                 |
| Porosidad                                    | n           | 0,4       | ---               |
| Temperatura                                  | T           | 25,5      | °C                |
| Kv,20  | ---         | 1,104     | d-1               |
| Constante de 1er orden                       | Kp          | 2,74      | cm/d              |
| Factor de conversión                         | b           | 100       | cm/m              |
| Coefficiente de Arrhenius                    | $\theta$    | 1,06      | ---               |
| Diámetro de la grava                         | Dg          | 40        | mm                |
| Pendiente                                    | s           | 1         | %                 |

Tabla 43.- Área para remoción de DBO del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método EPA.

| Área para remoción de DBO |                |                |
|---------------------------|----------------|----------------|
| Abreviatura               | Valor          | Unidades       |
| Kv,t                      | 1,52           | ---            |
| ln Co - ln Cc             | 1,56           | ---            |
| As                        | <b>2219,36</b> | m <sup>2</sup> |

Tabla 44.- Área para remoción de Nitrógeno del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método Reed, Crites & E.J.

| Área para remoción de Nitrógeno |                 |                |
|---------------------------------|-----------------|----------------|
| Abreviatura                     | Valor           | Unidades       |
| Knh                             | 0,11            | ---            |
| Kt                              | 0,14            | ---            |
| ln (Co/Cc)                      | 1,01            | ---            |
| As                              | <b>16037,70</b> | m <sup>2</sup> |

Tabla 45.- Área para remoción de Fósforo del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método Reed, Crites & E.J..

| <b>Área para remoción de Fósforo</b> |                 |                 |
|--------------------------------------|-----------------|-----------------|
| <b>Abreviatura</b>                   | <b>Valor</b>    | <b>Unidades</b> |
| In (Co/Cc)                           | 0,84            | ---             |
| As                                   | <b>15994,16</b> | m <sup>2</sup>  |

Como se observa en el cálculo anterior la eliminación de nitrógeno y fósforo requiere de un área demasiado grande, implicando ser poco rentable. Por ende, se selecciona el área para el DBO y con 3 humedales, siendo, el nuevo área para 1 humedal:

| <b>Número de Humedales =</b> |               |                |
|------------------------------|---------------|----------------|
| As                           | <b>739,79</b> | m <sup>2</sup> |

Tabla 46.- Relación largo/ancho del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal.

| <b>Relación Largo/Ancho (4:1)</b> |              |               |
|-----------------------------------|--------------|---------------|
| <b>Abreviatura</b>                | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |
| w                                 | <b>14,00</b> | m             |
| L                                 | <b>53,00</b> | m             |

Tabla 47.- Tiempo de retención hidráulica del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método de la Comisión Nacional del Agua.

| <b>Tiempo de retención hidráulica</b> |              |               |
|---------------------------------------|--------------|---------------|
| <b>Abreviatura</b>                    | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |
| tn                                    | <b>0,34</b>  | d             |
|                                       | <b>8</b>     | horas         |

Tabla 48.- Caudal de infiltración y velocidad de infiltración del humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal a través del método de Delgadillo.

| <b>Caudal de infiltración</b> |              |                   |
|-------------------------------|--------------|-------------------|
| <b>Abreviatura</b>            | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b>     |
| Ksf                           | <b>21,6</b>  | m/d               |
| Qi                            | <b>1997</b>  | m <sup>3</sup> /h |
| Vi                            | <b>0,90</b>  | m/h               |

Tabla 49.- Cantidad de macrófitas con 2 m de separación para el humedal artificial.

| <b>Cantidad de macrófitas</b> |              |               |
|-------------------------------|--------------|---------------|
| <b>Abreviatura</b>            | <b>Valor</b> | <b>Unidad</b> |
| dm-m                          | <b>2</b>     | m             |
| L                             | <b>53</b>    | m             |
| W                             | <b>14</b>    | m             |
| Nv                            | <b>153</b>   | m/h           |

Tabla 50.- Concentración estimada de remoción para SST.

| <b>Concentración estimada de SST</b> |              |                 |
|--------------------------------------|--------------|-----------------|
| <b>Abreviatura</b>                   | <b>Valor</b> | <b>Unidades</b> |
| CH                                   | <b>23,4</b>  | cm/d            |
| Ce                                   | <b>41,26</b> | mg/l            |

## CAPÍTULO VI – OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA

A los efectos, debe tomarse en cuenta que, para lograr la eficiencias requeridas, el sistema debe precisar de realizar una serie de operaciones relacionadas directamente con su funcionamiento desde su puesta en marcha, así como operaciones rutinarias.

### 6.1 Medidas generales y equipos de protección.

- Mantener a la vista las señalizaciones de prevención para evitar cualquier percance.
- Antes de realizar cualquier actividad rutinaria el operario debe mantener las medidas de higiene respectivas, como lavarse las manos con agua limpia y jabón.
- Al término de la jornada dejar las prendas de vestir, guantes y botas en el lugar correspondiente y lavarse las manos con agua limpia y jabón para evitar contaminación indeseable.
- Las herramientas de trabajo como palas, picos y rastrillos deberán ser lavados con agua limpia antes de ser guardados.
- **NO** puede permitirse el tránsito de personas o animales en zonas no autorizadas.
- El personal involucrado en el control del sistema deberá bajo asistencia médica ser vacunado contra el tétano, tifoidea, COVID-19 y cuando se considere necesario contra la fiebre amarilla.
- En sitios visibles y accesibles debe mantenerse un botiquín de primeros auxilios, el cual, deberá estar continuamente abastecido.
- Como EPP el personal a cargo de la planta deberá llevar: protección para la cabeza, auditiva y visual, protección respiratoria, protección para manos, overol y protección para pies. Tal como se muestra en la **ilustración# 15**.

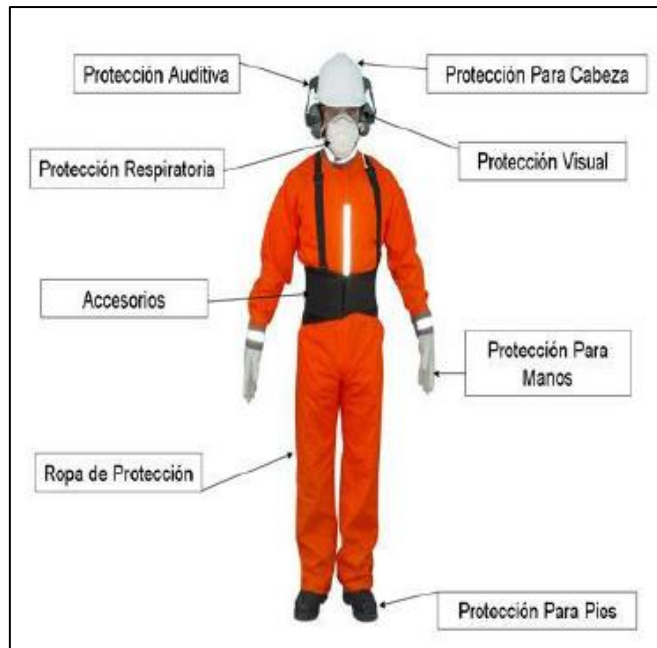


Ilustración 15.- Equipos de medida de seguridad del personal.

## 6.2 Mantenimiento de rejillas.

### 6.2.1 Función del operador

- Retirar las basuras retenidas, 2 veces al día en época de sequía; 3 a 4 veces al día en temporada de lluvias.
- Llevar un registro de las actividades de operación y mantenimiento que realiza el operador en las rejillas. A través de un formato, por ejemplo:

Tabla 51.- Formato de registro de limpieza de las rejillas.

| MES   | AÑO              | OPERADOR |         |  |
|-------|------------------|----------|---------|--|
| FECHA | RETIRO DE BASURA |          |         |  |
|       | 2 VECES          | 3 VECES  | 4 VECES |  |
|       |                  |          |         |  |
|       |                  |          |         |  |
|       |                  |          |         |  |
|       |                  |          |         |  |

Extraído de Soares (2013)

- Avisar a la entidad correspondiente, para que aplique las medidas correctoras cuando se requieran intervenciones que queden fuera de su alcance.
- Tener un registro de incidencias y medidas correctoras. A través de un formato, por ejemplo:

Tabla 52.- Formato de registro de incidencias y medidas correctoras en las rejillas.

| MES   | AÑO                 | OPERADOR |                                      |       |
|-------|---------------------|----------|--------------------------------------|-------|
| FECHA | INCIDENCIAS         |          | MEDIDAS CORRECTORAS                  |       |
|       | Retención de caudal | Otras    | Aumento de la frecuencia de limpieza | Otras |
|       |                     |          |                                      |       |
|       |                     |          |                                      |       |
|       |                     |          |                                      |       |
|       |                     |          |                                      |       |

## 6.3 Tanque Séptico

### 6.3.1 Funciones del Operador

Según (Municipalidad de Codo de Pozuzo, 2017) y (Tutillo, 2012) recomiendan lo siguiente:

- a. Si hay deterioros en las tapas de los buzones de inspección cambiar por otra con características similares.
- b. Realizar los controles de caudal del afluente y efluente del sistema en una bitácora
- c. Detectar paredes con grietas, fisuras o deterioro evidente.
- d. Debe realizarse mantenimiento preventivo. Esta actividad debe ejecutarse por lo menos una vez al año.
- e. Verificación del nivel de los lodos en el fondo: esto se hará a través de los registros a la entrada y salida del tanque. Para evitar la contaminación con las grasas, es posible medir la cantidad de lodos acumulados en el fondo del tanque: introduciendo por las T instaladas, una vara con un pedazo de tela o mechas amarradas en la punta de la vara. De esta manera, por impregnación es posible registrar y medir la cantidad de lodos acumulados en el fondo del tanque.
- f. Verificación del espesor de la capa de las natas flotando: en forma semejante, con la ayuda de un instrumento como una pieza de madera con un final en “L” y por medio de los registros o entradas superiores, se puede inspeccionar el espesor de la capa de natas. Se mide la profundidad a la que se encuentra la boca inferior de la T de salida y la profundidad de la parte inferior de las natas.

### 6.3.2 Eliminación de lodos y escorias

Según (ABNT, 1993) y (Tutillo, 2012) recomiendan lo siguiente:



- a. La remoción de lodos deberá ser realizada por personal capacitado, que disponga del equipo adecuado para garantizar que no haya contacto entre el lodo y las personas.
- b. Antes de realizar cualquier operación en el interior de los depósitos, las tapas deben mantenerse abiertas el tiempo suficiente para eliminar los gases tóxicos o explosivos, mínimo: 5 min.
- c. Las tapas de los depósitos deben ser accesibles para facilitar su mantenimiento.
- d. Cualquier revestimiento del suelo ejecutado en la zona de los tanques sépticos no deberá impedir la apertura de las tapas.
- e. Utilizar la apertura mayor ubicada en la tapa superior de los tanques.
- f. Mezclar el contenido del tanque para revolver su contenido y poder luego extraer material “viejo” y material “fresco” simultáneamente.
- g. Extraer los lodos o sólidos depositados en el fondo del tanque y las natas que flotan.
- h. Al realizar la extracción, en el caso de no contar con equipo de bombeo apropiado, se podrán extraer los lodos y líquidos con baldes que se van depositando en recipientes mayores, con tapa (pueden ser estañones u otros similares).
- i. De un tanque, se debe extraer solamente el 80% de su contenido, dejando dentro de él un volumen equivalente al 20% del total, este material se deja como “semilla” de bacterias acticas, para que el funcionamiento del sistema de tratamiento continúe, con material biológico apropiadamente adaptado.
- j. Los lodos y escorias extraídos de los tanques sépticos no se verterán en ningún caso en masas de agua o canales de aguas pluviales, deberán ser depositadas en zonas aprobadas por el organismo responsable del alcantarillado sanitario
- k. En el caso de los tanques sépticos para las comunidades aisladas, debe preverse a la implantación de lechos de secado, diseñados de acuerdo con normas específicas. Estos deben estar situados a una altura adecuada para la eliminación final o el retorno de los efluentes líquidos a los depósitos.

- I. Cuando una comunidad no dispone de un sistema de recogida de aguas residuales, hay que consultar a los organismos de medio ambiente, salud y saneamiento sobre lo que hay que hacer para que los lodos recogidos de las fosas sépticas puedan ser tratados, deshidratados y eliminados sin perjudicar la salud ni el medio ambiente.

#### **6.4 Humedales artificiales.**

Según (Soares, 2013) y (Municipalidad de Codo de Pozuzo, 2017) recomienda lo siguiente:

##### **6.4.1 Funciones del operador.**

- a. Realizar los controles de caudal del afluente y efluente del sistema en una bitácora.
- b. Verificar periódicamente los niveles del agua residual, por cuanto los mismos pueden llegar a experimentar variaciones significativas por pérdidas de agua debido a obstrucciones en las salidas, grietas o fisuras en las estructuras o en la capa impermeabilizante, así como aumento por efecto de las aguas de lluvia. En el caso de Humedal Artificial subsuperficial, debe verificarse que el nivel del agua residual no alcance la superficie del sustrato, en ningún caso, para ello se debe verificar de manera constante las tuberías de recolección.
- c. Limpieza y mantenimiento de las instalaciones hidráulicas del humedal artificial y llevar un registro con un formato, por ejemplo, la **tabla# 52**.
- d. Control y cuidado del crecimiento de la vegetación: La vegetación debe ser inspeccionada regularmente y debe evitarse el crecimiento de mala hierba o especies vegetales invasoras. En áreas del humedal, donde la cobertura de plantas sea escasa, las actividades de gestión para mejorarla incluyen el ajuste del nivel de agua y la replantación de la especie. En ciertos casos es necesario, cosechar y eliminar restos de la vegetación emergente.
- e. Verificar la presencia de posibles olores generados en el humedal: La presencia de olores no constituye un problema en los Humedales Artificiales. Los componentes que producen olores se asocian generalmente a condiciones anaerobias, que pueden ser originadas por cargas orgánicas excesivas.

- f. Verificación de la presencia de posibles vectores: La limpieza constante de todos los componentes y la higiene que se mantenga será una medida preventiva para evitar la presencia de plagas de roedores o insectos, tanto en el interior de las tuberías de entrada y salida como en la superficie del agua del humedal. Los mosquitos, zancudos y anfibios son comunes en los humedales, la mejor manera de evitar problemas con mosquitos en los Humedales Artificiales es crear condiciones higiénicas en el humedal y eliminar posibles criaderos que propicien el desarrollo de larvas, tal es el caso de agua estancada.
- g. Medición del crecimiento de la biomasa.
- h. Evaluar periódicamente el rendimiento en términos de eficiencia, a cuyos efectos se deben analizar los parámetros de diseño mediante la toma de muestras y análisis de: Demanda biológica de oxígeno (DBO), Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos totales (SST), Nitrato (N), Fósforo (P) y Coliformes totales.

Tabla 53.- Formato de registro para los humedales.

| MES   | AÑO  | OPERADOR              |                                 |   |
|-------|--|-----------------------|---------------------------------|---|
| FECHA | LIMPIEZA DE LAS TUBERÍAS DE DISTRIBUCIÓN-RECOLECCIÓN | PODA DE LA VEGETACIÓN | CUIDADO DE BORDOS Y GEOMEMBRANA | MANTENIMIENTO DEL NIVEL DE AGUA MEDIANTE VÁLVULAS DE DESFOGUE |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |
|       |  |                       |                                 |   |

Extraído de Soares (2013)

#### 6.4.2 Métodos de control de plagas.

##### a. Método químico – Aplicación de plaguicida.

Como se mencionó anteriormente depende del tipo de plaguicida que se va a implementar, pero en el caso de los Humedales las plagas más comunes son los insectos y hongos. Por ende, a continuación, se explica el proceso de aplicación de fungicidas e insecticidas:

- Colocar agua en el tanque de la bomba para llenar el sistema (émbolo y lanza)
- Vaciar el agua que queda en el tanque

- Colocar de 5 a 10 lts de agua en el tanque
- Fumigar las plantas por ambos lados, con la boquilla y la técnica recomendada.
- Dejar el sistema lleno como al inicio (émbolo y lanza)
- Medir el sobrante de agua y restárselo a los 5 lts usados inicialmente en el tanque.
- Dividir el resultado del paso anterior entre el número de plantas atomizadas.
- Multiplicar el resultado del paso anterior por el número de plantas que tenga la hectárea y así se obtendrá la cantidad de agua que debe utilizarse por hectárea.

Ejemplo:

|    |                                   |           |
|----|-----------------------------------|-----------|
| a- | Cantidad de agua en la bomba..... | 5 Litros  |
|    | Sobrante (paso 6).....            | 1.5Litros |
|    | Agua gastada en 30 plantas.....   | 3.5Litros |
|    | Plantas por hectáreas.....        | 3000      |

b- Realizar el paso 7:

$$\frac{3.5 \text{ L}}{30 \text{ plantas}} = 0.117 \text{ L/Planta}$$

c- Realizar el paso 8:

$$0.117\text{L/planta} \times 3000\text{plantas igual a } 351\text{Litros}$$

**Resultado = se necesitan 351 litros de agua por hectárea de terreno cultivado**

*Ilustración 16.- Ejemplo de aplicación de fungicidas e insecticidas. Extraído de Jiménez Martínez (2009)*

b. Método mecánico – Uso de trampas.

Las trampas son ampliamente utilizadas para el control de vertebrados dañinos, especialmente roedores, pájaros y depredadores.

Las trampas consisten en pedazos de plástico amarillo cubiertos con una sustancia pegajosa. La sustancia pegajosa puede ser un pegamento especial de larga duración o simplemente aceites vegetales o minerales.

Tabla 54.- Cuadro de inspección y mantenimiento semanal.

| <b>Componente</b>             | <b>Actividades</b>  |
|-------------------------------|---|
| Entrada                       | Inspección visual de la caja de distribución y tuberías para verificar la distribución adecuada y uniforme del afluyente e identificar obstrucciones y daños. Se debe realizar limpieza, mantenimiento y ajustes en caso de ser necesarios. |
| Salida                        | Inspección visual de las tuberías, para comprobar que no hay obstrucción y daños.   |
| Geomembrana Impermeabilizante | Inspección visual para ver si hay maleza, al borde o cercana a la geomembrana, que pueda perforarlo.  |
| Vegetación                    | Inspección visual para ver el desarrollo de las plantas y compararlas entre ellas, si alguno tiene un menor crecimiento. Control de crecimiento de las plantas para ver el tamaño alcanzado y la densidad por área.                         |

Extraído de Pozuzo (2017)



## **CAPÍTULO VII – ANÁLISIS ECONÓMICO ENTRE UN SISTEMA CONVENCIONAL Y NO CONVENCIONAL**

### **7.1 Inversión inicial, Costos constructivos y O&M.**

La inversión inicial del sistema de tratamiento de AARR está comprendida por la adquisición del terreno, planos de diseño, especificaciones técnicas y los precios unitarios que varían dependiendo de las actividades a realizar.

En términos generales, el proyecto y ejecución del sistema de tratamiento va a estar sujeto del factor costo especialmente cuando se trata de la O&M del sistema, en vista que, muchas plantas de tratamiento han sido rechazadas por dicho motivo y, en ocasiones quedan desiertas sin importar que la infraestructura se proyecte a periodos largos de vida útil y del beneficio que ocasionará a la comunidad.

Una PTAR de sistema convencional requiere de una mayor inversión que una planta de tratamiento no convencional. Los costos en estos tipos de tratamientos son elevados, la mayor parte se ven influenciados por la adquisición de terreno, en vista que requiere de grandes áreas para su construcción, también, necesitan de diversos mecanismos sistematizados para realizar la depuración de contaminantes, un proceso constructivo para estos sistemas está alrededor de **\$143.363,12** y los costos de O&M para 1 año están en el orden de **\$26.208,30**.

Una PTAR de sistema no convencional como el humedal artificial requiere de una menor inversión, no obstante, al igual que los sistemas convencionales requiere de adquisición de terreno misma en su mayoría se verán asumidas por los habitantes de la comunidad, pero la diferencia radica que estos sistemas requieren de menor área para su construcción. Así mismo, al tratarse de procesos naturales trabajan con elementos del mismo entorno, por ende, su costo constructivo está en el orden de **\$41.358,27**. En cuanto a la O&M, al trabajar por efecto de gravedad no requieren de implementos de alta gama que impliquen costos de inversión altos, o químicos específicos para llevar a cabo los procesos de depuración de contaminantes, convirtiéndolo en un sistema de bajo costo. A su vez, las variables de la O&M como el operador de la planta, la frecuencia de mantenimiento, programas de capacitaciones y herramientas para operación se verán asumidas por los habitantes de la comunidad, por ende, su costo de O&M para 1 año están en el orden de **\$1.554,97**.

Recalcando que los costos tanto del sistema convencional como no convencional son referenciales, o bien puede incrementar como disminuir, todo va a depender de los niveles de tratamientos que vayan a implementar y las variables que contenga el sistema.



## 7.2 Presupuesto referencial del sistema diseñado.

| PRESUPUESTO REFERENCIAL   |  |        |          |                 |              |
|---------------------------|--|--------|----------|-----------------|--------------|
| Rubro                     | Descripción  | Unidad | Cantidad | Precio Unitario | Precio total |
| <b>CANAL DE LLEGADA</b>   |  |        |          |                 |              |
| 1                         | Excavación de material con máquina. Incluye desalojo                           | m3     | 0,12     | \$ 5,52         | \$ 0,66      |
| 2                         | Hormigón estructural para muros f'c= 280 kg/cm2. Inc. Cimentación y encofrado. | m3     | 0,17     | \$ 284,35       | \$ 47,77     |
| 3                         | Enlucido con impermeabilizante. Incluye filos                                  | m2     | 0,54     | \$ 11,54        | \$ 6,23      |
| <b>TANQUE SÉPTICO</b>     |  |        |          |                 |              |
| 4                         | Excavación y desalojo con máquina. Inc. Transporte                             | m3     | 96       | \$ 4,97         | \$ 477,12    |
| 5                         | Perfilada y reconformación de talud  | m3     | 5        | \$ 11,20        | \$ 56,00     |
| 6                         | Hormigón estructural para muros f'c= 280 kg/cm2. Inc. Cimentación y encofrado. | m3     | 21,6     | \$ 284,35       | \$ 6.141,96  |
| 7                         | Enlucido con impermeabilizante. Incluye filos                                  | m2     | 80       | \$ 11,54        | \$ 923,20    |
| 8                         | Relleno con material de préstamo importado. Inc. Transporte                    | m3     | 20       | \$ 17,86        | \$ 357,20    |
| 9                         | Pintura Latex (Inc. Sellador y empaste)  | m2     | 40       | \$ 5,84         | \$ 233,60    |
| 10                        | Hormigón simple para replantillo f'c= 110 kg/cm2, e=5 cm.                      | m2     | 16       | \$ 9,70         | \$ 155,20    |
| 11                        | Tapa metálica 0,6 x 0,6 m  | U      | 2        | \$ 65,49        | \$ 130,98    |
| 12                        | Accesorios tanque séptico  | glb    | 1        | \$ 82,74        | \$ 82,74     |
| <b>HUMEDAL ARTIFICIAL</b> |  |        |          |                 |              |
| 13                        | Excavación y desalojo con máquina. Inc. Transporte                             | m3     | 949,81   | \$ 4,97         | \$ 4.720,57  |
| 14                        | Perfilada y reconformación de talud  | m3     | 5        | \$ 11,20        | \$ 56,00     |
| 15                        | Suministro e instalación de geomembrana (Incl. Cama de arena)                  | m2     | 527,67   | \$ 45,32        | \$ 23.914,00 |
| 16                        | Limpieza y colocación de piedra chispa   | m3     | 52,767   | \$ 22,73        | \$ 1.199,39  |
| 17                        | Limpieza y colocación de piedra (40 mm)  | m3     | 80       | \$ 28,48        | \$ 2.278,40  |
| 18                        | Accesorios Humedal   | glb    | 1        | \$ 577,24       | \$ 577,24    |
| <b>TOTAL</b>              |  |        |          |                 | \$ 41.358,27 |

## 7.3 Presupuesto referencial de operación y mantenimiento del sistema diseñado.

| PRESUPUESTO REFERENCIAL |   |        |          |                 |              |
|-------------------------|---|--------|----------|-----------------|--------------|
| Rubro                   | Descripción                                 | Unidad | Cantidad | Precio Unitario | Precio total |
| 1                       | Análisis de laboratorio \$/análisis         | glb    | 1        | \$ 517,50       | \$ 517,50    |
| 2                       | Operador de la planta de tratamiento \$/mes | glb    | 2,00     | \$ 483,00       | \$ 966,00    |
| 3                       | Herramientas menores (5%)                   | glb    | 1        | \$ 27,77        | \$ 27,77     |
| 4                       | Equipos de Protección Personal (EPP)        | glb    | 1        | \$ 43,70        | \$ 43,70     |
| <b>TOTAL</b>            |   |        |          |                 | \$ 1.554,97  |

## CONCLUSIONES

Acorde a la investigación bibliográfica se concluye:

1. La eficiencia de los humedales artificiales va a depender principalmente de factores como: el tipo de sustrato a implementar, las condiciones climáticas de la zona y las macrófitas, en vista que este tipo de sistemas las implementan para depurar contaminantes.
2. Las macrófitas dependiendo del tipo de contaminante que vayan a eliminar, cumplirán con el rendimiento de depuración deseado y, esto se ve reflejado en la **tabla# 6**, que enfoca las eficiencias de los humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal con diferentes tipos de macrófitas. En cuanto al uso de las especies vegetales se detectan diferencias de eficiencias, pero se recalca que la caña *Guadua Angustifolia Kunth* posee un buen comportamiento de depuración.
3. En base a la **tabla# 6** sobre la eficiencia del Humedal Artificial subsuperficial de flujo horizontal, se define como solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un asentamiento menor de 1000 habitantes.
4. Para el diseño del humedal artificial se consideró la menor área de los mecanismo de depuración como el DBO, N y P. Obteniendo como resultado que el DBO presenta menor área en comparación a los otros mecanismo. Adicionando que resulta beneficioso a nivel económico seleccionar dicha área.
5. Para la PTAR de caso de estudio se considera los siguientes niveles: Un pretratamiento, un tratamiento y un tratamiento.
6. Para el pretratamiento se implementó un canal de llegada cuyas dimensiones son 0.35 x 2 x 2 m, con revestimiento de hormigón. Además, de una rejilla de 0.3 x 2 m con 9 barras.
7. Para el tratamiento primario se implementó 3 tanques sépticos, con eficiencias del 40% para DBO y 65% para SST conforme establece la norma técnica brasileña para tanques sépticos.
8. Para el tratamiento secundario se implementó 3 humedales artificiales subsuperficial de flujo horizontal con eficiencias de 78.99% para DBO, 56.94% para SST, 63.71% para N, 56.94% para P y 90% para coliformes.

Mismas eficiencias que fueron obtenidas en base a un promedio de eficiencias que se muestran en la **tabla# 6**.

9. El presupuesto referencial para construir este sistema conforme a los parámetros establecidos es de **\$41.358,27** y la O&M es de **\$1.554,97**.
10. Del análisis económico se define que la construcción de un sistema no convencional como el humedal artificial es más económica en comparación a los sistemas convencionales. Es decir, son más rentables económicamente en zonas rurales, ya que estas no requieren de altos costos de O&M y construcción. Además, en mucho de los casos variables como el operador del sistema y el área del terreno, son costeados por los propios moradores del sector o comunidad.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda lo siguiente:

1. Implementar sistemas no convencionales como lo es el humedal artificial, en zonas donde el índice presupuestal es bajo y se requiera depurar contaminantes para una correcta descarga del efluente. Recalcando que estos tipos de sistemas cumplen con los límites permisibles para la descarga.
2. Para las acciones operativas de pretratamiento se debe realizar un sistema de remoción de sólidos acumulados para así evitar taponamientos, ya que puede provocar inconformidades en el entorno como mal olor o incluso pueden afectar a los siguientes procesos de tratamiento.
3. En tanto a los equipos de protección personal (EPP) para el o los operarios que vayan a desempeñarse en la PTAR, deberán utilizar lo mínimo necesario en función de lo que vayan a realizar, entre ellas: mascarillas, botas, guantes, overol en caso de ser necesario, y tener las vacunas requeridas al día.
4. Durante la realización de los muestreos es importante llevar: un itinerario, un correcto orden y disciplina con la finalidad de no cometer errores y obtener resultados desfavorables que incidan en la planta de tratamiento.
5. Disponer de un operador permanente que este en constante vigilancia del funcionamiento de la PTAR, que conozca el manual de operación y esté alerta ante cualquier emergencia que se pueda suscitar.
6. El operador deberá realizar capacitaciones periódicas referente a la operación y mantenimiento del sistema.
7. Para la remoción de lodos del tanque séptico se recomienda contratar a una entidad competente para evitar cualquier resultado desfavorable, es decir, incumplir las normas ambientales. Ya que en muchos casos el operador al desconocer como tratar con este tipo de contaminantes suelen depositarlos en sus alrededores perjudicando al entorno.
8. Se recomienda realizar una subcontratación para la realización de ciertos parámetros de calidad de agua, con la finalidad de llevar un correcto control de la PTAR o de ser posible disponer de un laboratorio acreditado para realizar dichas pruebas.
9. Tener en consideración la biomasa que puede generar la vegetación ya que puede provocar malos olores perjudicando al entorno. Así mismo, verificar la

presencia de plagas que puedan dañar el crecimiento vigoroso de las macrófitas.

10. Realizar una correcta revisión de las tuberías para evitar obstrucciones en el paso del agua, tanto en el afluente como el efluente.
11. Para una correcta operación y mantenimiento de la PTAR, se recomienda seguir el cronograma de mantenimiento.
12. Fomentar el uso de la caña guadua cosechada para obtener ingresos, tener constante flujo de crecimiento de la vegetación y continuar manteniendo beneficios de depuración de aguas servidas.
13. Para el tratamiento primario y secundario para poblaciones menores de 1000 habitantes poner en ejecución los 2 primeros sistemas primarios y secundarios y de ser necesario en vista que no abastece los 2 sistemas implementar el tercero.

## BIBLIOGRAFÍA

- ABNT. (1993). *NBR 7229: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos*. 15.
- AELCA. (2019). ¿Qué es una fosa séptica? · Como funciona y tipos - Aelca. Retrieved February 6, 2021, from <https://www.aelca.es/es/nuestro-blog/que-es-una-fosa-septica/>
- Alvarado, R., & Marisela, M. (2018). *Unidad Académica De Ingeniería Civil Carrera De Ingeniería Civil Machala 2018*. Retrieved from <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/13281>
- American Journal of Sociology. (2019). Humedales Construidos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Andía, Y. (2000). Tratamiento de agua coagulación y floculación. In *Sedapal*. Retrieved from [http://www.sedapal.com.pe/c/document\\_library/get\\_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154](http://www.sedapal.com.pe/c/document_library/get_file?uuid=2792d3e3-59b7-4b9e-ae55-56209841d9b8&groupId=10154)
- Arroyave, A. (2010). Efectos del tipo de vegetación y de las variaciones de profundidad en la eficiencia de remoción de patógenos en humedales construidos de flujo subsuperficial. *Theoretical and Applied Genetics*, 7(2), 1–7. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.004><http://dx.doi.org/10.1016/j.pbi.2010.01.004><http://www.biomedcentral.com/1471-2156/12/42><http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2009.11.005><http://www.sciencemag.org/content/323/5911/240.short>
- Barrenechea, A. (2004). Tratamiento de agua para consumo humano. Coagulación. *Tratamiento de Agua Para Consumo Humano*, 153–224.
- Barreno, W. (2018). *Diseño de un Humedal Subsuperficial para la depuración de las aguas residuales de la industria Lava Jeans*.
- Bokova, I., & Ryder, G. (2017). Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado, Naciones Unidas. In *El Abreguense* (Vol. 3). Retrieved from [http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf)
- Bracho, M., Marcos, P., Moreno, L., & Olivares, J. (2016). *Tratamiento no convencional de las aguas residuales urbanas de Tucaní, Venezuela*. 156.
- Cejas, M. (2021). *Implementación Piloto De Un Humedal Artificial De Flujo Subsuperficial Horizontal En La Universidad Nacional De Moquegua, Para El Tratamiento Del Agua Residual De La Laguna Primaria De La Planta De Tratamiento De Agua Residual – Ptar Del Distrito De Pacoc*. 1–115.

- CEPEP. (1996). *Evaluación social del proyecto planta de tratamiento de aguas residuales "La Zacatecana" y su análisis normativo.*
- Chonqui, C. (2019). *propiedades físicas y químicas.*
- Cobos, J., & León, X. (2007). *Propiedades Físicas-Mecánicas De La Guadua Angustifolia Kunth Y Aplicación Al Diseño De Baterías Sanitarias Del IASA II.* 134.
- Comisión Nacional del Agua. (2015). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.*
- Cortes, G. (2015). *Análisis de alternativas de sistemas de tratamientos de aguas residuales, provenientes de las instalaciones de la UAAAN.* Retrieved from [http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42526/CORTES VASQUEZ%2C GERMAN IGNACIO REP. ESTANCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/42526/CORTES%20VASQUEZ%20GERMAN%20IGNACIO%20REP.%20ESTANCIA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- CPE INEN. (1992). Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes. In *Código de Práctica Ecuatoriano* (Vol. 1, p. 5).
- Cronk, J., & Fennessy, S. (1988). Wetland Plants. In *Delta.*
- Delgadillo, O., Camacho, A., & Serie, M. A. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales.* Retrieved from [http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion\\_de\\_aguas\\_residuales\\_por\\_medio\\_de\\_humedales\\_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales](http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/depuracion_de_aguas_residuales_por_medio_de_humedales_artificiales.pdf%5Cnhttp://www.aguasresiduales.info/revista/libros/depuracion-de-aguas-residuales-por-medio-de-humedales-artificiales)
- EPA. (n.d.). How do Wetlands Function and Why are they Valuable? | US EPA. Retrieved August 2, 2021, from <https://www.epa.gov/wetlands/how-do-wetlands-function-and-why-are-they-valuable>
- Franco, M. (2009). *Características de las aguas residuales.*
- Gamez, M., & Marmol, X. (2020). *Evaluación de un sistema Wetland con Caña Guadua para el tratamiento de aguas servidas.*
- Gandarillas, J. (2016). Lagunaje: Módulo Gestión de Aguas Residuales y Reutilización. *Escuela de Organización Industrial*, 16.
- García, A., & Luizaca, W. (2017). *Diseño De Un Sistema De Humedales Artificiales Para El Tratamiento De Las Aguas Residuales En La Comunidad Del Tabacay, Cantón Azogues, Provincia De Cañar.* 194.
- García, E., & Pérez, J. (2019). *Aguas Residuales. Composición.*

- García, I., Betancort, J., Salas, J., Peñate, B., Pidre, J., & Sardón, N. (2015). Guía sobre tratamientos de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. In *Itc*. Retrieved from <http://www.cienciacanaria.es/files/Guia-sobre-tratamientos-de-aguas-residuales-urbanas-para-pequenos-nucleos-de-poblacion.pdf>
- goleman, daniel; boyatzis, Richard; Mckee, A. (2019). Evaluación de un sistema humedal construido – tanque regulador como sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, con base en criterios hidrológicos e hidráulicos. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699.
- Gonzales, M. (2013). Hidrófitas e Higrófitas. Retrieved January 25, 2021, from [http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema3/tema3\\_4hidrofita.htm](http://www.biologia.edu.ar/botanica/tema3/tema3_4hidrofita.htm)
- Granados, M. (2018). Estudio de factibilidad de la implementación de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en ecosistema de alta montaña en Toquilla. *Universidad Libre Facultad de Ingenierias*, 83. Retrieved from [https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11576/Proyecto\\_articulo\\_y\\_plantilla\\_congreso.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/11576/Proyecto_articulo_y_plantilla_congreso.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guerrero, J., Salas, D., & Zapata, M. (2007). Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región. *Scientia et Technica*, 5(37), 591–596. <https://doi.org/10.22517/23447214.4191>
- Hernández, D., Ramos, N., Castillo, J., & Orduña, J. (2015). Evaluación de la eficiencia de humedales artificiales de flujo sub-superficial utilizando *Stipa ichu* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Ingenium*, 9(25), 47. <https://doi.org/10.21774/ing.v9i25.588>
- Hernández, F. (2018). Manual de humedales artificiales. Retrieved January 18, 2021, from [https://issuu.com/frederys1712doc/docs/manual\\_de\\_humedales\\_artificiales](https://issuu.com/frederys1712doc/docs/manual_de_humedales_artificiales)
- Herrera, H. (2018). *Eficiencia de la Guadua angustifolia (Bambú) en el tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedal artificial en el centro poblado Santa Catalina, distrito y provincia de Moyobamba, 2017*.
- Herrera, H. (2020). *Universidad nacional de san martín – tarapoto*.
- Hughes, C. M. and R. E. (1968). “Methods for the Measurement of Primary Production of Grassland,” International Biological Programme, Oxford, England, 1968. - References - Scientific Research Publishing. Retrieved February 23, 2021, from [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=875723](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=875723)
- Jiménez, E. (2009). “ Métodos de Control de Plagas .” *Universidad Nacional Agraria*, 145. Retrieved from



<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:?+M?todos+de+Control+de+Plagas+?#2>

- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment Wetlands. In *Treatment Wetlands*.  
<https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Lara, J., & Vera, I. (2005). Artificial De Flujo Subsuperficial. *Ingeniería y Universidad*, 9(1), 47–63.
- Loaiza, D. (2011). *Conociendo al bambú* (p. 14). p. 14.
- López, R. (1995). *Elementos de diseño de acueductos y alcantarillados* (Escuela Colombiana de Ingeniería, Ed.). Nueva Ediciones.
- Marín, J., & Correa, J. (2010). *Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en la construcción de dos sistemas Wetland de Flujo Subsuperficial Horizontal, compartiendo la especie vegetal Guadua angustifolia Kunth.pdf*.
- Martelo, J., & Lara, J. (2012). Floating macrophytes on the wastewater treatment: a state of the art review. *Ingeniería y Ciencia*, 8(15), 221–243. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/ince/v8n15/v8n15a11.pdf>
- Merlin, G., Pajeau, J. L., & Lissolo, T. (2002). Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area. *Hydrobiologia*, 469(i), 87–98. <https://doi.org/10.1023/A:1015567325463>
- Ministerio del Ambiente, M. (2015). Norma De Calidad Ambiental Y De Descarga De Efluentes. *Registro Oficial No. 387*, (097), 407. Retrieved from <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf>
- Morán, J. (2019). EL BAMBU O CAÑA GUADUA. *Kemampuan Koneksi Matematis (Tinjauan Terhadap Pendekatan Pembelajaran Savi)*, 53(9), 1689–1699.
- Moreno, J., & Cendales, M. (2018). Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth originaria de Armenia Quindío. *Interciencia*, 489(20), 313–335.
- Moreno, L., Trujillo de los Ríos, E., & Osorio, L. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de guadua angustifolia. *Estudio de Las Características Físicas de Haces de Fibra de Guadua Angustifolia*, 1(34), 613–618. <https://doi.org/10.22517/23447214.5719>
- Municipalidad de Codo de Pozuzo. (2017). *Manual De Operación Y Mantenimiento Del Sistema De Alcantarillado Y La Planta De Tratamiento De Aguas Residuales*. 1–29.
- Muñoz, J. (2011). Fitosistemas de tratamiento de aguas residuales para pequeñas comunidades. *Manual de Fitodepuración. Filtros de Macrófitas En Flotación.*, 31–60.

- Noboa, J. (2012). *Evaluación de varios tipos de sustratos en la reproducción de plántulas de Caña Guadua (Guadua angustifolia) en la zona de babahoyo, provincia de Los Ríos.*
- Pérez, H. (2012). Naturaleza del agua residual doméstica y su tratamiento. *Universidad de Piura*, 1–23. Retrieved from [http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1\\_135\\_183\\_88\\_1242.pdf](http://www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/pdf/1_135_183_88_1242.pdf)
- Pérez, M. (2009). Selección de plantas acuáticas para establecer humedales en el estado de Durango. *Tesis Para La Obtencion Del Grado de Doctor En Ciencia y Tecnología Ambiental*, 102. Retrieved from [https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis Ma. Elena Pérez López.pdf](https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/598/1/Tesis%20Ma.%20Elena%20P%C3%A9rez%20L%C3%B3pez.pdf)
- RAS. (2000). Aspectos generales de los sistemas de agua potable y saneamiento básico. *Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico*, 178.
- Reed, S. C., Crites, R. W., & E.J., M. (1995). *Natural Wastewater Treatment Systems* (Second Edi). Retrieved from [https://books.google.com.ec/books?id=m2rSBQAAQBAJ&printsec=frontcover&q=inauthor:%22Ronald+W.+Crites%22&hl=es&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&](https://books.google.com.ec/books?id=m2rSBQAAQBAJ&printsec=frontcover&q=inauthor:%22Ronald+W.+Crites%22&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&)
- Rolim, S. (2012). *Tratamiento preliminar.*
- S. Eslamian, S. Okhravi, F. E. (2019). Constructed Wetlands - Hydraulic Design. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
- Salas, J., Pidre, J., & Cuenca, I. (2015). Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. In *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* (Vol. 53). Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/245180/245180.pdf%0Ahttps://hdl.handle.net/20.500.12380/245180%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2011.03.003%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.gr.2017.08.001%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.precamres.2014.12>
- SIAR. (2010). Cálculo De La Precipitación Efectiva. *Cálculo De La Precipitación Efectiva*, 2–3. Retrieved from [https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/precipitacionefectiva05\\_tcm30-980.pdf](https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/precipitacionefectiva05_tcm30-980.pdf)
- Soares, A. (2013). Operación y mantenimiento básico de un humedal: El caso de San Francisco Uricho en el municipio de Erongarícuaro, Michoacán. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53).
- Solís, A. (1960). *Instituto Ecuatoriano De Ciencias Naturales*. (31). Retrieved from [http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/15852/1/AH-1960-Los Bambúes y pseudobambúes económicos del Ecuador.pdf](http://www.dspace.uce.edu.ec:8080/bitstream/25000/15852/1/AH-1960-Los%20Bamb%C3%BAes%20y%20pseudobamb%C3%BAes%20econ%C3%B3micos%20del%20Ecuador.pdf)
- Solís, R., López, G., Bautista, R., Hernández, J., & Romellón, M. (2016). Evaluación de humedales artificiales de flujo libre y subsuperficial en la remoción de

contaminantes de aguas residuales utilizando diferentes especies de vegetación macrófita. *Interciencia*, 41(1), 40–47.

- SPENA Group. (2021). Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales. Retrieved January 29, 2021, from <https://spenagroup.com/tipos-tratamiento-agua-aguas-residuales/#1561761739660-3c25f272-ead2>
- Taberham, J., Lane, A., Norton, M., & Ryan, S. (2018). Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment. In *Constructed Wetlands for Industrial Wastewater Treatment*. <https://doi.org/10.1002/9781119268376>
- Tanaka, N., Ng, W. J., & Jinadasa, K. B. S. N. (2011). Wetlands for Tropical Applications. In *Wetlands for Tropical Applications*. <https://doi.org/10.1142/p599>
- Toro, Y. (2015). *Manual de tecnologías sostenibles en tratamiento de aguas*.
- Verhoeven, J. T., Beltman, B., Bobbink, R., & Whigham, D. F. (2006). Wetlands and Natural Resource Management. In *Springer*. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-33187-2\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-33187-2_2)
- Von, M. (2008). Wastewater characteristics, treatment and disposal. In *Choice Reviews Online* (Vol. 45). <https://doi.org/10.5860/choice.45-2633>
- Vymazal, J., & Masa, M. (2003). Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Water Science and Technology*, 48(5), 143–148. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0304>
- Vymazal, J. (1995). Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic — State of the art. *Water Science and Technology*, 32(3), 357–364. [https://doi.org/10.1016/0273-1223\(95\)00635-4](https://doi.org/10.1016/0273-1223(95)00635-4)
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2010). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow (Environmental Pollution)*. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=lfqerCqRvg8C&oi=fnd&pg=PR11&dq=wastewater+treatment+in+constructed+wetlands+with+horizontal+sub+surface+flow&ots=ruqm3IRD0e&sig=NpVQFgm6JaR7o9YaPqcyHByEWZo>
- Wallace, S. D., & Knight, R. L. (2006). *SMALL- SCALE CONSTRUCTED WETLAND TREATMENT SYSTEMS*.
- Waste Magazine. (2020). Plantas acuáticas para tratar aguas residuales. Retrieved January 26, 2021, from <https://wastemagazine.es/humedalartificial.htm>
- WordReference. (2020). biomasa - Definición. Retrieved February 23, 2021, from <https://www.wordreference.com/definicion/biomasa>
- Zaragoza, R. (2010). *Características de las aguas residuales*. 62. Retrieved from <http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/Caracteristicas.PDF>

## ANEXOS

### 11.1 Anexo I: Normas de Calidad de Agua de descarga al efluente.

#### 11.1.1 Anexo 1 del Libro VI TUSLMA 2015

*Tabla 55.- Límites de descarga a un cuerpo de Agua Dulce.*

| Parámetros                             | Expresado como                | Unidad            | Límite máximo permisible          |
|--|-------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Aceites y Grasas.                      | Sust. solubles en hexano      | mg/l              | 30,0                              |
| Alkil mercurio                         |                               | mg/l              | No detectable                     |
| Aluminio                               | Al                            | mg/l              | 5,0                               |
| Arsénico total                         | As                            | mg/l              | 0,1                               |
| Bario                                  | Ba                            | mg/l              | 2,0                               |
| Boro Total                             | B                             | mg/l              | 2,0                               |
| Cadmio                                 | Cd                            | mg/l              | 0,02                              |
| Cianuro total                          | CN <sup>-</sup>               | mg/l              | 0,1                               |
| Cinc                                   | Zn                            | mg/l              | 5,0                               |
| Cloro Activo                           | Cl                            | mg/l              | 0,5                               |
| Cloroformo                             | Ext. carbón cloroformo<br>ECC | mg/l              | 0,1                               |
| Cloruros                               | Cl <sup>-</sup>               | mg/l              | 1 000                             |
| Cobre                                  | Cu                            | mg/l              | 1,0                               |
| Cobalto                                | Co                            | mg/l              | 0,5                               |
| Coliformes Fecales                     | NMP                           | NMP/100 ml        | 2000                              |
| Color real <sup>1</sup>                | Color real                    | unidades de color | Inapreciable en dilución:<br>1/20 |
| Compuestos fenólicos                   | Fenol                         | mg/l              | 0,2                               |
| Cromo hexavalente                      | Cr <sup>+6</sup>              | mg/l              | 0,5                               |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días) | DBO <sub>5</sub>              | mg/l              | 100                               |
| Demanda Química de Oxígeno             | DQO                           | mg/l              | 200                               |
| Estaño                                 | Sn                            | mg/l              | 5,0                               |
| Fluoruros                              | F                             | mg/l              | 5,0                               |
| Fósforo Total                          | P                             | mg/l              | 10,0                              |
| Hierro total                           | Fe                            | mg/l              | 10,0                              |
| Hidrocarburos Totales de Petróleo      | TPH                           | mg/l              | 20,0                              |
| Manganeso total                        | Mn                            | mg/l              | 2,0                               |
| Materia flotante                       | Visibles                      |                   | Ausencia                          |
| Mercurio total                         | Hg                            | mg/l              | 0,005                             |
| Níquel                                 | Ni                            | mg/l              | 2,0                               |
| Nitrógeno amoniacal                    | N                             | mg/l              | 30,0                              |
| Nitrógeno Total Kjeldahl               | N                             | mg/l              | 50,0                              |
| Compuestos Organoclorados              | Organoclorados totales        | mg/l              | 0,05                              |
| Compuestos Organofosforados            | Organofosforados totales      | mg/l              | 0,1                               |
| Plata                                  | Ag                            | mg/l              | 0,1                               |

|                             |  |      |                       |
|-----------------------------|--|------|-----------------------|
| Plomo                       | Pb                                     | mg/l | 0,2                   |
| Potencial de hidrógeno      | pH                                     |      | 6-9                   |
| Selenio                     | Se                                     | mg/l | 0,1                   |
| Sólidos Suspendidos Totales | SST                                    | mg/l | 130                   |
| Sólidos totales             | ST                                     | mg/l | 1 600                 |
| Sulfatos                    | SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>          | mg/l | 1000                  |
| Sulfuros                    | S <sup>-2</sup>                        | mg/l | 0,5                   |
| Temperatura                 | °C                                     |      | Condición natural ± 3 |
| Tensoactivos                | Sustancias Activas al azul de metileno | mg/l | 0,5                   |
| Tetracloruro de carbono     | Tetracloruro de carbono                | mg/l | 1,0                   |

<sup>1</sup> La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida

Tabla 56.- Límite de descarga a un cuerpo de agua marina.

| Parámetros                             | Expresado como                         | Unidad            | Límite máximo permisible            |   |
|--|--|-------------------|-------------------------------------|---|
|  |  |                   | (A) DESCARGAS EN ZONA DE ROMPIENTES | (B) DESCARGAS MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS |
| Aceites y Grasas                       | Sust. solubles en hexano               | mg/l              | 30,0                                | 30,0  |
| Arsénico total                         | As                                     | mg/l              | 0,5                                 | 0,5   |
| Aluminio                               | Al                                     | mg/l              | 5,0                                 | 5,0   |
| Cianuro total                          | CN-                                    | mg/l              | 0,2                                 | 0,2   |
| Cinc                                   | Zn                                     | mg/l              | 10,0                                | 10,0  |
| Cobre                                  | Cu                                     | mg/l              | 1,0                                 | 1,0   |
| Cobalto                                | Co                                     | mg/l              | 0,5                                 | 0,5   |
| Coliformes Fecales                     | NMP                                    | NMP/100 ml        | 2000                                | 2000  |
| Color                                  | Color verdadero                        | unidades de color | * Inapreciable en dilución: 1/20    | * Inapreciable en dilución: 1/20            |
| Cromo hexavalente                      | Cr+6                                   | mg/l              | 0,5                                 | 0,5   |
| Compuestos fenólicos                   | Fenol                                  | mg/l              | 0,2                                 | 0,2   |
| Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días) | DBO5                                   | mg/l              | 200,0                               | 400   |
| Demanda Química de Oxígeno             | DQO                                    | mg/l              | 400,0                               | 600   |
| Hidrocarburos Totales de Petróleo.     | TPH                                    | mg/l              | 20,0                                | 20,0  |
| Materia flotante                       | Visibles                               |                   | Ausencia                            | Ausencia                                    |
| Mercurio total                         | Hg                                     | mg/l              | 0,01                                | 0,01  |
| Nitrógeno Total kjedahl                | N                                      | mg/l              | 40,0                                | 40,0  |
| Potencial de hidrógeno                 | pH                                     |                   | 6-9                                 | 6-9   |
| Sólidos Suspendidos Totales            | SST                                    | mg/l              | 250,0                               | 250,0                                       |
| Sulfuros                               | S                                      | mg/l              | 0,5                                 | 0,5   |
| Compuestos organoclorados              | Organoclorados totales                 | µg/l              | 50,0                                | 50,0  |
| Compuestos Organofosforados            | Organofosforados totales               | µg/l              | 100,0                               | 100,0                                       |
| Carbamatos                             | Especies totales                       | mg/l              | 0,25                                | 0,25  |
| Temperatura                            | oC                                     |                   | < 35                                | < 35  |
| Tensoactivos                           | Sustancias Activas al azul de metileno | mg/l              | 0,5                                 | 0,5   |

\* La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida.

## 11.2 Anexo III: Planos del caso de estudio.

## **DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN**

Yo, **Gamarra Margary, Carlos Andree**, con C.C: # **0930293683** autor/a del trabajo de titulación: **Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **20 de septiembre de 2021**

f. \_\_\_\_\_

Nombre: **Gamarra Margary, Carlos Andree**

C.C: **0930293683**

## **REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

### **FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

|  |   |                                      |     |
|--|---|--------------------------------------|-----|
| <b>TEMA Y SUBTEMA:</b>   | Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes.   |                                      |     |
| <b>AUTOR(ES)</b>   | Carlos Andree, Gamarra Margary  |                                      |     |
| <b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>                                       | Ing. Clara Catalina, Glas Cevallos M.Sc.  |                                      |     |
| <b>INSTITUCIÓN:</b>  | Universidad Católica de Santiago de Guayaquil   |                                      |     |
| <b>FACULTAD:</b>   | Ingeniería  |                                      |     |
| <b>CARRERA:</b>  | Ingeniería Civil  |                                      |     |
| <b>TITULO OBTENIDO:</b>  | Ingeniero Civil   |                                      |     |
| <b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>                                       | 20 de septiembre de 2021  | <b>No. DE PÁGINAS:</b>               | 104 |
| <b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>  | Ingeniería Ambiental, Agua potable, Ingeniería Sanitaria  |                                      |     |
| <b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>                                   | Nivel de pretratamiento, nivel primario, nivel secundario, Humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal, económico y eficiencias   |                                      |     |
| <b>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras):</b>                        | <p>La presente investigación de tipo bibliográfica partió de buscar soluciones alternativas para el tratamiento de aguas residuales en poblaciones menores de 1000 habitantes. Por ende, se planteó la indagación “Diseño de un sistema de aguas servidas para la implementación de sistemas wetland en comunidades de menos de 1000 habitantes” previo a la obtención del título de Ingeniero Civil”. Por lo cual, se realizó un análisis de las investigaciones hechas en torno a plantas operadas con dicho sistema, en cuanto a su eficiencia, aspectos técnicos, diseño y económicos, así como la revisión de implementación en otras poblaciones. Posterior, se planteó un caso de estudio donde se implementan 3 niveles conforme dicta la literatura investigada, entre ellos: pretratamiento (canal de llegada y rejilla), primario (Tanque séptico) y secundario (Humedal artificial). Obteniendo eficiencias del 40% en DBO y 65% en SST para el nivel primario y 56.94% en SST, 78.99% en DBO, 63.71% en N, 56.94% en P y 90% en coliformes para el tratamiento secundario. Finalmente, se concluyó en base a las eficiencia que el humedal artificial subsuperficial de flujo horizontal junto con la macrófita Guadua Angustifolia Kunth forma parte de una solución alternativa para el tratamiento de aguas residuales domésticas en un asentamiento menor de 1000 habitantes, además que este tipo de sistemas son comunes en comunidades de baja densidad poblacional en vista que a nivel económico son más factible para su construcción y O&amp;M.</p> |                                      |     |
| <b>ADJUNTO PDF:</b>  | <input checked="" type="checkbox"/> SI  | <input type="checkbox"/> NO          |     |
| <b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>                                      | <b>Teléfono:</b><br>+593983343102   | <b>E-mail:</b> cgamarram96@gmail.com |     |
| <b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b> | <b>Nombre:</b> Ing Clara Glas Ms.C  |                                      |     |
|  | <b>Teléfono:</b> +593984616792  |                                      |     |
|  | <b>E-mail:</b> claglas@hotmail.com  |                                      |     |
| <b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>                              |   |                                      |     |
| <b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>                          |   |                                      |     |
| <b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>                                       |   |                                      |     |
| <b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>                            |   |                                      |     |