

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

TESIS

**PARÁMETROS CINÉTICOS DE FITOBIORREACTORES PARA LA
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS CON *Schoenoplectus
californicus* (TOTORA) – DISTRITO CAJAMARCA**

Tesistas:

Bach. Juleissi Jacqueline Díaz Vásquez

Bach. Maria Elena Güissa Mendoza

Asesor:

Ing. Mcs. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez

Cajamarca – Perú

Mayo - 2018

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO



FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera Profesional de Ingeniería Ambiental y Prevención de Riesgos

TESIS

**PARÁMETROS CINÉTICOS DE FITOBIORREACTORES PARA LA
DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS CON *Schoenoplectus
californicus* (TOTORA) – DISTRITO CAJAMARCA**

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar el Título
Profesional de Ingeniero Ambiental y Prevención de Riesgos

Tesistas:

Bach. Juleissi Jacqueline Díaz Vásquez

Bach. Maria Elena Güissa Mendoza

Asesor:

Ing. Mcs. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez

Cajamarca – Perú

Mayo - 2018

COPYRIGHT © 2018 by

JULEISSI JACQUELINE DÍAZ VÁSQUEZ

MARIA ELENA GÜISSA MENDOZA

Todos los derechos reservados

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GUILLERMO URRELO

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y PREVENCIÓN DE
RIESGOS

APROBACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL

**“PARÁMETROS CINÉTICOS DE FITOBIORREACTORES PARA LA DEPURACIÓN
DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS CON *Schoenoplectus californicus*
(TOTORA) – DISTRITO CAJAMARCA”**

PRESIDENTE

SECRETARIO

ASESOR

Ing. Mcs. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez

DEDICATORIA

*Dedico esta investigación a mis padres Ramón Díaz y Fátima Vásquez, a mi hermana Pamela Díaz y a mis abuelas María Eugenia Garcia y Celia Estela (†). Por su apoyo y motivación incondicional. **Juleissi Díaz.***

*Dedico esta investigación a mis abuelos Arcadio Mendoza y Solía Catrina y a mi tío William Mendoza, quienes creyeron en mí y me apoyaron hasta el final de esta investigación. **María Elena Güissa.***

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradecemos a Dios por bendecirnos, para poder llegar hasta este gran momento de nuestras vidas y porque hizo realidad este sueño anhelado. A la UNIVERSIDAD PRIVADA ANTONIO GULLERMO URRELO por habernos brindado los mejores docentes, los cuales nos han formado para nuestra vida profesional. Al Ing. Fernando Camilo Joaquín Rodríguez por todo el apoyo que nos brindó para poder concretar esta tesis, habiendo ofrecido su valioso tiempo, conocimiento, consejos, su paciencia y su motivación para lograr nuestro objetivo.

A la EPS. SEDACAJ. Quien nos brindó las facilidades para poder utilizar las instalaciones de la PETAR- CAJAMARCA, para realizar los sistemas de tratamiento.

Al Ing. Marco Narro responsable del Área de Control de Calidad de la EPS. SEDACAJ. Por brindarnos las facilidades necesarias para poder utilizar el laboratorio de control de calidad, para realizar las pruebas experimentales.

A la Doctora Margot Angulo y al Tec. Álvaro Julcamoro, por darnos su apoyo para llevar a cabo las pruebas experimentales, por sus valiosos consejos y sus oportunas y valiosas correcciones.

Son muchas las personas que han formado parte de nuestra vida profesional a las que nos gustaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de nuestras vidas. Algunas están aquí con nosotras y otras en nuestros recuerdos y en nuestro corazón, sin importar en donde estén queremos darles las gracias por formar parte de nosotras, por todo lo que nos han brindado y por todas sus bendiciones.

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
RESUMEN	vii
ABSTRAC	viii
1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos de la Investigación	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
1.5. Hipótesis	3
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1. Antecedentes de la investigación	4
2.2. Teorías que sustentan la investigación	7
2.2.1. Depuración en el tratamiento de aguas residuales	8
2.2.2. Ventajas y desventajas de la depuración	9
2.2.3. Humedales naturales y artificiales	10
2.2.4. Fundamentos del sustrato	13
2.2.5. Fundamentos del diseño de reactores	17
2.2.6. Fundamentos para la determinación de los parámetros cinéticos	18
2.2.7. Mecanismo de remoción de contaminantes	22
2.2.8. Macrófitas, plantas depuradoras	26
2.2.9. La totora como planta depuradora	28
2.2.10. <i>Schoenoplectus californicus</i> – Totora	30
2.3. Definición de términos básicos	33
3. CAPÍTULO III: ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS	36
3.1. Tipo y diseño de Investigación	36
3.2. Área de investigación	36
3.3. Unidad de análisis, universo y muestra	37
3.3.1. Unidad de análisis	37
3.3.2. Universo	37

3.3.3.	Muestra	37
3.4.	Operacionalización de las variables	38
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	39
3.6.	Aspectos Físicos del Área de Estudio	40
3.6.1.	Ubicación.....	40
3.6.2.	Clima	41
3.6.3.	Temperatura	43
3.7.	Diseño del sistema piloto y periodo de ejecución:.....	45
3.7.1.	Diseño de los fitobiorreactores	45
3.7.2.	Criterios para dimensionar los reactores.....	46
3.7.3.	Criterios para el área superficial del fitobiorreactor:.....	48
3.8.	Metodología desarrollada Durante la Investigación	48
3.8.1.	Trabajo de campo.....	48
3.8.2.	Trabajo de laboratorio.....	55
3.8.3.	Trabajo de gabinete	60
4.	CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	61
4.1.	RESULTADOS.....	61
4.1.1.	Análisis de pH.....	61
4.1.2.	Tendencia de la Materia orgánica (DQO) y Crecimiento de plantas	64
4.1.3.	Rendimiento (Y)	66
4.1.4.	Parámetros cinéticos de Monod	71
4.2.	DISCUSIÓN	78
5.	CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
5.1.	Conclusiones	80
5.2.	Recomendaciones.....	81
6.	LISTA DE REFERENCIAS	82
7.	ANEXOS.....	87
	ANEXO 1: IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE <i>Schoenoplectus californicus</i> – TOTORA....	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Ventajas y desventajas de la depuración	9
Tabla 2 Materiales empleados en el diseño de humedales horizontales.....	15
Tabla 3 Características del sustrato para el diseño de humedales.....	16
Tabla 4 Resumen de las expresiones cinéticas utilizadas para el análisis de los procesos de nitrificación con cultivos suspendidos y desnitrificación	21
Tabla 5 Taxonomía de Schoenoplectus californicus	30
Tabla 6 Operacionalización de las Variables	38
Tabla 7 Variables, técnicas e instrumentos de investigación	39
Tabla 8 Coordenadas de la Ubicación del Área de Investigación	40
Tabla 9 Clasificación Climática por el método de Thornthwaite.	42
Tabla 10 Orden de las capas de grava utilizada.....	47
Tabla 11 Rangos de concentración de reactivo	56
Tabla 12 Datos de análisis de pH	61
Tabla 13 Resultados de los datos de Tendencia de la Materia orgánica (DQO) y Crecimiento de plantas	64
Tabla 14 Resultados de datos de Rendimiento.....	67
Tabla 15 Taza de utilización para la determinación de ecuaciones. (Inversa del sustrato). 71	
Tabla 16 Tabla de valores de parámetros cinéticos obtenidos	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de humedales construidos, típicamente usados para el tratamiento de aguas residuales	12
Figura 2: Reactor Tipo Batch	18
Figura 3: Ubicación de los Sistemas Pilotos en la PTAR – CAJAMARCA – Canal Huacariz	36
Figura 4: Estación UNC - Cajamarca - Temperatura Promedio Anual	43
Figura 5: Estación UNC - Cajamarca - Precipitación de acumulación anual	44
Figura 6: Vista de perfil del Fitobiorreactor	46
Figura 7: Obtención de especies vegetales	48
Figura 8: Adaptación de la especie vegetal <i>Schoenoplectus californicus</i> - Totora	49
Figura 9: Excavación de celdas para los fitobiorreactores	49
Figura 10: Relleno de Celdas para fitobiorreactores	50
Figura 11: Motores adaptados en los fitobiorreactores.	50
Figura 12: Muestreo de aguas residuales del Canal Huacariz	51
Figura 13: Siembra de la totora en fitobiorreactores	51
Figura 14: Sistema piloto de los fitobiorreactores	52
Figura 15: Monitoreo durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.	52
Figura 16: Medición del crecimiento de plantas	53
Figura 17: Reactor de DQO	55
Figura 18: Cooler de conservación de los tubos de reactivo	55
Figura 19: Agitación de la muestra.	56
Figura 20: Frasco de agua desionizada	57
Figura 21: Tubos preparador colocados en el Reactor.	57
Figura 22: Tubos enfriando a temperatura ambiente	58
Figura 23: Tubo de muestra en el Espectrofotómetro	59
Figura 24: Intervalos del pH en los fitobiorreactores	62
Figura 25: Caja de bigotes de pH	62
Figura 26: Relación de la Tendencia de la Materia orgánica (DQO) Y Crecimiento de Plantas en los Fitobiorreactores	65
Figura 27: Rendimiento en relación al crecimiento de plantas y tendencia de la disminución de la Materia orgánica (DQO) en los Fitobiorreactores.	68
Figura 28: Intervalos del Rendimiento en cada uno de los fitobiorreactores	68
Figura 29: Rendimiento para el Reactor 1 (R1)	69
Figura 30: Rendimiento para el Reactor 2 (R2)	69
Figura 31: Rendimiento para el Reactor 3 (R3)	70
Figura 32: Tasa de utilización para la determinación de Parámetros cinéticos	72

RESUMEN

La presente investigación titulada Parámetros cinéticos de fitobiorreactores para la depuración de aguas residuales domésticas con *Schoenoplectus californicus* (Tatora) en el distrito de Cajamarca, tiene como objetivo. Determinar valores de los parámetros cinéticos de fitobiorreactores en la depuración de aguas residuales domésticas con la especie *Schoenoplectus californicus* (Tatora) en el distrito de Cajamarca, por lo que formulamos el siguiente problema ¿es posible determinar los valores de los parámetros cinéticos de los fitobiorreactores, en la depuración de aguas residuales domésticas con *Schoenoplectus californicus* (Tatora) en el distrito de Cajamarca?, para lo cual se tuvo que determinar la disminución de la materia orgánica, expresada en la Demanda Química de Oxígeno (DQO) de cada una de las muestras así como realizar las respectivas comparaciones del nivel de crecimiento de las plantas. Luego se realizó un procesamiento estadístico de estos datos a través de los cuales se pudieron obtener los valores de los parámetros cinéticos como: tasa máxima de crecimiento específico (μ_{max}), constante de media velocidad (K_s), el tiempo de residencia hidráulica (Θ), rendimiento (Y), utilizando el modelo de Monod. Siendo esta una investigación aplicada y de acuerdo con la técnica de contrastación, es experimental y de temporalidad transversal. Llegamos a las conclusiones que existe una relación inversa entre la disminución de la materia orgánica y el crecimiento de las plantas; se lograron determinar los valores de los parámetros cinéticos, los cuales son: μ_{max} 65.813 día^{-1} , K_s 0.999 mg/l, (Θ) de 1.37 h y (Y) 0.100 cm/mg.l.

Palabras clave: Aguas residuales, Materia orgánica, Depuración, Parámetros cinéticos, Fitobiorreactores.

ABSTRAC

The present investigation entitled Kinetic parameters of phytobioreactors for the purification of domestic wastewater with *Schoenoplectus californicus* (Tatora) in the district of Cajamarca, has as objective, to determine values of the kinetic parameters of phytobioreactors in the purification of domestic wastewater with the species *Schoenoplectus californicus* (Tatora) in the district of Cajamarca, for which we formulate the following problem: is it possible to determine the values of the kinetic parameters of the phytobioreactors in the purification of domestic wastewater with *Schoenoplectus californicus* (Tatora) in the district of Cajamarca? , for which it was necessary to determine the decrease of the organic matter, expressed in the Chemical Oxygen Demand (COD) of each of the samples as well as to make the respective comparisons of the level of growth of the plants, then a processing was carried out statistical of these data through from which it was possible to obtain the values of the kinetic parameters such as: maximum specific growth rate (μ_{max}), medium speed constant (K_s), hydraulic residence time (Θ), yield (Y), using the Monod model . This being an applied research and according to the contrasting technique, it is experimental and of transverse temporality. We reach the conclusions that there is an inverse relationship between the decrease of organic matter and the growth of plants; it was possible to determine the values of the kinetic parameters, which are: μ_{max} 65,813 dia⁻¹, K_s 0.999 mg / l, (Θ) of 1.37 h and (Y) 0.100 cm / mg.l.

Keywords: Wastewater, Organic matter, Purification, Kinetic parameters, Phytobioreactors

1. CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1.Planteamiento del problema

Las aguas residuales son todo tipo de agua que ha sido alterada por actividades humanas, estas aguas sin un debido tratamiento pueden generar graves impactos al medio ambiente. La ciudad de Cajamarca cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, la cual ya no se encuentra funcionando, dando como resultado que los efluentes de aguas residuales de la ciudad se viertan directamente en el río Mashcon, generando la contaminación de éste.

La EPS SEDACAJ es la responsable de realizar el tratamiento de las aguas residuales, y afirma que hasta el año 2013 solo ha tratado 30 l/s. Según el estudio realizado por la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento en el 2015 determinó que la ciudad de Cajamarca genera 192 l/s de aguas residuales domésticas, que se vierten directamente al río Mashcon. El anterior estudio es corroborado por la Autoridad Nacional del Agua en el 2016, la cual manifiesta que la EPS SEDACAJ no está realizando el tratamiento de las aguas residuales, además de que los pobladores están captando estas aguas residuales sin tratamiento para la agricultura.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible determinar los valores de los parámetros cinéticos de los fitobiorreactores, en la depuración de aguas residuales domésticas con *Schoenoplectus californicus* (Totora) en el distrito de Cajamarca?

1.3. Justificación

Las aguas residuales que se generan en las ciudades se debe tratar antes de ser emitidas al medio ambiente; debido a que presenta una serie de contaminantes físicos-químicos y biológicos, sin embargo, en la ciudad de Cajamarca no se está tratando el agua residual generadas por la población

Es por tal motivo que se ve la necesidad de resolver el problema de las aguas residuales, para lo cual esta investigación realizará la depuración mediante plantas acuáticas en los fitobiorreactores, y mediante la cinética de Monod se determinará los valores de los parámetros cinéticos, los cuales servirán a futuros proyectos de investigación en el campo de la fitorremediación de aguas residuales domésticas.

1.4.Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo general

- Determinar valores de los parámetros cinéticos de fitobiorreactores en la depuración de aguas residuales domésticas con la especie *Schoenoplectus californicus* (Totorá) en el distrito de Cajamarca.

1.4.2. Objetivos específicos

- Evaluar si existe una relación entre la disminución de la materia orgánica y el crecimiento de las plantas en el tiempo.
- Determinar los valores de los parámetros cinéticos mediante el modelo cinético de Monod: La Tasa máxima de crecimiento específico (μ_m), Constante de media velocidad (K_s), Tiempo de residencia hidráulica (Θ) y el Rendimiento (Y);

1.5.Hipótesis

Los valores de los parámetros cinéticos para los fitobiorreactores si se pueden determinar.

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

Para poder desarrollar esta investigación se ha creído conveniente mencionar los siguientes estudios:

Un estudio realizado por Núñez et al. (2004) sobre la fundamentación y aplicaciones de la fitorremediación en la ciudad de México, nos dice que la fitorremediación es una tecnología alternativa, sustentable de bajo costo para restaurar ambientes y efluentes contaminados debido a que no requiere una infraestructura sofisticada y por lo mismo en los países desarrollados se considera una tecnología aplicada, los autores mencionan que en la ciudad de México es una tecnología con gran potencial por lo cual se recomienda generar recursos humanos especializados y financieros para realizar las investigaciones; esta investigación va de la mano con (Delgadillo et al; 2011) que en su investigación consideran que la fitorremediación es una tecnología de costo-efectivo, y es ambientalmente amigable y que puede aplicarse a gran escala.

Según Poveda (2014) en un estudio realizado sobre la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola, previamente caracterizadas en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua, se realizó una evaluación previa en la cual estas aguas presentaban las siguientes características un pH de 8.57, DQO 700 ppm, DBO5 42 ppm, SS con 392 ppm, y turbidez con 25 NTU; se aplicaron

como plantas depuradoras al Lechuguin y la Lenteja, en cuanto al Lechuguin los resultados fueron en el pH 18.32 %, en el DBO5 100%, en el DQO 93.6%, SS 83 %, en cuanto a la turbidez disminuyó en un 98.16%. En la Lenteja se disminuyó en el PH 16%, en el DBO5 99.5%, en el DQO 93.7%, SS 96.4 %, en cuanto a la turbidez se disminuyó en un 93.5%; demostrando así que la depuración con plantas acuáticas es una alternativa viable.

Según Marín y Correa (2010) en el estudio realizado sobre evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua Angustifolia*, determinó que en cuanto a la remoción de contaminantes orgánicos que su porcentaje de remoción del DBO con arena fue de 92.21%, el DQO 84.31%, y con respecto a la remoción de nitrógeno 62.60% y con la grava el porcentaje de remoción de DBO 72.88% y DQO 64.35%, en cuanto al nitrógeno 32.35%, corroborando así que la remoción de contaminantes es más eficiente con la arena y dando fe que el proceso de depuración es una alternativa viable su investigación duro dos meses.

Como se cita en Mufarrije (2012), estudiaron la habilidad competitiva de 20 especies vegetales de humedales naturales, sus resultados indicaron que las especies con mayor capacidad competitiva fueron las Rizomatosas perennes, con elevada biomasa individual debido a su gran capacidad para almacenar nutrientes.

Según Mariñelarena et al. (2005) registraron una eficiencia de remoción de DQO de 24% y 34% a tiempos de residencia hidráulica de 0,9 y 0,4 días, respectivamente, en un humedal experimental de flujo subsuperficial de 60 m², que utilizó a *Schoenoplectus californicus*, *Soják* y *Typha sp*, para el tratamiento de los efluentes de la destilería de la empresa Repsol.

Según López (2016) en el estudio que realizó para la depuración de aguas servidas en zonas rurales, utilizando las especies *Phragmites australis* y *Schoenoplectus californicus*, tuvo como resultados en la eficiencia de eliminación de la DBO5 con 70-80% y 40 -73% de la DQO.

A nivel nacional existen varios trabajos de investigación.

Benavent (2014) que realizo una investigación en la comunidad cerca del sistema de depuración de aguas residuales de la Universidad de Piura, para optimizar en el tratamiento de aguas residuales de los hogares con sistema de filtración de macrofitas.

Según Llagas y Guadalupe (2006) en el estudio realizado presentan una alternativa para el tratamiento de aguas residuales en la Ciudad Universitaria de la UNMSM con el uso de humedales artificiales, dichos estudios se realizaron con diferentes tipos de especie como son la Totorá, hydrocotilo, einydra, salicornia y junco. Dando como resultado la depuración de dichas aguas residuales de la Ciudad universitaria en solo un mes lograron determinar estos resultados. Por otro lado, para ayudar en la reducción de contaminantes en el

Lago Titicaca utilizaron a la totora, como alternativa de fitorremediación. (Sánchez 2016). Hasta la fecha en ciudad de Cajamarca no se ha realizado ninguna investigación de fitorremediación con la especie acuática *Schoenoplectus californicus* como alternativa de remediación para las aguas residuales domésticas.

2.2. Teorías que sustentan la investigación

La fitorremediación es una técnica donde las plantas actúan como trampas o filtros biológicos que descomponen los contaminantes y estabilizan las sustancias metálicas presentes en el suelo y agua al fijarlos en sus raíces y tallos, o metabolizándolos tal como lo hacen los microorganismos para finalmente convertirlos en compuestos menos peligrosos y más estables, como dióxido de carbono, agua y sales minerales Lara (1999).

Según Arias et al. (2010) nos dice que en la fitorremediación con humedales artificiales se debe combinar medios filtrantes y diferentes tipos de plantas, pues logran la remoción de DBO5 y SST en cantidades exigidas por la norma ambiental (mínimo un 80 %) siempre y cuando se realicen las pruebas piloto.

2.2.1. Depuración en el tratamiento de aguas residuales

Según como cita Mufarrege (2012), el término de depuración se acuñó en el año 1991 por lo cual se considera una tecnología relativamente nueva que consiste en remediar ambientes contaminados a base de plantas o vegetales. Esta tecnología es utilizada para tratar los compuestos orgánicos, radioactivo, petroderivados, contaminantes del suelo, el agua o el aire con el fin de transformarlos a formas menos nocivas.

La depuración ocurre naturalmente en los ecosistemas que reciben aguas contaminadas y, junto a la denominada autodepuración de las aguas, ha sido el procedimiento clásico de recuperación de la calidad del agua. Este proceso ocurre tanto en humedales naturales como en humedales artificiales creados por el hombre, Curt, et al, (2012). El sistema de depuración consiste en el desarrollo de un cultivo de macrofitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrofitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente Delgadillo et al., (2010). Estos sistemas purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química como se cita en Delgadillo (2010).

2.2.2. Ventajas y desventajas de la depuración

La depuración con plantas acuáticas es una alternativa que presenta diferentes ventajas y desventajas las que son:

Tabla 1
Ventajas y desventajas de la depuración

VENTAJAS	DESVENTAJAS
- Se puede realizar <i>in situ</i> y <i>ex situ</i> .	- En especies como los árboles o arbustos, la depuración es un proceso relativamente lento.
- Se realiza sin necesidad de transportar el sustrato contaminado, con lo que se disminuye la diseminación de contaminantes a través del aire o del agua.	- Se restringe a sitios de contaminación superficial dentro de la rizósfera de la planta.
- Es una tecnología sustentable.	- El crecimiento de las plantas está limitado por concentraciones tóxicas de contaminantes, por lo tanto, es aplicable a ambientes con concentraciones bajas de contaminantes.
- Es eficiente tanto para contaminantes orgánicos como inorgánicos.	- Los contaminantes acumulados en maderas pueden liberarse por procesos de combustión.
- Es de bajo costo.	- No todas las plantas son tolerantes o acumuladoras.
- No requiere personal especializado para su manejo.	- La solubilidad de algunos contaminantes puede incrementarse, resultando en un mayor daño ambiental o migración de contaminantes.
- No requiere consumo de energía.	- Se requieren áreas relativamente grandes.
- Es poco perjudicial para el ambiente.	- En sistemas acuáticos se puede favorecer la diseminación de plagas, tales como los mosquitos.
- Tiene una alta probabilidad de ser aceptada por el público, ya que es estéticamente agradable.	
- Se puede emplear en agua, suelo, aire y sedimentos.	
- Permite el reciclado de recursos (agua, biomasa, metales).	

Nota. Recuperado de “Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación”, de Delgadillo, A., (2011)

2.2.3. Humedales naturales y artificiales

- Humedales naturales

Según Curt, et al. (2012) los humedales naturales consisten en sistemas de transición entre los ambientes terrestres y los acuáticos, por lo que sus límites suelen ser difusos y su morfología variable con el tiempo. Los humedales se reconocen fácilmente por un conjunto de características generales, como son la presencia de una lámina de agua poco profunda o de una capa freática en superficie sobre suelos hidromorfos, y la existencia de una vegetación especializada, ya sean plantas que viven en el agua (hidrofitos) o las que se desarrollan en terrenos permanentemente inundados o al menos saturados de agua, con bastante frecuencia (higrofitos). Uno de los rasgos más característicos de la vegetación de los humedales es su adaptación a vivir con una fuerte limitación de la disponibilidad del oxígeno en el suelo, es decir, en condiciones de anaerobiosis que normalmente no soportan las plantas terrestres.

- Humedales artificiales

Los humedales artificiales son los que han sido construidos por el hombre para el tratamiento de aguas residuales. Consisten en estanques o canales de poca profundidad en los que se implantan especies vegetales adaptadas a la vida acuática y en los que la depuración se basa

en procesos naturales de tipo microbiológico, biológico, físico y químico.

En relación con otros sistemas de depuración tecnológicos, los humedales artificiales tienen las ventajas de bajo coste, mantenimiento sencillo, eficaz capacidad depuradora de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica, y bajo impacto visual de las instalaciones, porque la vegetación proporciona una apariencia natural. Entre sus limitaciones se pueden indicar que requieren amplias superficies de terreno y que no son apropiados para determinadas aplicaciones, como por ejemplo el tratamiento de aguas industriales con alta contaminación inorgánica Curt, et al, (2012)

Según Lara (1999) existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual, Sistema de flujo libre (FWS) y Sistema de flujo subsuperficial (SFS). En los casos en que se emplean para proporcionar tratamiento secundario o avanzado, los sistemas FWS suelen consistir en balsas o canales paralelos con la superficie del agua expuesta a la atmósfera y el fondo constituido por suelo relativamente impermeables o con barrera subsuperficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos. Además estos sistemas normalmente se les aplican agua residual pretratada en forma continua y el tratamiento se produce durante la circulación del agua a través de los tallos y raíces de la vegetación

emergente. El sistema FWS (Sistema de flujo libre) también se puede diseñar con el objetivo de crear nuevos hábitats para la flora y fauna.

Los sistemas SFS (Sistema de flujo sub superficial) se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas y rellenas de material granular, generalmente al nivel de agua que se mantiene por debajo de la superficie de grava. Las mismas especies se usan en los dos tipos de humedales artificiales.

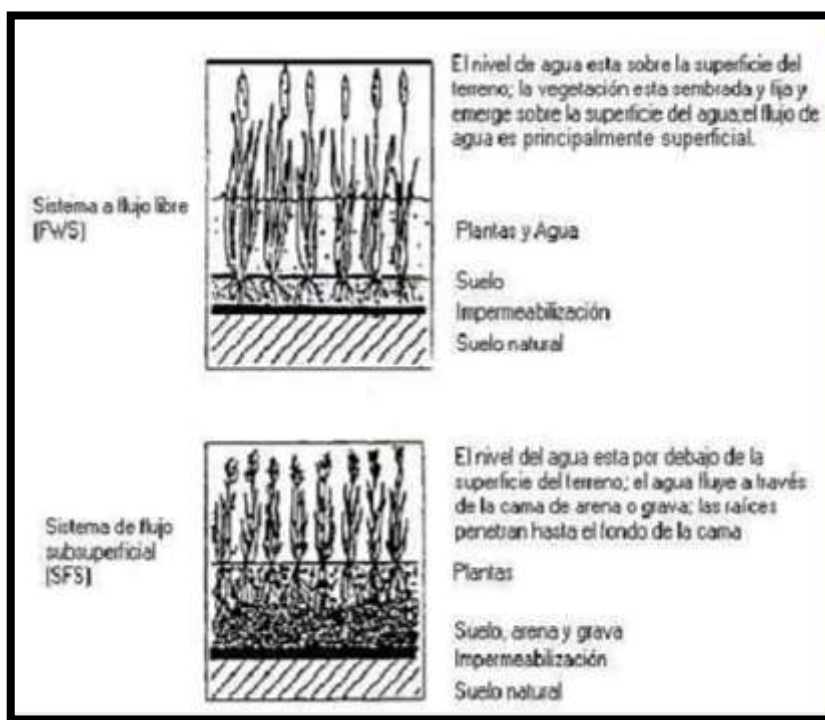


Figura 1. Tipos de humedales construidos, típicamente usados para el tratamiento de aguas residuales

Fuente: Recuperado de “Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales”, de Lara, J., 1999, p. 3, Barcelona, España.

2.2.4. Fundamentos del sustrato

Según Silva(s/f) en los humedales el suelo se encuentra saturado, lo que hace que los poros del suelo estén llenos de agua. Como la velocidad de difusión del oxígeno en el agua es lenta los suelos se vuelven anaerobios.

Según Delgadillo (2010) para el diseño de un humedal se recomienda utilizar grava con menos de 30mm de diámetro, pues parece que funciona mejor, mientras que una grava con diámetros muy grandes de sustrato, origina que aumente la velocidad del paso del agua y por lo tanto no se cumpla con la Ley de Darcy para el diseño, por otro lado la grava de tamaño muy pequeño, reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia en la superficie y flujos preferenciales, pero tiene la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la absorción. Sin embargo, Lara (1999) nos dice que la Ley de Darcy no es estrictamente aplicable a los humedales subsuperficiales por sus limitaciones en el sistema, también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en la realidad puede variar para la precipitación, evaporación y filtración. Si se utiliza una grava de tamaño pequeño o mediano, el sistema estará diseñado para tener una mínima dependencia del gradiente hidráulico y si las pérdidas y ganancias del sistema son adecuadamente reconocidas, la Ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal SFS.

Silva (s/f) dice que en los sistemas con flujo libre el agua fluye por encima de la superficie del suelo en el cual ocurre la mayor actividad microbiana. Los suelos con algún contenido de arcilla son muy seguros en la remoción de fósforo, ocurriendo el proceso de remoción en la matriz del suelo; sin embargo, se considera que este proceso tiende a un equilibrio después del primer año de funcionamiento del humedal. Por otra parte, los suelos arcillosos tienen cierta capacidad de intercambio iónico lo que les permite remover, al menos temporalmente, el nitrógeno presente en las aguas residuales en forma de ion amonio (NH_4^+); sin embargo, la mayoría de las veces esta capacidad se agota debido a que la superficie de contacto se encuentra bajo agua y las condiciones son anaerobias. En los sistemas con flujo subsuperficial el medio puede ser suelo, arena o grava y los espacios libres del medio sirven como canales para el flujo del agua. Sobre la superficie del medio crece la masa de microorganismos semejante a lo que ocurre en un filtro percolador, sin embargo, se considera que el crecimiento microbiano en estos sistemas no debe provocar obstrucciones como ocurre en los filtros percoladores. En el caso de los humedales con flujo subsuperficial horizontal que emplean suelo presentan un potencial de remoción de fósforo y amonio semejante al reportado en los sistemas con flujo libre. En los sistemas con flujo subsuperficial vertical debido a que el flujo es intermitente las condiciones aerobias se restauran periódicamente y el amonio adsorbido, por el suelo puede liberarse por la vía de la nitrificación bacteriana y los sitios de intercambio quedarían libres para

futuras adsorciones. Delgadillo et al., (2010) nos dice que el sustrato está conformado por varias capas de material según el tipo de uso que se le dará al humedal, como se observa en los cuadros que nos muestra las características principales de los sustratos usados en los humedales.

Tabla 2
Materiales empleados en el diseño de humedales horizontales

Tipo de material	Tamaño efectivo D10(mm)	Conductividad hidráulica, ks (m³/m²/d)	Porosidad, n %
Arena gruesa	2	100-1.000	28-32
Arena gravosa	8	500-5.000	30-35
Grava fina	16	1.000 -10.000	35-38
Grava media	32	10.000-50.000	36-40
Roca gruesa	128	50.000-250.000	38-45

Nota. Recuperado de “Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales”, de Delgadillo, et al, 2011, p.33. Cochabamba, Bolivia.

Tabla 3

Características del sustrato para el diseño de humedales

	Tratamiento Primario	Secundario
Capa superficial	h>30 cm grava fina, diámetro efectivo de 2 - 10 mm	h > 30 cm de arena fina, diámetro efectivo de 25 a 40 mm
Intermedia	h de 10 a 15 cm grava fina diámetro efectivo 5 a 20 mm	h 10 a 20 cm de grava fina diámetro efectivo de 3 a 10 mm
Drenaje	h de 10 cm grava de diámetro efectivo de 20 a 40 mm	h de 10 cm de grava de diámetro efectivo de 20 a 40 mm

Nota. Recuperado de “Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales”, de Delgadillo, et al, 2011, p.37. Cochabamba, Bolivia.

2.2.5. Fundamentos del diseño de reactores

Todos los procesos de tratamiento de aguas residuales se pueden analizar por medio de una caja negra y balance de materia, cumpliendo de esta forma una Ley básica de la Física, que aplicándola al tratamiento de aguas es sencillo como decir que todos los materiales que entran en el proceso tienen que ser iguales a lo que salen, a menos que ocurra algo dentro de la caja negra. El balance de masa es la clave en el diseño y análisis de los procesos microbiológicos.

Muchos procesos naturales, así como sistemas ingenieriles se pueden analizar convenientemente usando el concepto del reactor ideal. Una caja negra puede ser pensada como un reactor si tiene volumen y si los materiales se mezclan o fluyen a través del reactor Vesilind y Morgan, (2004).

En base a ciertas consideraciones sobre el flujo y mezclado, se definen tres tipos de reactores. El primero es el reactor tipo Batch que no es más que un reactor donde no hay flujo de entrada ni de salida. El segundo tipo de reactor es el completamente mezclado que como su nombre lo indica se crea una mezcla homogénea y además flujos de entrada y salida. El tercero de estos reactores es el reactor tubular o flujo tapón o PFR.

- **Reactor tipo Bacth**

Es un reactor donde no existe flujo de entrada ni de salida, es simplemente un reactor con un agitador que homogeniza la mezcla.

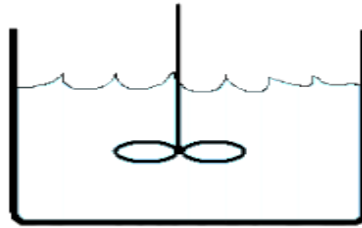


Figura 2: Reactor Tipo Batch

Fuente: Elaborado por los autores

A pesar de que estos reactores son muy usados en procesos industriales y aplicaciones de control de contaminación, para el tratamiento de aguas residuales son poco prácticos porque se necesita tener entrada y salida de agua para que puedan tratar volúmenes de agua residual considerables.

2.2.6. Fundamentos para la determinación de los parámetros cinéticos

Según Nolasco. E, (2015), menciona que el crecimiento microbiano es el incremento en el número de células o aumento en la masa microbiana (biomasa). El crecimiento es un componente esencial de la función microbiana, ya que una célula tiene un periodo de vida determinado y la especie se mantiene como resultado del crecimiento continuo de la población celular, dicho crecimiento celular se puede modelar matemáticamente a tal modo de predecir el aumento de población en un

cultivo microbiano; adquiere relevancia ya que este modelamiento influye en el diseño de un biorreactor, en consecuencia va a repercutir en el aumento de biomasa y en los productos que se pueden llegar a obtener del crecimiento microbiano.

Según el autor el parámetro μ es la tasa de crecimiento específico y es la relación de crecimiento de la célula en función de los nutrientes del medio. Dicha ecuación es usada como parámetros de diseño en los biorreactores ya que es la ecuación que más tiene similitud con el comportamiento poblacional de microorganismos y que dependen también de la cantidad de sustrato contenido en el biorreactor.

La ecuación de Monod se utiliza para encontrar la tasa de crecimiento velocidad de crecimiento constante

Determinación de la tasa máxima de crecimiento específico (μ_{max})

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_s}{\mu_{max}} \left(\frac{1}{S} \right) + \frac{1}{\mu_{max}}$$

$$Y = mX + b$$

La linealización anterior se hace cuando se desea averiguar el crecimiento celular para el caso en que la velocidad específica de crecimiento sea constante.

Para el caso en que la velocidad de crecimiento se halle en un Sistema Batch (reactor) y dependa a su vez de la concentración del sustrato se tiene que introducir el concepto de rendimiento de la reacción.

$$Y = \frac{\Delta x}{\Delta DQO}$$

Donde:

Δx = Diferencial del crecimiento de Plantas

ΔDQO = Diferencial de disminución de DQO

Las ecuaciones antes deducidas son las variantes de la ecuación de Monod para sistemas que dependen directamente de la concentración del sustrato ya que de él depende si el crecimiento celular es eficiente o provocará la muerte celular, asimismo, es una consideración en el diseño de reactores biológicos.

Tabla 4

Resumen de las expresiones cinéticas utilizadas para el análisis de los procesos de nitrificación con cultivos suspendidos y desnitrificación

Ecuación	Definición de términos
$\mu = \mu_m \frac{S}{K_S + S}$	μ = Tasa de crecimiento específico, tiempo ⁻¹
	μ_m = Tasa máxima de crecimiento específico, tiempo ⁻¹
	S = Concentración limitante de sustrato en solución para el crecimiento, masa/unidad de volumen S ₀ = Concentración del afluente masa / unidad de volumen
	K _S = Constante de media velocidad, masa/unidad de volumen.
$U = \frac{S_0 - S}{\theta X}$	U = Tasa de utilización del sustrato, tiempo ⁻¹
	X = Concentración de microorganismos masa/unidad de volumen
	Θ = Tiempo de residencia Hidráulica, tiempo.

Nota: Recuperado y adaptado de “Ingeniería de aguas residuales” de Metcalf & Eddy, Vol II., 1998,793 p

Teniendo en cuenta estas bases teóricas, tomaremos las dos fórmulas de la *Tabla 2*, para encontrar una similitud en un fitobiorreactor y encontrar los valores de los parámetros cinéticos de Monod para este sistema, los cuales nos servirán para determinar el Volumen Total de un fitobiorreactor en proyección a cualquier caudal.

2.2.7. Mecanismo de remoción de contaminantes

En un humedal artificial se desarrollan diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. Evidentemente, un amplio rango de procesos biológicos, químicos y físicos tiene lugar.

A continuación, se explican los mecanismos de remoción de contaminantes que ocurren en los humedales construidos, cuyo contenido está basado principalmente en el texto de Kolb (1998) como se cita en Delgadillo et al., (2010).

- Remoción de sólidos suspendidos

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal.

- **Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos como se cita en Delgadillo et al., (2010). Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono como se cita en Delgadillo et al., (2010). Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente. Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. En la degradación aeróbica, dos grupos de microorganismos participan en este proceso de

degradación: aeróbicos quimioheterótrofos, oxidando compuestos orgánicos y liberando amonio; y aeróbicos quimioautótrofos, los cuales oxidan el nitrógeno amoniacal a nitrito y nitrato. El último proceso es llamado nitrificación. Sin embargo, debido a la tasa de metabolismo más alta, los heterótrofos son principalmente responsables para la remoción del material orgánico; por lo tanto, la presencia de oxígeno disuelto es un factor limitante.

- **Remoción de nitrógeno**

Al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la denitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y denitrificación.

- **Remoción de fósforo**

El fósforo está presente en la alcantarilla en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es un constituyente menor de la alcantarilla y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del

25% del fósforo total fijado en la alcantarilla está presente como ortofosfatos tales como: PO_4^{3-} , HPO_4 , H_2PO_4 , H_3PO_4 , que están disponibles para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosfato orgánico antes que la concentración de fósforo total. La remoción de ortofosfato ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con Al, Fe, Ca y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo por la planta puede ser considerado como insignificante comparado con los efectos de adsorción, valores de alrededor del 3% de la carga anual han sido reportados, como se cita en Delgadillo et al., (2010).

Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxidos metálicos en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varía, como se cita en Delgadillo et al., (2010).

- **Remoción de bacterias**

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de polución orgánica (como en las aguas residuales).

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Finalmente, los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa dudas respecto a su efectividad para afectar a los patógenos).

2.2.8. Macrófitas, plantas depuradoras

Según Curt, et al, (2012) desde el punto de vista botánico, el término ‘macrofitas’ se aplica a cualquier vegetal que es visible a simple vista (herbáceas, arbustos, árboles), en oposición al término ‘microfitas’, utilizado genéricamente para vegetales que no son visibles sin la ayuda de lentes ópticas (algas microscópicas).

Por ello, los vegetales de talla visible que crecen en los humedales se denominan ‘macrofitas acuáticas’, término que desde un punto de vista amplio englobaría plantas acuáticas vasculares (angiospermas y helechos), musgos acuáticos y grandes algas. En el área de investigación sobre humedales, ya sean naturales o artificiales, se utiliza la denominación ‘macrofita’ de manera no estrictamente coincidente con el concepto botánico. Así pues, el término ‘macrofita’ ha llegado ya a incluir el concepto de que se trata de planta acuática entre los miembros de la comunidad científica. También hay que señalar que, debido a que los vegetales que predominan en los humedales son angiospermas (plantas con semilla), a menudo se aplica el término ‘macrofita’ de modo restrictivo, esto es, para referirse únicamente a las plantas acuáticas con semilla

Las macrofitas están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. En algunas especies este sistema ocupa más del 60% del volumen total del tejido, como se cita en Delgadillo et al., (2010).

Delgadillo et al., (2010) señala que las macrofitas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos. Entre estas propiedades, los efectos físicos como la estabilización de la superficie de los humedales construidos y la prevención

de taponamientos de la matriz son muy importantes. Además, proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera, aunque las estimaciones sobre la cantidad de esta transferencia de oxígeno varían en un amplio rango.

Otro hecho importante, especialmente en climas templados, es la capacidad de aislamiento térmico de las macrofitas. En invierno, la capa de tejido muerto que cubre la superficie protege del frío y por lo tanto de las disminuciones de temperatura del agua residual. Por último, las macrofitas pueden proveer hábitat para la vida salvaje y dar una apariencia agradable a los sistemas de tratamiento de aguas residuales, según la especie escogida.

2.2.9. La totora como planta depuradora

Para poder describir a la totora como planta depuradora debemos entender que son las plantas helófitas y cuál es su función. Según lo señalado por Delgadillo et al., (2010) las helófitas son plantas adaptadas a condiciones de saturación de humedad e inundación, siempre que el agua no las cubra completamente. Es decir, soportan una fuerte limitación en la disponibilidad de oxígeno en el suelo. Comprenden una parte debajo del nivel del agua, y otra parte aérea.

El papel de las helófitas en los humedales artificiales se resume en los siguientes aspectos, como se cita en Delgadillo et al., (2010):

- Servir de filtro para mejorar los procesos físicos de separación de partículas.
- Asimilación directa de nutrientes (en especial Nitrógeno y Fósforo) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal.
- Actuar a modo de soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos, que actúan purificando el agua mediante procesos aerobios de degradación.
- Transportar grandes cantidades de oxígeno desde los tallos hasta sus raíces y rizomas, donde es usado por dichos microorganismos

Además del oxígeno en la zona radicular, las bacterias son favorecidas por exudados de las plantas en la misma zona. Las helófitas más usadas en depuración son *TypHa*, *Scirpus*, *PHragmites* y *Carex*, como se cita en Delgadillo et al., (2010). Si bien existen pequeñas diferencias en la eficiencia de remoción de contaminantes entre dichas especies, la recomendación es utilizar la especie de mayor adaptación y disponibilidad en el medio.

En el presente proyecto utilizaremos la totora como planta depuradora pues presenta las siguientes características.

2.2.10. *Schoenoplectus californicus* – Tatora

En esta investigación se utilizará la especie *Schoenoplectus californicus* (C.A.Mey) Soják, esta especie antes fue denominada *Scirpus californicus* (Kayona).

Tabla 5

Taxonomía de *Schoenoplectus californicus*

Reino	Plantae
División	Tracheophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Poales
Familia	Cyperaceae
Género	<i>Schoenoplectus</i>
Epíteto específico	<i>californicus</i>
Autor del epíteto específico	(C.A.Mey.) Soják
Nombre científico	<i>Schoenoplectus</i> <i>californicus</i> (C.A.Mey.) Soják

Nota: Recuperado Jardín Botánico de Celestino, J.

- **Descripción**

El género *Scirpus* se encuadra dentro de las Cyperaceae, familia muy próxima botánicamente a las de las gramíneas. En general, el aspecto de las Cyperaceae recuerda al de las gramíneas, ya que en su mayoría son plantas herbáceas, cespitosas, con flores pequeñas, muy reducidas y poco aparentes.

Schoenoplectus californicus es una planta rizomatosa, lo que significa que también presenta tallos subterráneos. Está muy adaptada al medio acuático y puede desarrollarse en suelos de inundación permanente y en aguas de hasta 1 m de profundidad. Sus poderosos rizomas se fijan al sustrato y ejercen una función de soporte, de retención de nutrientes y del suelo, impidiendo la erosión y facilitando el crecimiento de nuevas especies en las orillas, Curt, et al. (2012).

- **Características morfológicas**

Schoenoplectus californicus (Totorá) presentan:

Tamaño: La Totorá puede llegar a medir hasta 4 m de altura, de los cuales al menos la mitad está sumergida bajo el agua y la otra parte se halla por encima de la superficie.

Tallo: Posee un tallo erecto, liso, flexible, liviano, rollizo, triangular, similar al césped y sin tuberosidades en la base.

Hojas: Las hojas de la Totorá forman una vaina que rodea al tallo en la base. Están distribuidas en dos sectores: las hojas de la parte inferior de

la planta presentan vainas foliares carentes de láminas, mientras que las superiores las desarrollan ocasionalmente.

Inflorescencia: La parte alta de la planta presenta una inflorescencia ramificada que por un lado es arqueada, debido al desarrollo de brácteas rígidas, y por otro es erecta en la prolongación del tallo. Las espigüelas son hermafroditas, abundantes, ovoides u oblongas. Presenta una cubierta floral espiralada, decidua, ovada, redonda en la parte posterior, con una nervadura media fuerte y una lateral inconspicua u obsoleta.

Flores: Las pequeñas flores de la Totora son hermafroditas, es decir, reúnen en sí ambos sexos, y la envoltura floral está compuesta por 2 a 6 escamas.

Frutos: Esta planta produce frutos secos biconvexos o aplanados convexos, lisos o transversalmente rugosos, con un pericarpio no soldado a ellos. El fruto contiene una sola semilla de forma similar a la lenteja.

- **Hábitat**

Schoenoplectus californicus es una especie nativa de casi toda América, desde Estados Unidos hasta Argentina, esta especie denominada Totora crece, tanto de manera silvestre como cultivada, en lagunas y zonas pantanosas, de la costa y sierra del Perú, desde el nivel del mar hasta los 4,000 m de altitud.

2.3. Definición de términos básicos

- **Amonificación:** También denominada hidrólisis o mineralización del nitrógeno orgánico, consiste en la transformación biológica del nitrógeno que está en la materia orgánica a nitrógeno amoniacal, proceso que ocurre durante la degradación de la materia orgánica. Puede ocurrir en condiciones aerobias o anaerobias.
- **Anaerobiosis:** vegetación de los humedales que viven con una fuerte limitación de la disponibilidad del oxígeno en el suelo.
- **Biodegradación:** Es la degradación de la materia orgánica a través de los procesos biológicos en el que intervienen organismos vivos (micro y macroscópicos) e influye de manera drástica los factores como la disponibilidad de oxígeno, el pH del medio, y la temperatura para realizar el proceso.
- **Desnitrificación:** Es la reducción del nitrato a nitrógeno gaseoso, se produce en condiciones anaerobias por microorganismos bacterias heterótrofas que utilizan el nitrato como aceptor de electrones y el carbono orgánico como donante electrónico; es decir, son condiciones indispensables la ausencia de oxígeno y la disponibilidad de carbono orgánico.
- **Hidrófitos:** Planta acuática con los órganos asimiladores sumergidos o flotantes. Su adjetivo es hidrofítico.
- **Higrófitos:** Plantas y comunidades vegetales que viven en medios estacionales y suelos muy húmedos (suelos hidromorfos: gley, estagnogley, pseudogley, turberas, etc.). Se opone a xerófilo y a xerofítico.

- **Inflorescencia:** Son aquellos sistemas de ramas de los espermatofitos que están destinados a la formación de flores y suelen encontrar más o menos claramente delimitados respecto al área vegetativa, es decir es la disposición de las flores sobre las ramas o la extremidad del tallo.
- **Lámina de agua:** el contenido de agua se expresa frecuentemente en riesgos como altura de lámina de agua, es decir, en volumen por unidad de superficie. Las unidades más frecuentes son el (mm) y el (m³/ha), entre los que existen la relación: 1mm = 10 m³/ha.
- **Nitrificación:** La nitrificación es el proceso de conversión biológica del amonio a nitrato por parte de microorganismos aerobios nitrificantes, suspendidos en el agua o situados en las biopelículas de las superficies sumergidas. El proceso se realiza en dos fases; la primera es la oxidación del amonio a nitrito por bacterias del género nitrosomona, y la segunda, la del nitrito a nitrato por bacterias del género nitrobacter. La velocidad del proceso depende del pH y la temperatura. Se requieren condiciones aerobias del orden de 4.3 g de O son necesarios para oxidar 1 g de nitrógeno amónico a nitrato- y suficiente alcalinidad –del orden de 7.14 g CaCO₃–. El ión nitrato, al contrario que el amonio, no se inmoviliza en el sustrato, sino que permanece en el agua; de allí puede ser absorbido por plantas o microorganismos.
- **Oxidación:** La oxidación ocurre cuando una especie química pierde electrones y al mismo tiempo, aumenta su número de oxidación. Por ejemplo, el Sodio metálico (con número de oxidación cero), se puede convertir en el ion sodio (con carga de 1+) por la pérdida de dos electrones Borneo, (2009)

- **Plantas emergentes:** son plantas acuáticas con sistema radicular arraigado en el fango o fondo del humedal, y estructura vegetativa que emerge por encima de la lámina de agua.
- **Producción de exudados por las raíces:** durante muchos años se estimó los componentes orgánicos liberados desde las raíces, utilizando plantas que crecían en condiciones axénicas con solución nutritiva. Se comprobó que los fotosintatos exudados constituyen del 0.1 al 0.9 % del total de los fotosintatos producidos por las plantas.
- **Rizoma:** son tallos subterráneos con varias yemas que crecen de forma horizontal emitiendo raíces y brotes herbáceos de sus nudos, tiene un crecimiento indefinido, pueden cubrir grandes extensiones de terreno debido a que cada año producen nuevos brotes a medida que las primeras ramas van muriendo.
- **DBO:** La Demanda Biológica de Oxígeno es la cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para degradar totalmente la materia orgánica biodegradable que se encuentre en la muestra.
- **DQO:** La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente (generalmente con permanganato potásico o con dicromato potásico en medio ácido) toda la materia orgánica que se pueda encontrar presente en la muestra.
- **SS:** Sólidos Suspendidos
- **Parámetro Cinético:** constante cinética para establecer modelos de diseño.

3. CAPÍTULO III: ESTRATEGIAS METODOLÓGICAS

3.1. Tipo y diseño de Investigación

El tipo de investigación de acuerdo a la finalidad, es aplicada. De acuerdo a la técnica de contrastación, es experimental y de temporalidad transversal.

3.2. Área de investigación

La investigación se realizó en las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Residuales (PTAR) – Cajamarca, que se encuentra en el caserío de Ajoscancha, donde se ubicaron los fitobiorreactores. A cincuenta metros de la PTAR pasa el canal Huacariz, que es el receptor de las aguas residuales domésticas, es de allí donde se realizó la toma de muestras para llevar a cabo el funcionamiento de los Sistemas Pilotos de fitorremediación.



Figura 3: Mapa de ubicación de los Sistemas Pilotos en la PTAR – CAJAMARCA – Canal Huacariz

Fuente: Elaborado por los autores

3.3.Unidad de análisis, universo y muestra

3.3.1. Unidad de análisis

Los 4 fitobiorreactores diseñados.

3.3.2. Universo

Proceso de tratamiento de aguas residuales con fitobiorreactores.

3.3.3. Muestra

Proceso de fitorremediación de tratamiento de aguas residuales.

3.4.Operacionalización de las variables

Tabla 6
Operacionalización de las Variables

Variable	Definición	Indicador	instrumento
Independiente	Especie Vegetal (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	Número de plantas introducidas en el fitobiorreactor	Fitobiorreactor (tipo bacht)
	Materia Orgánica	DQO	Método de Laboratorio
Dependiente	Parámetro cinético – rendimiento (crecimiento de planta/variación de materia orgánica)	Crecimiento de planta/variación de materia orgánica	Procesamiento estadísticos de datos
	Parámetro cinético – Tasa máxima de crecimiento Específico	Unidades de velocidad de crecimiento (inversa del tiempo)	Procesamiento estadístico de datos Ecuación Cinética de Monod
	Parámetro cinético – Constante de media velocidad	Unidades de velocidad de crecimiento	Procesamiento estadístico de datos Ecuación Cinética de Monod
	Parámetro cinético – Tiempo de residencia hidráulica	Tiempo	Procesamiento estadístico de datos Ecuación Cinética de Monod

Nota: Elaborado por los autores.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Tabla 7

VARIABLES, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Variable	Definición	Técnica	Instrumento
Independiente	Especie Vegetal (<i>Schoenoplectus californicus</i>)	Análisis comparativo de la capacidad de absorción de plantas Observación.	Obtención de especies vegetales
	Materia Orgánica	Análisis de laboratorio (Digestión por reactor)	Método de laboratorio.
Dependiente	Parámetro cinético – rendimiento (crecimiento de planta/variación de materia orgánica)	Análisis estadístico	Software Minitab Excel
	Parámetro cinético – Tasa máxima de crecimiento Específico	Análisis de la ecuación cinética de Monod	Software Excel
	Parámetro cinético – Constante de media velocidad	Análisis de la ecuación cinética de Monod	Software Excel
	Parámetro cinético – Tiempo de residencia hidráulica	Análisis de la ecuación cinética de Monod	Software Excel

Nota: Elaborado por los autores.

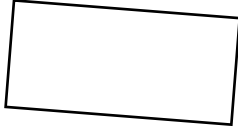
3.6.Aspectos Físicos del Área de Estudio

3.6.1. Ubicación

Políticamente, el proyecto piloto para el tratamiento de aguas residuales, se encuentra ubicado dentro de la Planta de Tratamiento de Aguas domésticas de Cajamarca, encontrándose en un predio llamado “Santa Rosa”, ubicado en el Sector Ajoscancha, Caserío Huacaríz, distrito y provincia de Cajamarca.

El Área de estudio se puede observar en la figura 3. Y la ubicación geográfica de los sistemas pilotos implementaos se encuentran en las siguientes coordenadas:

Tabla 8
Coordenadas de la Ubicación del Área de Investigación

VERTICE	Coordenadas UTM WGS 84 – Zona 17 S			GRÁFICO	Área (m ²)
	Este (E)	Norte (N)	Altitud (msnm)		
1	776978	9207636	2681		5.3 m ²
2	776977.167	9207635.01	2681		
3	776973.163	9207635.9	2681		
4	776973.149	9207636.01	2681		

Nota: Elaborado por los autores

3.6.2. Clima

Teniendo en cuenta el sistema climático, la clasificación de Charles Warren Thornthwaite es la alternativa más utilizada con respecto a los sistemas de clasificación climática. Se basa en dos conceptos la evapotranspiración potencial y en el balance de vapor de agua. Utiliza cuatro criterios básicos de clasificación:

- Índice global de humedad.
- Variación estacional de la humedad efectiva.
- Índice de eficiencia térmica y
- Concentración estival de la eficacia térmica.

La evapotranspiración potencial (ETP) se determina a partir de la temperatura media mensual, corregida según la duración del día. El exceso o déficit se calcula a partir del balance de vapor de agua, que se obtiene a partir de la humedad (I_m), y la ETP. Ello nos permite definir los tipos de clima, los cuales presentan diferentes subtipos en función las variaciones de la ETP que se produce en cada estación del año. Según Thornthwaite (1948). establece dos clasificaciones una en función de la humedad, y otra en función de la eficacia térmica.

Tabla 9

Clasificación Climática por el método de Thornthwaite.

EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD			EN FUNCIÓN DE LA EFICACIA TÉRMICA		
	Tipo de clima	índice de humedad		Tipo de clima	ETP en cm
A	Perhúmedo	> 100	A'	Mega térmico	> 114
B₄	Húmedo	80 ↔ 100	B' ₄	Meso térmico	99,7 ↔ 114
B₃	Húmedo	60 ↔ 80	B' ₃	Meso térmico	88,5 ↔ 99,7
B₂	Húmedo	40 ↔ 60	B' ₂	Meso térmico	71,2 ↔ 88,5
B₁	Húmedo	20 ↔ 40	B' ₁	Meso térmico	57 ↔ 71,2
C₂	Subhúmedo húmedo	0 ↔ 20	C' ₂	Micro térmico	42,7 ↔ 57
C₁	Subhúmedo seco	-33 ↔ 0	C' ₁	Micro térmico	28,5 ↔ 42,7
D	Semiárido	-67 ↔ -33	D	Micro térmico	14,2 ↔ 28,5
E	Árido	-100 ↔ -67	E	Micro térmico	< 14,2

Nota: Recuperado de *Thornthwaite (1948)*.**ETP:** *Evapotranspiración*

Según el método de Clasificación Climática por Thornthwaite, en función de la humedad que es de 67.86 %, en el área del Proyecto piloto se pueden encontrar el tipo de clima, Húmedo con presencia de lluvias en otoño y en verano.

3.6.3. Temperatura

Para la caracterización del régimen de temperatura en el proyecto piloto de Fitorremediación se contó con los datos del SENAMHI de la estación Meteorológica UNC-Cajamarca con un promedio anual de temperatura mínima de 5.52 °C y máxima de 22.31 °C del año 2017.

Como puede observar en el mes de diciembre donde se realizó la ejecución del proyecto cuenta con una temperatura mínima de 10° C y una temperatura máxima de 19°C.

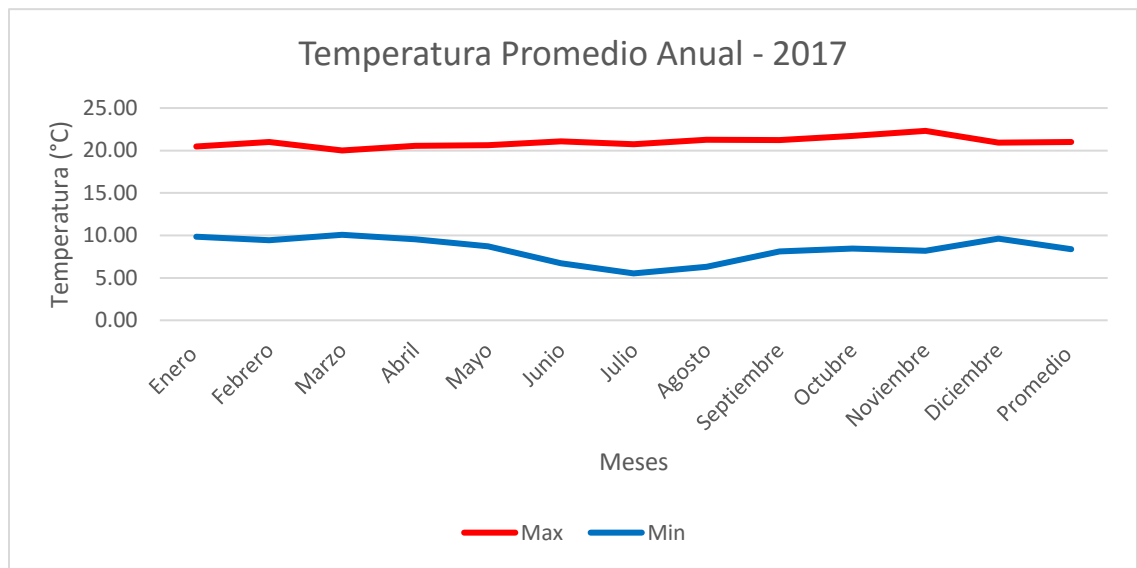


Figura 4: Estación UNC - Cajamarca - Temperatura Promedio Anual

Fuente: Elaborado por los autores

3.6.4. Precipitación

La época de lluvias en el distrito de Cajamarca, se concentra principalmente entre los meses de octubre y marzo; mientras que de mayo a septiembre se producen precipitaciones menores. Se puede apreciar que el mes más lluvioso ha sido el mes de diciembre con una precipitación de 149.10 mm de la estación Meteorológica La precipitación acumulada anual durante el periodo de registro de un año fue de 702.50 mm.

La precipitación en el periodo de ejecución para el mes de diciembre fue de 140 mm.

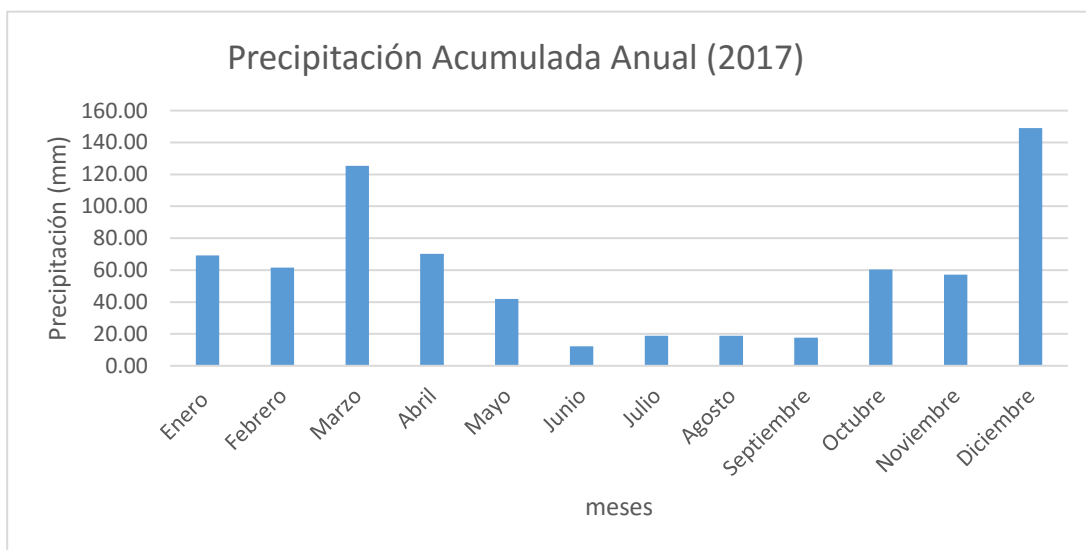


Figura 5: Estación UNC - Cajamarca - Precipitación de acumulación anual

Fuente: Elaborado por los autores

3.7. Diseño del sistema piloto y periodo de ejecución:

Todo este proceso del diseño del sistema, duro un periodo de siete días desde el 05/12/2017 al 11/12/2017, debido a que se tuvo que tomar en consideración vario criterios de diseño, para el periodo de muestre fue de dieciséis días que inicio desde el 12/12/2017 al 27/12/2018

3.7.1. Diseño de los fitobiorreactores

Según Delgadillo et al. (2010) este sistema está formado por 5 capas. Todo esto está dispuesto en una especie de tanque escavado totalmente recubierto con geo-membrana, con un área de 1m^2 cada uno de los fitobiorreactores.

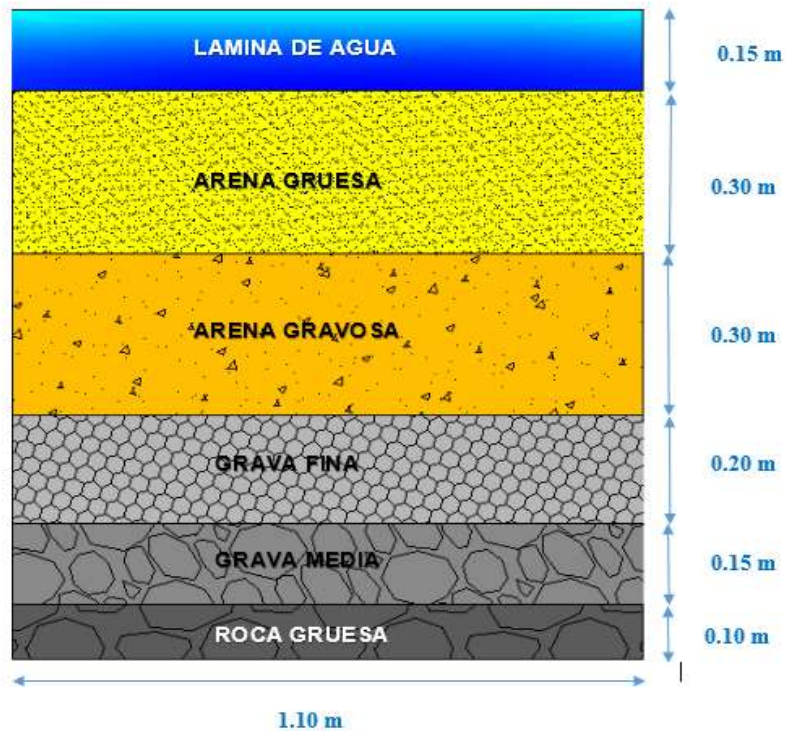


Figura 6: Vista de perfil del Fitobiorreactor

Fuente: Elaborado por los autores

Según Delgadillo et al. (2010) se debe considerar una del lecho de 0.3 a 1 metro.

En esta investigación se consideró 1.30 m de profundidad para los fitobiorreactores, de la cual se utilizó 1.15 m para disponer las diferentes capas de la grava incluyendo lámina de agua; que fueron suficiente para el caudal de los investigadores. Tomando 0.15 m sirvieron como barrera en caso de lluvias.

3.7.2. Criterios para dimensionar los reactores

Se consideró los siguientes criterios para cada una de las capas que constituyen el fitobiorreactor:

- **Lámina de agua:**

El agua ingresa por el sistema en la parte superficial hasta conseguir un espesor de lámina, de este modo se reducirá el paso por difusión del oxígeno al sistema y facilitará la estabilización de las condiciones anaeróbicas, el espesor de la lámina es de 15 cm.

Se ha considerado el valor representativo de porosidad para la lámina de agua en este caso 100% (Delgadillo et al 2010).

- **Capas de grava**

Tomando como referencia a Delgadillo et al. (2010) se consideró a 5 capas de diferentes profundidades como se detalla a continuación (el orden de las capas es descendente):

Orden	Tipo de Grava	Espesor - Capa	Porosidad
1	arena gruesa	30 cm	28 a 32%,
2	arena gravosa	30 cm	30 a 35%
3	grava fina	20 cm	35 a 38%
4	grava media	15 cm	36 a 40%
5	roca gruesa	10 cm	38 a 45%

Tabla 10

Orden de las capas de grava utilizada

Nota: Elaborado por los autores

Estos diferentes tipos de capas permiten que haya un flujo continuo de agua permitiendo así el crecimiento de plantas, para lograr producir el proceso de reducción de la Materia orgánica, además se ha considerado valores representativos de porosidad para las diferentes capas de grava y arena. (Delgadillo et al. 2010).

3.7.3. Criterios para el área superficial del fitobiorreactor:

Según Licapa Gladys (2015), para los criterios de dimensionamiento del área superficial de los fitobiorreactores se ha tomado en cuenta que, la distancia que debe haber entre plantas es de 20 cm, y para determinar la profundidad según Delgadillo et al. (2010) se ha considerado los niveles de grava y arena establecidos en la Tabla 10.

3.8. Metodología desarrollada Durante la Investigación

Todo el proceso de investigación se realizó en un periodo de dos meses. La construcción de los fitobiorreactores demoró un mes, durante quince días se adaptaron las plantas, posteriormente se ejecutó el monitoreo de agua de los fitobiorreactores para la obtención de datos, durante dieciséis días.

3.8.1. Trabajo de campo

a. Recolección de plantas

Para poder llevar a cabo la presente investigación, se obtuvieron las plantas de (*Schoenoplectus californicus*) – Totora, de la Laguna San Nicolás en el distrito de Namora.



Figura 7: Obtención de especies vegetales

b. Adaptación de la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* - Totorá.

La adaptación de la planta se realizó en jabsas recubiertas con plástico y una capa de arena durante un periodo de 15 días.



Figura 8: Adaptación de la especie vegetal *Schoenoplectus californicus* - Totorá

c. Excavación de celdas para los fitobiorreactores

En esta actividad se realizó el dimensionamiento de cada una de las celdas, teniendo en cuenta las bases teóricas y el espacio que debe de existir entre plantas para un desarrollo más eficiente, se utilizaron distintas herramientas (palanas, picos y una carretilla con el fin de extraer el material de la superficie).



Figura 9: Excavación de celdas para los fitobiorreactores

d. Llenado de fitobiorreactores

Estas celdas han sido construidas con geo-membrana, con una altura de 1.30 m y un largo y ancho de 1.00 m cada uno, todas las celdas se han rellenado con las cinco diferentes capas de grava hasta lograr una altura de 1.05 metro.



Figura 10: Relleno de Celdas para fitobiorreactores

e. Implementación del sistema de recirculación

Se ha diseñado un sistema de recirculación rudimentario, que consiste en un pequeño motor con dos mangueras, una perforada dentro del biorreactor y la otra en la parte superior del biorreactor con el fin de recircular el agua.



Figura 11: Motores adaptados en los fitobiorreactores.

f. Muestreo de aguas residuales del canal de Huacariz

Esta actividad se realizó con el apoyo del personal del Laboratorio de Control de Calidad de la EPS. SEDACAJ S.A. En esta actividad se utilizaron frascos esterilizados de un litro para recolectar la muestra de agua residual, luego se transportaron al laboratorio para determinar sus parámetros fisicoquímicos tales como: pH y DQO.



Figura 12: Muestreo de aguas residuales del Canal Huacariz

g. Siembra y distribución de la *Schoenoplectus californicus* - Totora en los fitobiorreactores

Esta etapa de siembra se llevó a cabo según la separación entre plantas (20 cm), obteniendo 9 plantas por fitobiorreactor, luego se inundó con el agua muestreada hasta obtener una lámina de agua de 0.15 metros.



Figura 13: Siembra de la totora en fitobiorreactores

h. Sistema piloto de los biorreactores.

El sistema piloto ha sido construido con geo-membrana, y como protección para la lluvia se ha hecho un techo con una altura de 1.30 m.



Figura 14: Sistema piloto de los fitobiorreactores

i. Monitoreo durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Este monitoreo se consideró en cada uno de los biorreactores, en los cuales se tomó muestras en frascos de 750 ml, previamente enjuagados 3 veces con el agua que fue analizada y se sumergieron a 15 cm. La toma de muestras se realizó, cada 24 horas (8:00 am) durante 16 días .



Figura 15: Monitoreo durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

j. Medición de crecimiento de plantas

Con la ayuda de una cinta métrica llevamos a cabo la medición de cada una de las plantas (9 unidades) por reactor. Dichas medidas nos ayudaron para el procesamiento de nuestros resultados.



Figura 16: Medición del crecimiento de plantas

3.8.1.1. Equipos, herramientas y materiales

A. Equipo

- Cama fotográfica.
- GPS.
- Motobomba de agua.

B. Herramientas

- Palana.
- Wuincha.
- Picos.
- Carretilla.
- Barreta.

C. Materiales

- Geo-membrana
- 1 ½ cubo grava fina
- 2 cubos Grava media
- 1 cubo Roca gruesa
- Calamina.
- Madera.
- Alambre de púas.
- Mangueras
- Tubos.
- Lapiceros.
- Libreta de apuntes.
- Bolsas ermiticas.
- Botas
- Guantes.
- Mascarillas.

D. Material biológico

- Totorá (*Schoenoplectus californicus*)

3.8.2. Trabajo de laboratorio

3.8.2.1. Análisis de Demanda Química de Oxígeno

Para evaluar la demanda química de oxígeno, se utilizó el método por digestión de reactor el procedimiento es el siguiente:

Primero: Se conectó el reactor; se precalentó a 150 °C. (con el escudo de plástico por seguridad).



Figura 17: Reactor de DQO

Segundo: Se tomó un tubo de reactivo para digestión de DQO para el rango apropiado. Uno para cada muestra. En este caso se utilizó el Rango alto.



Figura 18: Cooler de conservación de los tubos de reactivo

Tabla 11

Rangos de concentración de reactivo

Rango de conc. De muestras (mg/l)	Tipo de tubo de reactivo para DQO
0 a 150	Rango bajo
0 a 1500	Rango alto
0 a 15000	Rango alto plus

Nota: Recuperado de “Manual de análisis de agua - HACH”, Colorado, L. 2000, pg 182.

Tercero: Se destapó y sostuvo el tubo del reactivo en un ángulo de 45° y se agregó 2 ml de la muestra (se agrega esa cantidad según el rango que utilizamos).

Cuarto: Se selló y aseguro el tubo de ensayo, luego se agitó la muestra de una manera lenta y con mucho cuidado.



Figura 19: Agitación de la muestra.

Quinto: Se preparó un blanco, repitiendo todos los pasos, utilizando agua desionizada en lugar de la muestra. (esta nos permitió hacer la lectura de los resultados.)

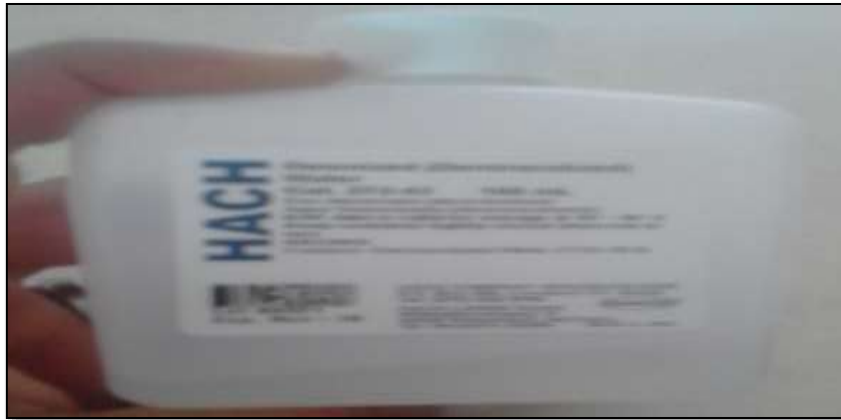


Figura 20: Frasco de agua desionizada

Sexto: Todos los tubos incluyendo el blanco fueron colocados en el reactor precalentado. Durante 2 horas.



Figura 21: Tubos preparador colocados en el Reactor.

Séptimo: Al termino del tiempo, se desconectó el reactor y dejó enfriar los tubos hasta llegar a una temperatura de 120°.

Octavo: Retiramos los tubos del reactor, los colocamos en una rejilla y esperamos a que se enfríe a temperatura ambiente.



Figura 22: Tubos enfriando a temperatura ambiente

Con la ayuda del espectrofotómetro se procedió a la determinación colorimétrica con el rango utilizado (1500 mg/l – N° Programa 2720)

Primero: Se ingresó el número del programa y colocó el adaptador para tubos.

Segundo: Limpiamos la parte exterior del blanco con una toalla, luego colocamos dicho tubo en el espectrofotómetro, saliendo como resultado 0 mg/l.

Tercero: Limpiamos el tubo con la muestra, se colocó en el espectrofotómetro y se realizó la lectura.



Figura 23: Tubo de muestra en el Espectrofotómetro

El procedimiento anterior se tiene que repetir para la lectura de cada muestra.

3.8.2.2. Equipos, Instrumentos y Materiales

A. Equipos

- Espectrofotómetro
- Reactor
- Peachimetro

B. Instrumentos

- Tubos de ensayo
- Gradilla
- Pipetas de 1 ml
- Bombilla de succión
- Papel absorbente

C. Materiales

- Reactivo para DQO

3.8.3. Trabajo de gabinete

- Se utilizó la información bibliográfica necesaria.
- Se elaboraron los planos de diseño del sistema piloto.
- Elaboración e interpretación de graficas de los análisis de resultados.

3.8.3.1.Equipos y materiales

A. Equipos

- Computadora portátil.
- Impresora.
- Lapiceros
- Memoria USB de 8 Gb.

B. Materiales:

- Internet.
- Softwares: ArcMap 10.5, Google Earth y AutoCAD.
- Papel A4

4. CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

Para la presentación de los resultados utilizaremos las siguientes abreviaciones:

- **R0:** Reactor que no cuenta con plantas, solo tiene las diferentes capas de grava.
- **R1:** Primer reactor que cuenta con 9 plantas y las diferentes capas de grava.
- **R2:** Segundo reactor que cuenta con 9 plantas y las diferentes capas de grava.
- **R3:** Tercer reactor que cuenta con 9 plantas y las diferentes capas de grava.

4.1.1. Análisis de pH

Tabla 12
Datos de análisis de pH

DÍA	R0	R1	R2	R3
1	7.25	7.19	7.09	7.02
2	7.18	7.05	7.09	7.19
3	7.22	7.21	7.29	7.12
4	7.23	7.14	7.24	7.05
5	7.08	7.09	7.27	7.16
6	7.14	7.16	7.23	6.96
7	7.11	7.03	7.29	6.98
8	7.24	7.22	7.18	7.16
9	7.21	7.18	7.15	7.24
10	7.17	7.04	7.15	7.15
11	7.09	7.07	7.06	7.21
12	7.15	7.01	7.06	7.06
13	7.13	7.18	7.22	7.04
14	7.2	7.22	7.24	7.01
15	7.14	7.02	7.07	7.03
16	7.12	7.13	7.26	7.18

Nota: Elaborado por los autores

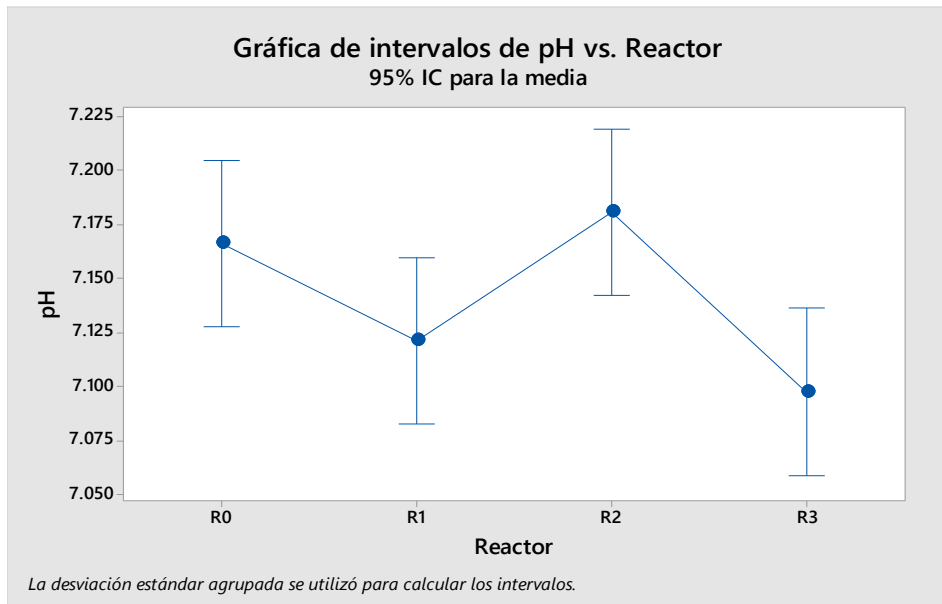


Figura 24: Intervalos del pH en los fitobiorreactores

Fuente: Elaborado por los autores

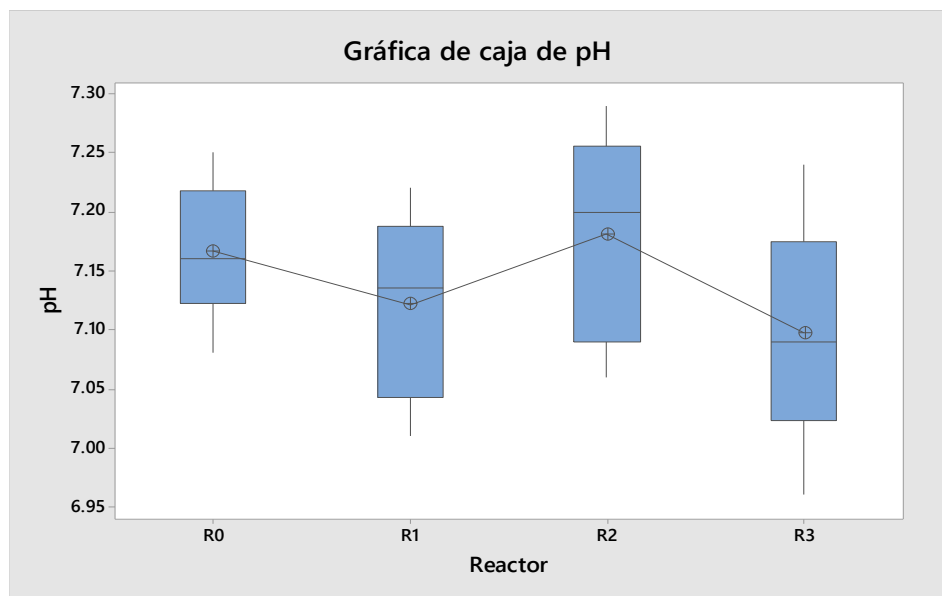


Figura 25: Caja de bigotes de pH

Fuente: Elaborado por los autores

Interpretación:

Si bien es cierto la determinación del pH no es un requisito para determinar los valores de los parámetros cinéticos, sin embargo, el pH fue indispensable para evaluar las condiciones en las que se desarrollaron los experimentos. Se ha determinado el valor del pH en cada una de las muestras obtenidas de los fitobiorreactores.

Según el muestreo realizado se ha demostrado que la variación del pH de las muestras es mínima, es decir los rangos de variación entre cada fitobiorreactor no son sustanciales, gráficamente se expresa en la caja de bigotes figura 25, e intervalos de pH figura 24.

4.1.2. Tendencia de la Materia orgánica (DQO) y Crecimiento de plantas

Para verificar si existe variabilidad a través del tiempo se analizan los datos en función a la disminución de la Materia orgánica expresada en el DQO y crecimiento de plantas, para ello elaboramos las gráficas de tendencias como herramientas descriptivas.

Tabla 13

Resultados de los datos de Tendencia de la Materia orgánica (DQO) y Crecimiento de plantas

Días de muestreo	R0 (mg/l)	Tamaño de Planta-R0 (cm)	R1 – DQO (mg/l)	Tamaño de Planta-R1 (cm)	R2 – DQO (mg/l)	Tamaño de Planta-R2 (cm)	R3 – DQO (mg/l)	Tamaño de Planta-R3 (cm)
Inicial	157.80	0.00	157.80	44.79	157.80	44.40	157.80	44.51
1	157.00	0.00	156.00	45.38	156.00	45.30	156.00	45.71
2	155.00	0.00	149.00	45.88	140.00	46.20	139.00	46.83
3	148.00	0.00	136.00	46.38	122.00	47.10	119.00	47.95
4	140.00	0.00	118.00	46.88	89.00	48.00	82.00	49.07
5	135.00	0.00	117.00	47.38	85.00	48.90	80.00	50.19
6	130.00	0.00	110.00	47.88	68.00	49.80	72.00	51.31
7	126.00	0.00	106.00	48.38	65.00	50.70	67.00	52.43
8	125.00	0.00	105.60	48.88	60.00	51.60	61.00	53.55
9	125.20	0.00	105.30	49.38	57.00	52.50	59.00	54.67
10	125.09	0.00	105.10	49.88	55.00	53.40	57.00	55.79
11	124.80	0.00	104.80	50.18	53.00	53.90	55.00	56.29
12	124.50	0.00	104.60	50.48	50.00	54.40	51.00	56.79
13	124.30	0.00	104.40	50.63	48.00	54.70	48.00	57.09
14	124.10	0.00	104.20	50.78	45.00	55.00	47.00	57.39
15	123.90	0.00	104.14	50.88	42.00	55.15	43.00	57.54
16	123.60	0.00	104.00	50.98	39.00	55.26	41.00	57.65

Nota: Elaborado por los autores.

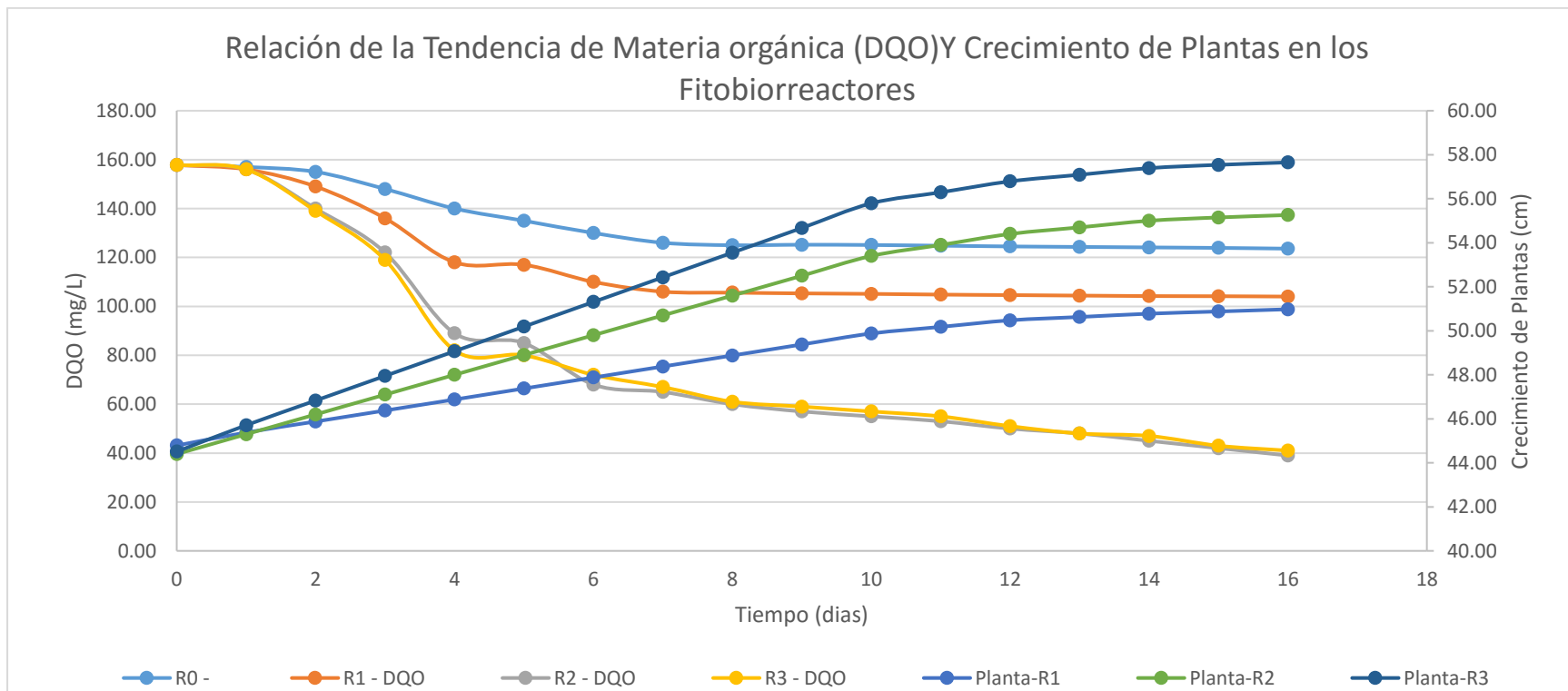


Figura 26: Relación de la Tendencia de la Materia orgánica (DQO) Y Crecimiento de Plantas en los Fitobiorreactores

Fuente: Elaborado por los autores

Interpretación:

Como podemos observar la figura 26, se observa una relación inversa ya que la materia orgánica (expresada en DQO) disminuye a través del tiempo mientras que las plantas aumentan de tamaño. Entre los 6 y 8 días el DQO empieza a estabilizarse; en el caso de las plantas el crecimiento comienza a estabilizarse a partir del día 10 hacia adelante. En relación con cada uno de los reactores podemos observar diferentes concentraciones de DQO y diferencia en el crecimiento de plantas, esto se debe a que durante el experimento se observó que el Reactor 1 tuvo menos incidencia de radiación solar, por ende las plantas de este reactor no produjeron de manera óptima la fotosíntesis, a comparación de los Reactores 2 y 3 los cuales estuvieron expuestos a mayor radiación solar y como consecuencia produjeron más fotosíntesis, motivo por el cual las plantas se desarrollaron más y ocurrió mayor disminución de la materia orgánica (porcentaje promedio de remoción 61.13%).

4.1.3. Rendimiento (Y)

$$Y = \frac{\Delta x}{\Delta DQO}$$

$\Delta x =$ *Diferencial del crecimiento de Plantas*

$\Delta DQO =$ *Diferencial de disminución de la Materia orgánica (DQO)*

Tabla 14
Resultados de datos de Rendimiento.

DÍA	Rendimiento - R1	Rendimiento - R2	Rendimiento - R3
	cm/ml.L	cm/ml.L	cm/ml.L
1	0.327	0.500	0.667
2	0.124	0.101	0.123
3	0.050	0.075	0.089
4	0.052	0.052	0.060
5	0.063	0.062	0.073
6	0.065	0.060	0.079
7	0.069	0.068	0.087
8	0.078	0.074	0.093
9	0.087	0.080	0.103
10	0.097	0.088	0.112
11	0.102	0.091	0.115
12	0.107	0.093	0.115
13	0.109	0.094	0.115
14	0.112	0.094	0.116
15	0.113	0.093	0.114
16	0.115	0.091	0.113

Nota: Elaborado por los autores.

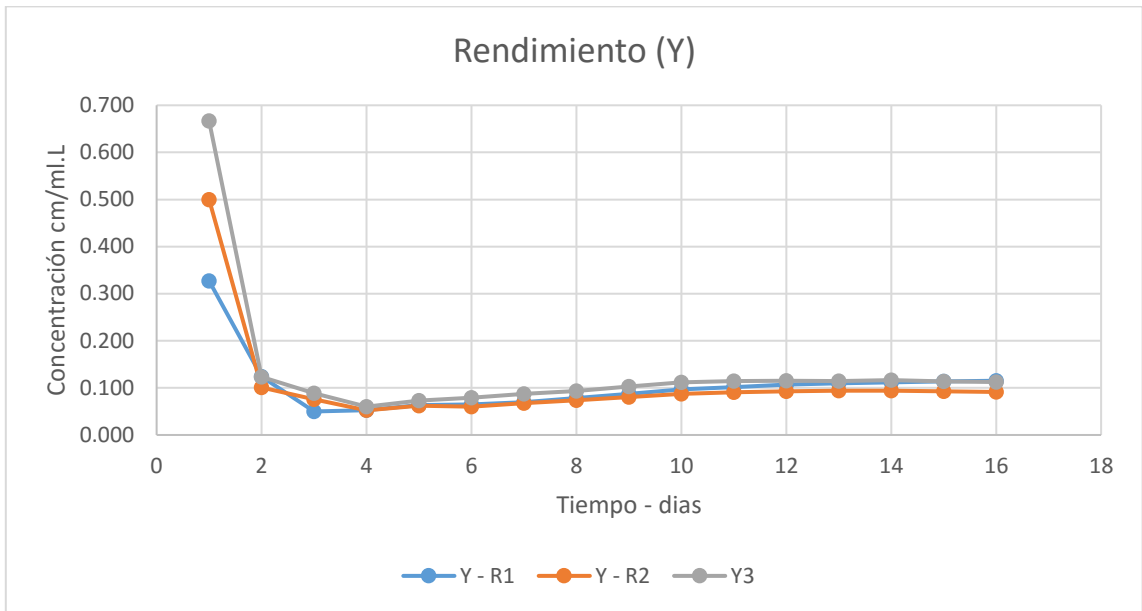


Figura 27: Rendimiento en relación al crecimiento de plantas y tendencia de la disminución de la Materia orgánica (DQO) en los Fitobiorreactores.

Fuente: Elaborado por los autores

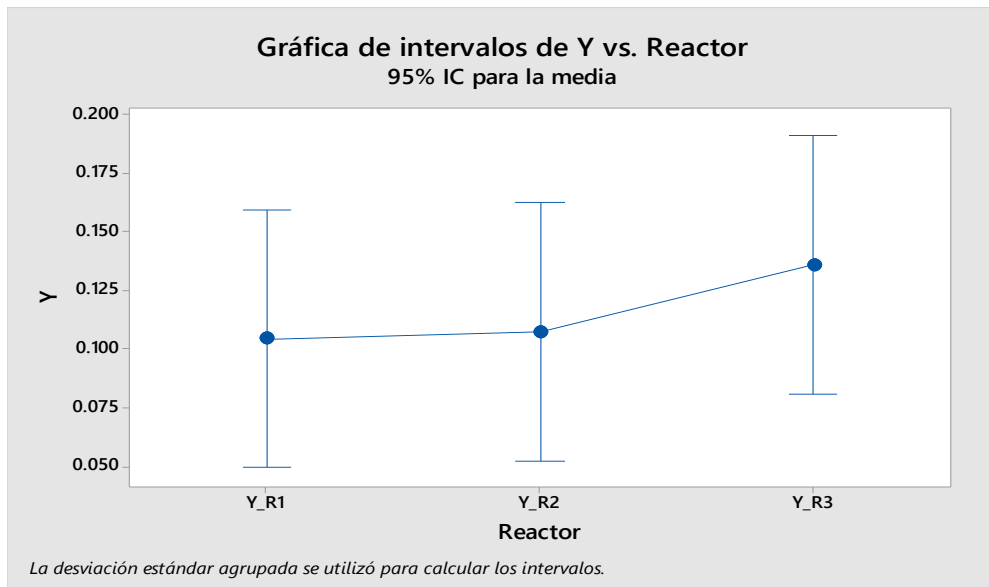


Figura 28: Intervalos del Rendimiento en cada uno de los fitobiorreactores

Fuente: Elaborado por los autores

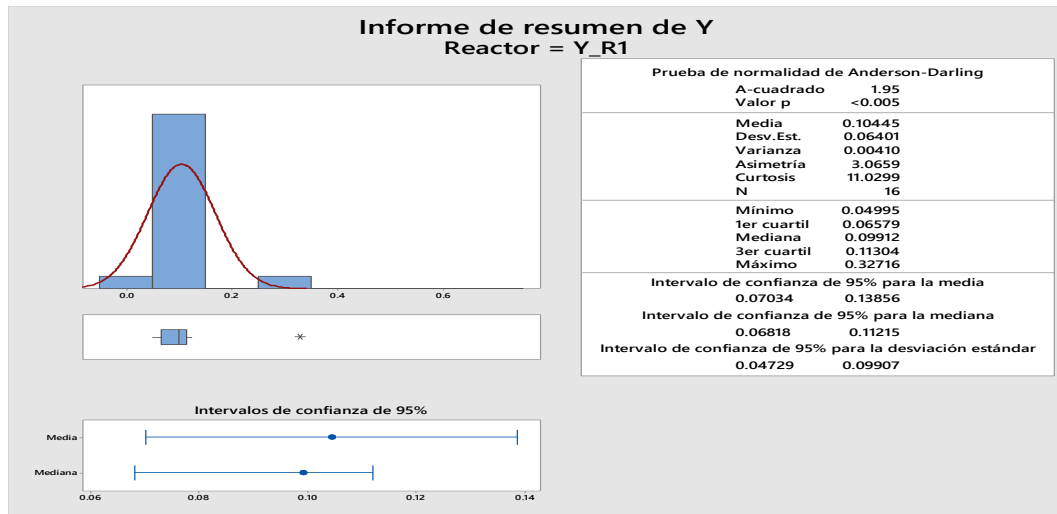


Figura 29: Rendimiento para el Reactor 1 (R1)

Fuente: Elaborado por los autores

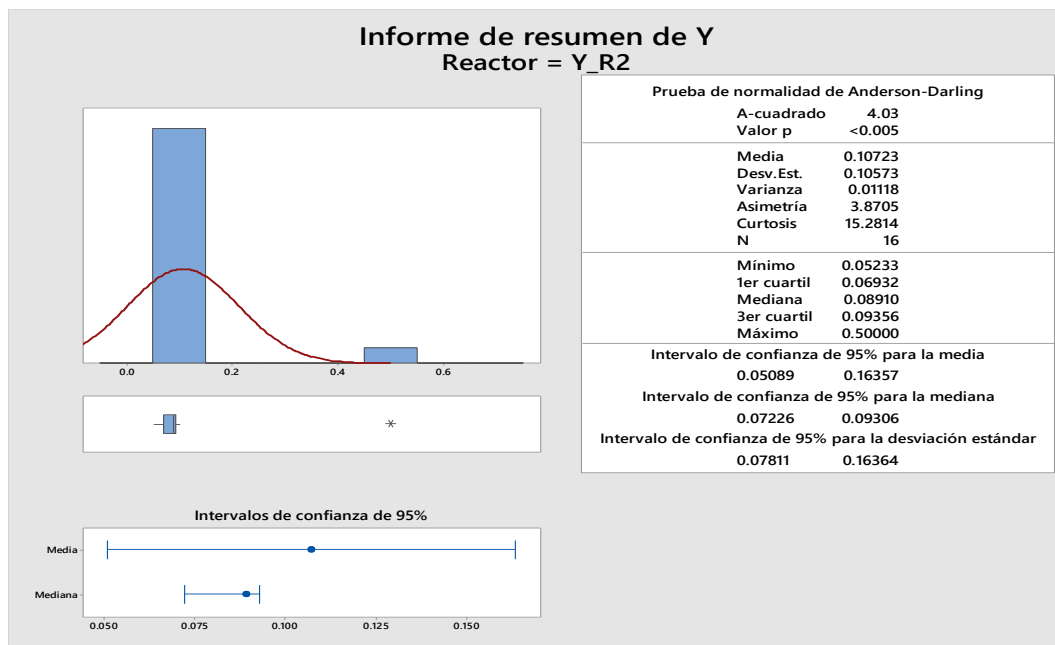


Figura 30: Rendimiento para el Reactor 2 (R2)

Fuente: Elaborado por los autores

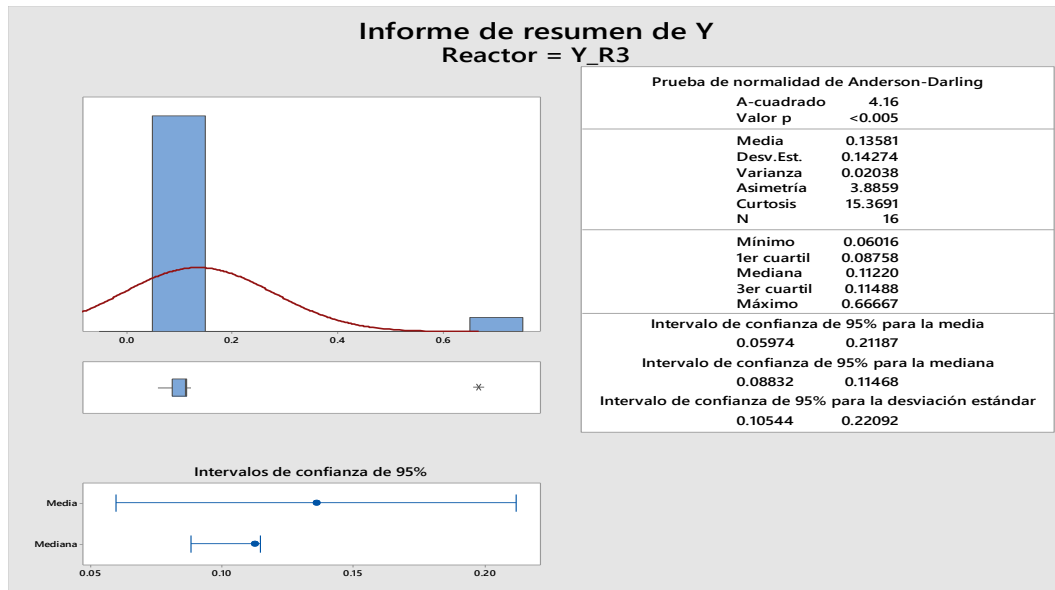


Figura 31: Rendimiento para el Reactor 3 (R3)

Fuente: Elaborado por los autores

Interpretación:

Según la figura 27, que representa el periodo registrado de los 16 días de monitoreo, entre el crecimiento de las plantas y la disminución de la Materia orgánica (DQO), se demuestra que el rendimiento máximo se dio en el tercer y cuarto día, motivo por el cual se puede inferir que el valor del parámetro cinético de rendimiento más eficiente es el que se da en los reactores (2 y 3) con un valor de 0.08 cm/mg.L.

En las figuras 29, 30, 31, donde se ve representado el rendimiento como la mediana para cada uno de los reactores, se determina que el mejor valor del parámetro cinético de rendimiento, se da en los reactores 2 y 3 así como se demuestran en las Campanas de Gauss para cada reactor.

4.1.4. Parámetros cinéticos de Monod

Tabla 15

Taza de utilización para la determinación de ecuaciones. (Inversa del sustrato)

R1(1/S)	R2(1/S)	R3(1/S)
0.00634	0.00634	0.00634
0.00641	0.00641	0.00641
0.00671	0.00714	0.00719
0.00735	0.00820	0.00840
0.00847	0.01124	0.01220
0.00855	0.01176	0.01250
0.00909	0.01471	0.01389
0.00943	0.01538	0.01493
0.00947	0.01667	0.01639
0.00950	0.01754	0.01695
0.00951	0.01818	0.01754
0.00954	0.01887	0.01818
0.00956	0.02000	0.01961
0.00958	0.02083	0.02083
0.00960	0.02222	0.02128
0.00960	0.02381	0.02326
0.00962	0.02564	0.02439

Nota: Elaborado por los autores

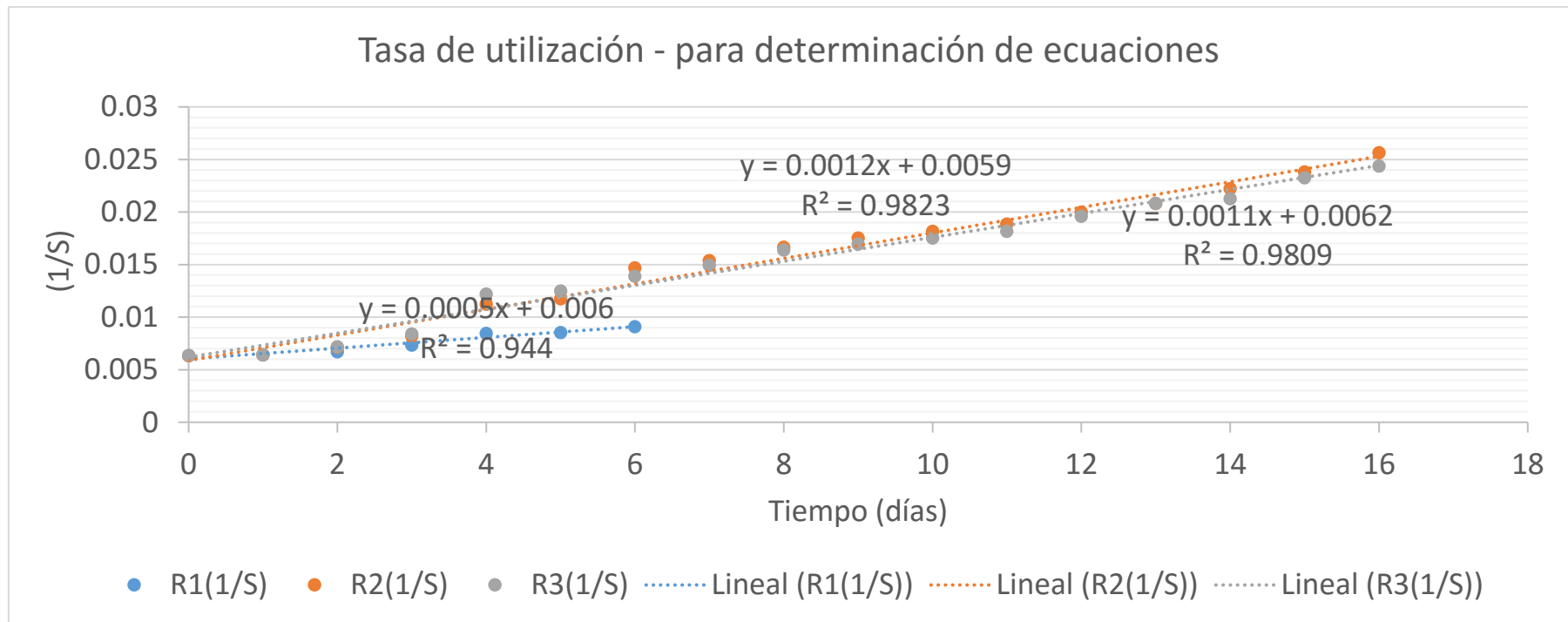


Figura 32: Tasa de utilización para la determinación de Parámetros cinéticos

Fuente: Elaborado por los autores

Formulas de la cinética de Monoth

Determinación de la tasa máxima de crecimiento específico (μ_{\max})

$$\mu = \frac{\mu_{\max} * S}{K_s + S}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \left(\frac{1}{S} \right) + \frac{1}{\mu_{\max}}$$

$$Y = mX + b$$

Tiempo de residencia hidráulica (θ)

$$\theta = \frac{S_0 - S}{X\mu_{\max}}$$

X = tamaño final de la planta – tamaño inicial

$$\text{Porosidad} = \frac{P_1 * h_1 + P_2 * h_2 + P_3 * h_3 + P_4 * h_4 + P_5 * h_5}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5}$$

Determinación de la tasa máxima de crecimiento específico (U_{\max})

Tiempo de residencia hidráulica (θ)

Diferencial de crecimiento de planta (X)

Constante de media velocidad (K_s)

DQO inicial (S_0)

DQO final (S)

Cálculos de parámetros cinéticos

Para R₁:

$$\frac{1}{U_{\max}} = 0.006$$

$$U_{\max} = \frac{1}{0.006} = 166.66 \text{ dia}^{-1}$$

$$\frac{K_s}{U_{\max}} = 0.0005$$

$$K_s = (0.0005)(166.66)$$

$$K_s = 0.0833 \text{ mg/l}$$

$$u = \frac{166.66 * 104}{0.0833 + 104} = 165.33 \text{ dia}^{-1}$$

$$X = 50.98\text{cm} - 44.8\text{cm} = 6.19 \text{ cm}$$

$$\theta = \frac{157.8-104}{6.19\text{cm} \times 166.66\text{dia}^{-1}} = 0.0521 \text{ día} = 1.25 \text{ h}$$

Para R2:

$$\frac{1}{U_{\max}} = 0.0059$$

$$U_{\max} = \frac{1}{0.0059} = 169.49 \text{ dia}^{-1}$$

$$\frac{K_s}{U_{\max}} = 0.0012$$

$$K_s = (0.0059)(169.49)$$

$$K_s = 0.203 \text{ mg/l}$$

$$u = \frac{169.49 * 39}{0.203 + 39} = 160.653 \text{ dia}^{-1}$$

$$X = 55.26\text{cm} - 44.4\text{cm} = 10.86 \text{ cm}$$

$$\theta = \frac{157.8-39}{10.86\text{cm} \times 169.49\text{dia}^{-1}} = 0.064\text{día} = 1.54 \text{ h}$$

Para R3:

$$\frac{1}{U_{\max}} = 0.0062$$

$$U_{\max} = \frac{1}{0.0062} = 161.29 \text{ dia}^{-1}$$

$$\frac{K_s}{U_{\max}} = 0.0011$$

$$K_s = (0.0062)(161.29 \text{ dia}^{-1})$$

$$K_s = 0.999 \text{ mg/l}$$

$$u = \frac{161.29 * 41}{0.999 + 41} = 157.453 \text{ dia}^{-1}$$

$$X = 57.65\text{cm} - 44.51\text{cm} = 13.14 \text{ cm}$$

$$\theta = \frac{157.8-41}{13.14\text{cm} \times 161.29\text{día}^{-1}} = 0.055\text{día} = 1.32 \text{ h}$$

Tabla 16

Tabla de valores de parámetros cinéticos obtenidos

P. C.	R1	R2	R3	Promedio	Desviación Estándar	%
μmax (día⁻¹)	166.660	169.490	161.290	165.813	4.165	2.5
Ks (mg/l)	0.083	0.203	0.999	0.428	0.498	116.2
Θ (horas)	1.250	1.540	1.320	1.370	0.151	11.0
Y	0.0992	0.089	0.112	0.100	0.012	11.5

Nota: Elaborado por los autores

Interpretación:

Los cuatro parámetros cinéticos antes determinados servirán a futuros investigadores para las proyecciones de diseño de plantas de tratamiento (teniendo en cuenta que esta investigación se realizó con nueve plantas de la misma especie vegetal), pues haciendo una comparación entre los tres fitobiorreactores investigados, se puede inferir que:

- La tasa máxima de crecimiento específico para estos fitobiorreactores es similar, tiene variabilidad baja, por lo tanto, es factible tomar el valor promedio para las consideraciones de diseños. Este valor de parámetro

cinético se traduce como el tiempo máximo donde se realizará la poda de la especie vegetal, con la finalidad de dar un mantenimiento al sistema.

- En cuanto a la velocidad de crecimiento podemos decir que presenta una variabilidad alta, esto se debe a que su valor es mínimo y por lo tanto tiene una incidencia poco significativa respecto al DQO, el valor recomendable a utilizarse para parámetros de diseño es el valor máximo obtenido de las velocidades de estos reactores.
- Los valores obtenidos para el tiempo de residencia hidráulica son similares, es por eso que presenta una variabilidad baja, entonces podemos decir que el valor promedio es factible para criterios de diseño.
- Considerar el rendimiento en este tipo de investigación es muy importante, pues el sistema empleado es de tipo batch y este depende de la velocidad de crecimiento y la concentración de materia orgánica; entonces podemos decir que el rendimiento que se debe considerar es el promedio, por ser el valor que engloba a los tres valores y tener un bajo porcentaje de variabilidad.

Ejemplo de aplicación para diseño:

Se desea diseñar una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas en el Centro Poblado Ahijadero del distrito de Bambamarca con la especie *Schoenoplectus californicus*, este lugar cuenta con un caudal de aguas residuales domesticas de 30 l/s, teniendo en cuenta que la tasa de crecimiento especifico (μ_{max}) es de 165.81 d^{-1} , la constante de media velocidad es de (Ks) es de 0.999 mg/l y el tiempo de residencia hidráulica es de (Θ) 1.37 h

Determinar el área que se necesita para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales, teniendo en cuenta que la porosidad de las capas de grava y arena es de 0.3 en promedio y que en un metro cuadrado la distancia entre planta y planta es de 20 cm y que la profundidad de las diferentes capas de arena es de 1 m y la lamina de agua es de 15 cm y para evitar que el efluente del agua se sobresalga se deja 15 cm de altura.

$$\Theta = \frac{V_t \times P}{Q}$$

$$V_t = \frac{\Theta \times Q}{P}$$

$$A = \frac{V_t}{\text{Profundidad}}$$

Donde:

Vt: Volumen total

Q: Caudal

P: Porosidad

$$V_t = \frac{1.37 \text{ h} \times 108 \text{ m}^3/\text{h}}{0.3} = 348 \text{ m}^3$$

$$A = \frac{348 \text{ m}^3}{1.30 \text{ m}} = 267.69 \text{ m}^2$$

4.2. DISCUSIÓN

En esta investigación se ha logrado, la disminución de materia orgánica en un porcentaje promedio de 61.13%, en relación a los fitobiorreactores 1, 2 y 3, con la especie *Schoenoplectus californicus*, en un área de 1 m², altura de la lámina de agua de 0.15m, con grava como material de soporte y 9 plantas de la especie antes mencionada en cada fitobiorreactor; con un volumen de agua tratada de 513 L, durante un tiempo de retención hidráulica de 16 días, en comparación con la investigación realizada por López (2016) para la depuración de aguas servidas en zonas rurales, utilizando las especies *Phragmites australis* (Phr) y *Schoenoplectus californicus* (Sch) en 4 sistemas, a escala piloto de humedales de flujo horizontal subsuperficial, con un área de 4,5 m², altura de lámina de agua 0,4 m, grava como material de soporte y 18 plantas de las especies mencionadas; tuvo como resultados en la eficiencia de la disminución de la materia orgánica en un 40-73%, además menciona que la planta que tuvo mayor cobertura fue la *Schoenoplectus californicus*. La investigación realizada por Mariñelarena et al. (2005) para tratamiento de efluentes de la destilería de la empresa Repsol, donde utilizo las especies *Schoenoplectus californicus*, *Soják* y *Typha sp*, en un humedal experimental de flujo subsuperficial de 60 m², registraron una eficiencia de la disminución de materia orgánica de 24% y 34%. Entonces podemos deducir que, en relación a las investigaciones antes mencionadas y la investigación realizada dio como resultado una eficiencia en la remoción de la materia orgánica teniendo en cuenta que las condiciones de tratamiento de los efluentes fueron diferentes y el número de plantas en relación a la especie en la que se enfocó nuestra investigación.

Por otro lado Poveda (2014) en un estudio realizado sobre la fitorremediación de aguas residuales industriales y de uso agrícola, aplicó como plantas depuradoras al Lechuguín y la Lenteja, disminuyendo la materia orgánica en 93.6%, 93.7%, respectivamente, demostrando así que la depuración con plantas acuáticas es una alternativa viable; al igual que Marín y Correa (2010) en el estudio realizado sobre evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua Angustifolia*, con un lecho de grava logró disminuir la materia orgánica en un 64.35%, corroborando así que la remoción de contaminantes es más eficiente con la arena y dando fe que el proceso de depuración es una alternativa viable, por lo tanto los resultados de disminución de materia orgánica (DQO) en nuestra investigación están dentro de los rangos de remoción de las investigaciones mencionadas.

En cuanto a la determinación de valores de parámetros cinéticos de residencia hidráulica el valor promedio es 0.057 día, con el que se busca hallar el volumen total para proyecciones de humedales, en comparación a la investigación realizada por Mariñelarena et al. (2005) en la que determina que el tiempo de residencia hidráulica es de 0.9 a 0.4 día. Esto se da debido a que el área que emplea es mucho mayor al área que utilizamos en esta investigación; nos limitamos en discutir los resultados de los otros parámetros cinéticos, pues se carece de investigaciones referentes a la determinación de estos mediante la depuración de aguas residuales por fitorremediación.

5. CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Mediante los valores obtenidos de la Materia orgánica expresada en DQO y las medidas de las plantas durante todo este proceso de investigación, podemos decir que existe una relación inversa entre estos dos factores, esta analogía se presencié más entre los días seis y ocho, pues en esos días ocurre una disminución exponencial en el caso de la materia orgánica y el crecimiento exponencial entre los días ocho y diez para el crecimiento de la planta, a partir del día diez ambos factores comienzan una estabilización, el crecimiento de la planta se vuelve más lento y la materia orgánica se mantiene.
- Se lograron determinar los valores de los parámetros cinéticos, mediante el modelo de Monod, con la ayuda de los valores obtenidos durante la investigación; dando como resultados óptimos para, el μ_{max} (tasa máxima de crecimiento específico) 65.813 día^{-1} , constante de media velocidad (K_s), 0.999 mg/l , el tiempo de residencia hidráulica es de 1.37 h y para el rendimiento es de 0.100 cm/mg.l

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar esta investigación para proyecciones de PTAR de poblaciones no muy extensivas, con mejoras en su sistema.
- A los investigadores se les recomienda investigar con un nuevo filtro, cambiar las diferentes capas de grava, por un filtro que resulte de mayor ventaja en el tratamiento de agua residual.
- A los investigadores se les recomienda, realizar la investigación con la combinación de especies vegetales, que ayuden al eficiente tratamiento de aguas residuales.
- Se recomienda que la investigación se realice con la variación de la cantidad de plantas respecto a un área específica.
- Se recomienda tener en cuenta para investigaciones posteriores, la radiación solar directa hacia las plantas.
- Se debe tener en cuenta la medida de la masa foliar de las plantas.

6. LISTA DE REFERENCIAS

- Autoridad Nacional del Agua. (2016). Monitoreo de la calidad de agua superficial 300 m aguas abajo del puente Mashcon. Cajamarca, Perú.
- Arias, S. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. 23-24p.
- Agencia de Protección Ambiental (EPA). (1996). Ficha Tecnológica. Washington, Estados Unidos.
- Curt, M., Muñoz, M., Beascochea, E.. (2012). Manual de fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Madrid,España: Fundación Global Nature.
- Chiocchio, V. (2000). Influencia de las raíces sobre las poblaciones fúngidas del suelo: efecto rizoplano-rizósfera. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L. y Andrade, M. (2010). Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Cochabamba, Bolivia.
- Delgadillo, A., González, C., Prieto, F., Villagómez, R.. (2011). Fitorremediación: Una Alternativa Para Eliminar La Contaminación. Revista Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14, 16.
- Benavent,I.. (2014). Optimización De Lagunas De Estabilización Mediante El Uso De Macrofitas. Piura: Universidad Nacional de Piura.

- Empresa Prestadora de Servicio de Saneamiento de Cajamarca-Sociedad Anonima. (2013). Ampliación y mejoramiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cajamarca. Cajamarca, Perú.
- Garcia, Z. (2012). Comparación y evaluación de tres plantas acuáticas para determinar la eficiencia de remoción de nutrientes en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Grado en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Hadad, H., Maine, M.. (2016). Phragmites Australis Y Schoenoplectus Californicus. en Humedales Construidos: Desarrollo Y Asimilacion De Nutrientes. En Memorias De La II Conferencia Panamericana De Sistemas De Humedales Para El Tratamiento Y Mejoramiento De La Calidad Del AGUA(164). Argentina: Universidad Nacional del Litoral.
- Lara, J. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Instituto Catalán de Tecnología, Barcelona, España.
- Licapa, G.. (2015). Influencia del Tiempo de Retención y Composición de Sustrato en la Remoción de Hierro y Cobre del Drenaje Ácido de Mina. Cajamarca: Universidad Nacional de Cajamarca.
- López, D.. (2016). Evaluacion Estacional De Humedales Construidos De Flujo Horizontal Subsuperficial Para La Depuracion De Aguas Servidas En Zonas Rurales: Implicancias En La Generacion De Metano. Chile: Universidad de Concepción.
- Llagas, W. y Guadalupe, E. (2006). Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas en la UNMSM. Revista del Instituto de

Investigaciones de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 9 (17) 85-95p.

- Marín, J. y Correa, J. (2010). Evaluación de la remoción de contaminantes en aguas residuales en humedales artificiales utilizando la *Guadua angustifolia* Kunth. Tesis de Grado en Tecnología Química, Universidad Tecnológica, Pereira, Colombia.
- Mariñelarena, A., Di Giorgi, H. y Donadelli, J.. (2005). Humedales construidos para el tratamiento avanzado de efluentes industriales. Libro de resúmenes del “III Congreso Argentino de Limnología”. Argentina: INTECH (Instituto Tecnológico de Chascomús), IIB (Instituto de Investigaciones Biotecnológicas) - CONICET.
- Medina, L. y Cirujano, S. (2002). Plantas Acuáticas de las Lagunas y Humedales de Castilla - La Mancha. Madrid: FARESO.
- Metcalf; Eddy. (1995). Ingeniería de aguas residuales: tratamiento vertido y reutilización, (3a. ed.). Madrid: MC Graw Hill.
- Mufarrege, M. (2012). Tolerancia y eficiencia de *TypHa domingensis* Pers. en la retención de metales y nutrientes de efluentes industriales. Tesis. Doctoral en Ciencias Biológicas, Universidad Nacional del Litoral, Ciudad de Santa Fe, Argentina.
- Núñez, R; Vong, Y; Ortega, R; Olguín, E. (2004). Fitorremediación: fundamentos y aplicaciones. Revista Ciencia, 60-71._
- Otálora, A. (2011). Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la

locación petrolera de Caño Gandúl. Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

- Piñeyro, M. (2013). EXPERIENCIA PILOTO CON HUMEDALES CONSTRUIDOS: efectos de la estacionalidad de un ciclo anual en el tratamiento de efluentes de un frigorífico de pescado. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Poveda, R. (2014). Evaluación de especies acuáticas flotantes para la fitorremediación de aguas residuales industrial y de uso agrícola previamente caracterizada en el Cantón Ambato, provincia de Tungurahua. Tesis de grado en Ingeniero Bioquímico, Universidad técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.n
- Ramalho, R. (1996). Tratamiento de Aguas Residuales. Barcelona, España: Reverté.
- Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento. (2015). Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento. (1ª. Ed.). Lima.
- Vesilind,P y Morgan, S.. (2001). Introducción a la Ingeniería Ambiental. México: Willey.

Sitios Web

- Nolasco, E.. (2015). Cinética de Crecimiento Celular: Ecuación de Monod.. marzo 13, 2018, de Universidad Autónoma del Estado de México Sitio web: <https://es.slideshare.net/edya69/ecuacin-de-monod>.
- Sánchez, K. (2016, enero). Totora especial reduciría la contaminación del Titicaca. La Republica [en línea]. Disponible en: <http://larepublica.pe/sociedad/912946-totora-especial-reduciria-la-contaminacion-del-titicaca> [2017, 7 mayo.
- Silva, J.. ((s/f)). HUMEDALES CONSTRUIDOS. junio 01, 2017, de Universidad del Valle - Colombia Sitio web: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/e/fulltext/gestion/humedales.pdf>
- Thornthwaite. (2001). Clasificación Climática Sistema Thornthwaite. marzo 14, 2018, de DEB consulting Sitio web: <https://debconsulting.weebly.com/clasif-climat-wt.html>
- Celestino, J.. (s/f). Schoenoplectus californicus (C.A.Mey.) Soják. junio 09, 2018, de Jardín Botánico de Bogotá Sitio web: <http://colecciones.jbb.gov.co/herbario/especimen/9752>
- The Plant List. (2012). Schoenoplectus californicus (C.A.Mey.) Soják is an accepted name. junio 10,2018, de The Plant List Sitio web: <http://www.theplantlist.org/tpl1.1/record/kew-262943>
- Senamhi. (2017). Precipitación - Temperatura. diciembre 12, 2017, de MINAM Sitio web: <https://www.senamhi.gob.pe/>

7. ANEXOS

ANEXO 1: TABLA DE MEDIDAS DE CRECIMIENTO DE PLANTAS DE FITOBIOREACTORES (cm)

REACTORES	DÍA	Número de Plantas por cada reactor								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
R1	1	45.5	45.8	45.1	45	45.2	46.3	45.8	44.8	44.9
	2	46.00	46.30	45.60	45.50	45.70	46.80	46.30	45.30	45.40
	3	46.50	46.80	46.10	46.00	46.20	47.30	46.80	45.80	45.90
	4	47.00	47.30	46.60	46.50	46.70	47.80	47.30	46.30	46.40
	5	47.50	47.80	47.10	47.00	47.20	48.30	47.80	46.80	46.90
	6	48.00	48.30	47.60	47.50	47.70	48.80	48.30	47.30	47.40
	7	48.50	48.80	48.10	48.00	48.20	49.30	48.80	47.80	47.90
	8	49.00	49.30	48.60	48.50	48.70	49.80	49.30	48.30	48.40
	9	49.50	49.80	49.10	49.00	49.20	50.30	49.80	48.80	48.90
	10	50.00	50.30	49.60	49.50	49.70	50.80	50.30	49.30	49.40
	11	50.30	50.60	49.90	49.80	50.00	51.10	50.60	49.60	49.70
	12	50.60	50.90	50.20	50.10	50.30	51.40	50.90	49.90	50.00
	13	50.75	51.05	50.35	50.25	50.45	51.55	51.05	50.05	50.15

	14	50.90	51.20	50.50	50.40	50.60	51.70	51.20	50.20	50.30
	15	51.00	51.30	50.60	50.50	50.70	51.80	51.30	50.30	50.40
	16	51.10	51.40	50.70	50.60	50.80	51.90	51.40	50.40	50.50
R2	1	45.2	44.9	45.2	46	45.4	44.9	45.5	45.1	45.5
	2	46.1	45.8	46.1	46.9	46.3	45.8	46.4	46	46.4
	3	47	46.7	47	47.8	47.2	46.7	47.3	46.9	47.3
	4	47.9	47.6	47.9	48.7	48.1	47.6	48.2	47.8	48.2
	5	48.8	48.5	48.8	49.6	49	48.5	49.1	48.7	49.1
	6	49.7	49.4	49.7	50.5	49.9	49.4	50	49.6	50
	7	50.6	50.3	50.6	51.4	50.8	50.3	50.9	50.5	50.9
	8	51.5	51.2	51.5	52.3	51.7	51.2	51.8	51.4	51.8
	9	52.4	52.1	52.4	53.2	52.6	52.1	52.7	52.3	52.7
	10	53.3	53	53.3	54.1	53.5	53	53.6	53.2	53.6
	11	53.8	53.5	53.8	54.6	54	53.5	54.1	53.7	54.1
	12	54.3	54	54.3	55.1	54.5	54	54.6	54.2	54.6
	13	54.6	54.3	54.6	55.4	54.8	54.3	54.9	54.5	54.9
	14	54.9	54.6	54.9	55.7	55.1	54.6	55.2	54.8	55.2
	15	55.05	54.75	55.05	55.85	55.25	54.75	55.35	54.95	55.35
	16	55.16	54.86	55.16	55.96	55.36	54.86	55.46	55.06	55.46

R3	1	46.3	45.8	45.7	45.2	45.4	45.5	46.3	45.7	45.5
	2	47.42	46.92	46.82	46.32	46.52	46.62	47.42	46.82	46.62
	3	48.54	48.04	47.94	47.44	47.64	47.74	48.54	47.94	47.74
	4	49.66	49.16	49.06	48.56	48.76	48.86	49.66	49.06	48.86
	5	50.78	50.28	50.18	49.68	49.88	49.98	50.78	50.18	49.98
	6	51.9	51.4	51.3	50.8	51	51.1	51.9	51.3	51.1
	7	53.02	52.52	52.42	51.92	52.12	52.22	53.02	52.42	52.22
	8	54.14	53.64	53.54	53.04	53.24	53.34	54.14	53.54	53.34
	9	55.26	54.76	54.66	54.16	54.36	54.46	55.26	54.66	54.46
	10	56.38	55.88	55.78	55.28	55.48	55.58	56.38	55.78	55.58
	11	56.88	56.38	56.28	55.78	55.98	56.08	56.88	56.28	56.08
	12	57.38	56.88	56.78	56.28	56.48	56.58	57.38	56.78	56.58
	13	57.68	57.18	57.08	56.58	56.78	56.88	57.68	57.08	56.88
	14	57.98	57.48	57.38	56.88	57.08	57.18	57.98	57.38	57.18
	15	58.13	57.63	57.53	57.03	57.23	57.33	58.13	57.53	57.33
	16	58.24	57.74	57.64	57.14	57.34	57.44	58.24	57.64	57.44

ANEXO 1: IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE *Schoenoplectus californicus* – TOTORA.

