

DISEÑO DE HUMEDAL CONSTRUIDO PARA DESHIDRATACIÓN DE LODOS EN CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ

Eimy Natalia Poveda Quintana
Maria Paula Venegas Urbina
Universidad Militar Nueva Granada

Notas del autor

Eimy Natalia Poveda Quintana Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada

Maria Paula Venegas Urbina, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada

La correspondencia relacionada con trabajo de grado debe ser dirigida a Eimy Natalia Poveda Quintana ^a y Maria Paula Venegas Urbina ^b, Universidad Militar Nueva Granada, Cajicá, Cundinamarca

Contacto: ^au5400064@unimilitar.edu.co, ^bu5400074@unimilitar.edu.co



**DISEÑO DE HUMEDAL CONSTRUIDO PARA DESHIDRATACIÓN DE LODOS
EN CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

Trabajo de grado presentado por

Eimy Natalia Poveda Quintana

Maria Paula Venegas Urbina

como requisito parcial para optar al título de

Ingeniera ambiental

Universidad Militar Nueva Granada

Facultad de Ingeniería, Campus Nueva Granada

Trabajo de grado

Cajicá, Colombia

2021

**DISEÑO DE HUMEDAL CONSTRUIDO PARA DESHIDRATACIÓN DE LODOS
EN CONDICIONES CLIMÁTICAS DE LA SABANA DE BOGOTÁ**

Eimy Natalia Poveda Quintana

Maria Paula Venegas Urbina

APROBADO:

Gustavo Andrés Baquero Rodríguez. Ph.D.
Tutor

Eileen Chiquinquirá Sanz

Firma

Oscar Javier Bernal

Firma

Nota de Advertencia

“La Universidad no se hace responsable de los conceptos emitidos por sus estudiantes en sus proyectos de trabajo de grado, sólo velará por la calidad académica de los mismos, en procura de garantizar su desarrollo de acuerdo con la actualidad del área disciplinar respectiva. En el caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en cuestión, el estudiante – autor asumirá toda la responsabilidad y saldrá en defensa de los derechos. Para todos los derechos la universidad actúa como un tercero de buena fe”. (Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995)

Agradecimientos

A Dios por permitirnos culminar con esta etapa tan gratificante en nuestras vidas siendo mejores personas cada día.

A nuestras familias por apoyarnos en nuestras decisiones, por guiarnos, acompañarnos y por darnos la oportunidad de estudiar en una universidad tan maravillosa.

A la Universidad Militar Nueva Granada por brindarnos las herramientas necesarias de aprendizaje y por formarnos como profesionales íntegros, con propósitos cuya finalidad es mejorar cada día y ser mejores profesionales.

Al Ing. Gustavo Andrés Baquero Rodríguez por su disposición, paciencia, apoyo, conocimiento y seguimiento en nuestro proceso formativo como estudiantes y en la realización del trabajo de grado.

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo en primer lugar a Dios, quien nos ha dado salud y fuerza para superar todos los momentos difíciles a lo largo de nuestras vidas, queremos darle gracias a él por permitirnos culminar con un proceso formativo universitario muy importante para nosotras, por permitirnos ingresar a una universidad tan importante como la Universidad Militar Nueva Granada, para hacer cumplimiento de uno de nuestros sueños como lo es ser profesionales, damos gracias a nuestra familias por apoyarnos, guiarnos y creer en nosotras en cualquier circunstancia, de la misma manera damos gracias a nuestro tutor el Ing. Gustavo Andrés Baquero Rodríguez por su tiempo, su paciencia y sus enseñanzas ya que fueron muy enriquecedoras en nuestro proceso formativo y como personas permitiéndonos abarcar una de las problemáticas más importantes como lo es la gestión de lodo subproducto del tratamiento de aguas residuales.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
2.1. Descripción y Formulación	3
3. OBJETIVOS.....	4
3.1. Objetivo General	4
3.2. Objetivos Específicos	4
4. JUSTIFICACIÓN.....	5
5. ALCANCE Y DELIMITACIÓN.....	6
6. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE.....	7
6.1. Humedales para el Tratamiento de Lodo	8
6.2. Consideraciones de Diseño y Operación.....	9
6.2.1. Tasa de Carga de Sólidos	9
6.2.2. Vegetación	10
6.2.3. Períodos de Carga y Descanso.....	10
6.2.4. Operación.....	10
6.2.5. Sistema de Aireación	11
6.3. Procesos en el humedal para el tratamiento de lodo	12
6.3.1. Evapotranspiración	12
6.3.2. Mineralización	13
6.4. Remoción de nutrientes y contaminantes en los STW	13
6.5. Generación de Lodos en el Tratamiento de Agua Residual	14
6.6. Tratamiento y Disposición de Lodos a Nivel Local.....	15
6.7. Condiciones ambientales locales.....	16
7. METODOLOGÍA.....	17
7.1. Revisión de la Literatura	17
7.2. Recolección y Presentación de la Información	17
7.2.1. Características del Humedal para el Tratamiento de Lodo.....	17

7.2.2.	Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo	17
7.2.3.	Características del Humedal para el Tratamiento de Lodo.....	19
7.2.4.	Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo	19
7.2.5.	Indicadores Cualitativos de Lodo	19
7.2.6.	Remociones de contaminantes y nutrientes en los STW	20
7.3.	Diseño y Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo del Caso de Estudio..	20
7.3.1.	Producción de Lodo en Términos de Masa Seca	22
7.3.2.	Área Total Requerida (m ²).....	23
7.3.3.	Determinación del Número de Camas	23
7.3.5.	Operación	24
7.3.6.	Densidad de plantas	25
7.3.7.	Cálculo de evapotranspiración	25
7.3.8.	Cálculo de pérdida de agua para la puesta en marcha	25
7.4.	Elaboración del Diseño Experimental.....	26
7.5.	Elaboración de Informe y Divulgación de Resultados.....	26
8.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27
8.1.	Procedimientos para el Diseño de Humedales para el Tratamiento de Lodo.....	27
8.1.1.	Procedimientos Reportados en la Literatura	27
8.2.	Valores de Referencia Reportados en la Literatura.....	29
8.3.	Consideraciones necesarias para el diseño y operación	35
8.4.	Aplicabilidad de procedimientos.....	40
8.5.	Procedimiento Propuesto para el Diseño y Operación de un Humedal para el Tratamiento de Lodo.....	43
8.6.	Diseño Experimental	44
8.7.	Costos	47
8.7.1.	Costos del Diseño Experimental	47
9.	CONCLUSIONES.....	49
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	51
11.	ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de referencia de acuerdo con los parámetros para el diseño del humedal para el tratamiento de lodos.	11
Tabla 2. Dimensionamiento del medio filtrante.....	36
Tabla 3. Costo de los materiales requeridos para construir el diseño experimental	47
Tabla 4. Costo de los materiales requeridos para construir el diseño del caso de estudio.....	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Humedal para el tratamiento de lodo	9
Figura 2. Precipitaciones diarias presentadas durante el año 2020.....	16
Figura 3. Metodología para el diseño de humedales para el tratamiento de lodo.....	18
Figura 4. Metodología aplicada para la revisión de la literatura	19
Figura 5. Vista aérea del campus Nueva Granada	21
Figura 6. PTAR de la Universidad Militar Nueva Granada	21
Figura 7. Procedimiento para determinar el número de camas.....	24
Figura 8. Procedimiento para el diseño de un STW reportado en artículos	28
Figura 9. Procedimiento para el diseño de un humedal para el tratamiento de lodo	29
Figura 10. Carga de lodo en humedales para tratamiento de lodo.....	30
Figura 11. Especies de plantas implementadas en los sistemas STW	31
Figura 12. Días de carga de lodo del humedal.....	32
Figura 13. Días de descanso de lodo del humedal.....	32
Figura 14. Temperatura ambiente para el desarrollo y crecimiento de las plantas.....	33
Figura 15. Eficiencias de remoción según la revisión bibliográfica en humedales.....	34

Figura 16 . Configuración de los Humedales en la PTAR del caso de estudio	37
Figura 17. Número de camas necesarias para tratar la totalidad del lodo	37
Figura 18. Ciclo de operación del humedal en temporada seca.....	39
Figura 19. Ciclo de operación del humedal en temporada lluvia	39
Figura 20. Procedimiento propuesto para el diseño y operación del humedal	44
Figura 21. Configuración del banco de pruebas y puesta en marcha	45

TABLA DE ANEXOS

ANEXO No 1. Convenciones de fuentes bibliográficas consultadas en el análisis estadístico	57
ANEXO No 2. Tipos de lodo, tratamientos convencionales y disposición final de lodos.....	59
ANEXO No 3. Diseño humedal para el tratamiento de lodo	62
ANEXO No 4. Hoja de cálculo de lodos activados del humedal para el tratamiento de lodo	62
ANEXO No 5. Bibliografía.....	63
ANEXO No 6. Planos del diseño del caso de estudio.....	63

Lista de abreviaturas

C°: Grados centígrados

Cd: Cadmio

Cr: Cromo

Cu: Cobre

DQO: Materia orgánica

DBO₅: Demanda bioquímica de oxígeno

ET: Evapotranspiración

FWS: Humedales de superficie de agua libre

HDPE: Polietileno de alta densidad

HSSF: Humedales de flujo subsuperficial horizontal

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales

IWA: Asociación Internacional del Agua

MLSS: Sólidos suspendidos del licor de mezcla

NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio

NH₄-N: Amonio

Ni: Níquel

NO_x: Óxido Nitroso

NT: Nitrógeno total

OD: Oxígeno disuelto

PVC: Policloruro de Vinilo

Pb: Plomo

PT: Fósforo Total

PTAR: Planta de tratamiento de aguas residuales

SLR: Tasa de Carga de Lodo

SRT: Tiempo de retención de sólidos

SST: Sólidos suspendidos totales

SSV: Sólidos suspendidos volátiles

STW: Humedales para el tratamiento de lodo

TS: Sólidos totales

TKN: Nitrógeno Total Kjeldahl

UMNG: Universidad Militar Nueva Granada

VF: Flujo vertical

VS: Sólidos volátiles

Resumen

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo establecer las consideraciones necesarias para el diseño y operación de humedales para el tratamiento de lodo secundario, proveniente del manejo de aguas residuales, en condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá. Para ello, se seleccionó como caso de estudio la producción de lodo generada por la PTAR ubicada en las instalaciones del campus Nueva Granada, en donde se tuvo en cuenta las condiciones climáticas propias del lugar, parámetros constructivos y operativos con el fin de establecer su aplicabilidad.

Por otro lado, se realizó la propuesta del procedimiento constructivo y operacional del humedal para el tratamiento de lodo, el cual fue construido mediante el análisis de la información recopilada a nivel internacional a partir de publicaciones de revistas indexadas y certificadas, permitiendo de esta manera obtener un resultado aplicable en condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá.

Finalmente, este documento concluye que esta tecnología si es aplicable en condiciones locales, presentando beneficios económicos y ambientales. Además, suministra recomendaciones para su operación y mantenimiento en la fase de implementación y puesta en marcha.

Palabras clave: Humedales, lodo, tratamiento, tecnología, operación, mantenimiento.

Abstract

The present research work aims to establish the necessary considerations for the design and operation of wetlands for the treatment of secondary sludge, for the management of wastewater, in environmental conditions of the Bogotá Savanna. For this purpose, the sludge production generated by the PTAR located in the facilities of the Nueva Granada campus was selected as a case study. To establish its applicability, the climatic conditions of the site were taken into account, as well as the construction and operational parameters.

Besides, a proposal was made for the construction and operational procedure of the wetland for sludge treatment. This was constructed through the analysis of information compiled at the international level from publications in indexed and certified journals. This allows achieving a result applicable to the environmental conditions of the Bogotá Savanna.

Finally, this document concludes that this technology is applicable under local conditions, presenting economic and environmental benefits. It also provides recommendations for its operation and maintenance during the implementation and the operational begin.

Keywords: Wetlands, sludge, treatment, technology, operation, maintenance.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los subproductos provenientes del tratamiento de aguas residuales es el lodo generado durante la remoción de contaminantes. A nivel mundial, el tratamiento y la gestión de lodo es un desafío creciente (López *et al.*, 2017).

La disposición final del lodo ha sido considerada como un asunto de salud pública que tiene el potencial de causar efectos negativos en el bienestar de las personas o afectar los ecosistemas por riesgo de dispersión de organismos patógenos, (López *et al.*, 2017) debido a esto, una de las grandes preocupaciones es la desinfección y disposición final del lodo, de forma sostenible.

En cuanto a los costos del tratamiento de lodos se puede afirmar que este constituye la mitad del total generado en el tratamiento de aguas residuales. Por otra parte, en la medida que se construyen nuevas instalaciones para el manejo de aguas residuales y se actualizan las existentes por el crecimiento exponencial en el número de habitantes, las cantidades de lodo aumentan y de la misma manera las regulaciones son cada vez más estrictas (Li & Groups, 2016).

Generalmente, los procesos de tratamiento de lodo tienen dos propósitos: (1) deshidratación de lodo para disminuir el volumen, reduciendo así los costos de transporte y tratamiento; (2) estabilización de lodo para degradar la materia orgánica y eliminar otros contaminantes, disminuyendo así la toxicidad del lodo. El alto costo de los tratamientos tradicionales de lodo y los enfoques de eliminación (por ejemplo, secado, compostaje, digestión anaeróbica) son cuestiones importantes para las plantas de tratamiento de aguas residuales (Hu & Chen, 2018). Por lo anterior, es de gran importancia que las PTAR implementen tecnologías de baja inversión y costo operativo para el tratamiento de lodos, una de las alternativas son los

humedales los cuales cumplen con las características anteriormente mencionadas y hacen parte de las tecnologías de bajo impacto.

Los humedales para el tratamiento de lodos son métodos extensivos que tienen como objetivo aumentar la concentración de sólidos totales para reducir el volumen de lodo y estabilizar la fracción biodegradable de la materia orgánica. Lo anterior se logra con diferentes procesos como espesamiento y deshidratación mediante la evapotranspiración y percolación (Werther & Ogada, 1998). Esta tecnología para el tratamiento de lodos es utilizada en diferentes regiones del mundo como un complemento a los procesos para el tratamiento de aguas residuales (Caselles-Osorio *et al.*, 2007).

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Descripción y Formulación

Las tecnologías convencionales de estabilización de lodos y deshidratación (digestión anaeróbica seguida de centrifugación o filtración) son costosas y demandan altas cantidades de energía, lo cual representa una limitación para su implementación en instalaciones pequeñas. (Stefanakis *et al.*, 2014), (Dotro *et al.*, 2017), (Nielsen, 2005a). Los procesos aeróbicos, energéticamente intensivos, para el tratamiento de aguas residuales generalmente tienen una producción de lodo importante, estos lodos usualmente son procesados mediante operaciones complejas.

Actualmente no hay lineamientos de referencia para el diseño, ni registros de implementación, funcionamiento y rendimiento de humedales para el tratamiento de lodos en condiciones de la Sabana de Bogotá; por esta razón surge la necesidad de diseñar y evaluar esta tecnología en las condiciones locales, ya que podrían resultar en una alternativa para sustituir tratamientos convencionales.

Teniendo en cuenta la problemática descrita, en el presente proyecto se aportarán insumos para avanzar en la respuesta a la siguiente pregunta: En condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá, ¿Son los humedales para el tratamiento de lodo una alternativa viable, desde el punto de vista técnico, para la gestión de lodo subproducto del tratamiento de agua residual?

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- Establecer las consideraciones necesarias para el diseño y operación de humedales para el tratamiento de lodo secundario, proveniente del manejo de aguas residuales, en condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá.

3.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la aplicabilidad de procedimientos para el diseño de humedales para el tratamiento de lodo, reportados en el estado del arte, a las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá.
- Formular el dimensionamiento de un caso de estudio (PTAR Sede campus Nueva Granda de la Universidad Militar Nueva Granada) para el tratamiento de lodo con humedales en las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá.
- Diseñar un experimento que valide los parámetros aplicables al diseño de humedales para el tratamiento de lodo en las condiciones ambientales locales de la Sabana de Bogotá.

4. JUSTIFICACIÓN

A partir de la revisión de literatura adelantada se ha identificado que los humedales para el tratamiento de lodo no han sido aplicados en condiciones ambientales similares a las de la Sabana de Bogotá.

Esta tecnología da como resultado una deshidratación y estabilización positiva de lodos con bajos requerimientos de energía, baja huella de carbono, costos de operación y mantenimiento reducidos (Li, H., 2018), que puede considerarse una alternativa prometedora, efectiva, segura, sostenible, ecológica y económica.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado serán un aporte en la implementación de proyectos relacionados con la gestión de lodos subproducto del tratamiento de agua residual a escala real. La metodología propuesta está orientada a aportar en la aplicación de los humedales para el tratamiento de lodo en las condiciones ambientales locales (precipitación, temperatura, y radiación solar) de la Sabana de Bogotá.

5. ALCANCE Y DELIMITACIÓN

La literatura consultada muestra que la implementación de esta tecnología se ha desarrollado principalmente en zonas climáticamente variadas (temperatura, precipitación, viento, etc.), y condiciones diferentes a las de la Sabana de Bogotá.

Este trabajo de grado avanza en la definición de una metodología para el diseño de los humedales para el tratamiento de lodo, en las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá, además presenta información valiosa que será insumo para la puesta en marcha de esta tecnología en municipios con baja densidad poblacional.

El trabajo de grado contempla, como caso de estudio, el dimensionamiento del humedal para el tratamiento de lodo secundario generado en el periodo 2018-2019 proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales, de la sede campus Nueva Granada de la Universidad Militar Nueva Granada (Cajicá).

6. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DE ARTE

Los humedales naturales son áreas de tierra que están húmedas durante parte o todo el año debido a su ubicación geográfica. Los humedales suelen ser de transición entre las tierras altas (sistemas terrestres) y los sistemas (acuáticos) de inundación continua o profunda, se encuentran catalogados como uno de los ecosistemas biológicamente más productivos en el planeta. Debido a que los humedales tienen una mayor tasa de actividad que la mayoría de los ecosistemas, pueden transformar contaminantes comunes que se encuentran en las aguas residuales convencionales en subproductos inofensivos o nutrientes esenciales que se pueden utilizar para una productividad biológica adicional (Kadlec & Wallace, 2008).

En las últimas décadas se han implementado sistemas de humedales artificiales, diseñados con el fin de representar características específicas de los ecosistemas de humedales naturales, para ser empleados en aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2008).

Los humedales para tratamiento están constituidos por una variedad de modelos hidrológicos y de desarrollo tecnológico, actualmente hay tres tipos de humedales de uso generalizado en el tratamiento de aguas residuales (Kadlec & Wallace, 2008):

- Los humedales de superficie de agua libre (FWS) están caracterizados porque tienen áreas de agua abierta y son similares en apariencia a los pantanos naturales.
- Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF), que generalmente emplean un lecho de grava plantado con vegetación de humedal. El agua, que se mantiene debajo de la superficie del lecho, fluye horizontalmente desde la entrada hasta la salida.
- Los humedales de flujo vertical (VF) que distribuyen agua a través de la superficie de un lecho de arena o grava, plantado con vegetación de humedal. El agua o lodo se trata a medida que se filtra a través de la zona de la raíz de la planta.

En el caso de los lodos residuales, la deshidratación de lodo puede realizarse mediante un tipo de sistema de humedales VF (Kadlec & Wallace, 2008), estos humedales son catalogados como STW (por sus siglas en inglés sludge treatment wetland)

Un STW es un tipo de humedal construido de flujo vertical cuya función principal es reducir el volumen de lodos mediante la deshidratación y la reducción del contenido de materia orgánica a través de la mineralización (Kim & Smith, 1997). Los procesos de tratamiento incluyen la retención física de partículas de lodo en la superficie y la filtración de una fracción del agua del lodo a través de los medios granulares del humedal (Nielsen, 2003).

6.1. Humedales para el Tratamiento de Lodo

Los humedales para el tratamiento de lodo son un desarrollo de los últimos 30 años y representan una solución de vanguardia para el tratamiento de lodos generados como subproducto del tratamiento de aguas residuales (Nielsen, 2011).

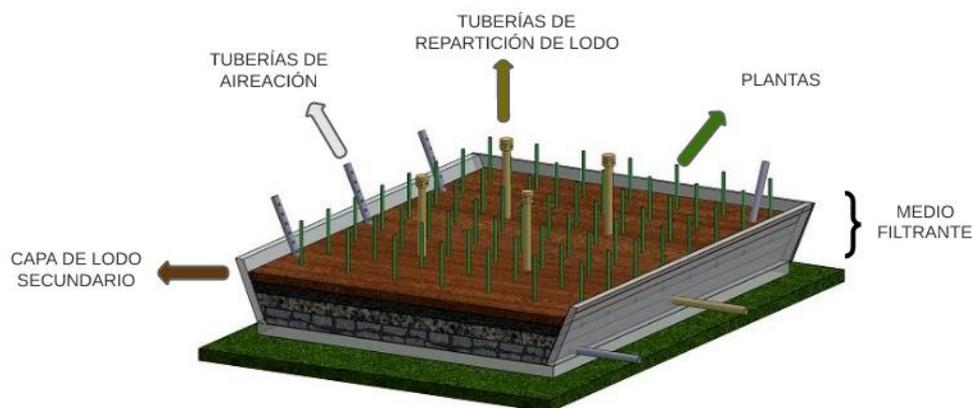
De acuerdo con la búsqueda bibliográfica realizada se encuentran libros y artículos (*Anexo No 1*) orientados a definir bases para el dimensionamiento y condiciones de operación de humedales para el tratamiento de lodo, sin embargo, no son ampliamente aplicables. Por consiguiente, se basan en métodos empíricos que permiten estimar las configuraciones y condiciones operacionales, por lo tanto, no se ha encontrado un procedimiento unificado para el dimensionamiento, ya que estos humedales están principalmente influenciados por condiciones climáticas asociadas a las condiciones locales específicas.

Dentro de las principales publicaciones anteriormente mencionadas con esta temática se encuentran principios para el dimensionamiento, construcción y operación de humedales para el tratamiento de lodo, e incluyen una breve revisión de las características del lodo, parámetros operativos y los elementos clave de la configuración del sistema, dando una visión general de

los procesos y mecanismos involucrados en la deshidratación y estabilización de lodos (Stefanakis, 2014),(Kadlec & Wallace, 2008).

Figura 1

Humedal para el tratamiento de lodo



Nota: Esta figura muestra los componentes que hacen parte de un sistema STW.

Fuente. Autoría propia

6.2. Consideraciones de Diseño y Operación

En esta sección se presentan los referentes a diferentes consideraciones para la configuración y dimensionamiento de los humedales para el tratamiento de lodo.

6.2.1. Tasa de Carga de Sólidos

Es probablemente el parámetro de diseño más importante en la operación de los STW y representa la cantidad de sólidos secos (sólidos totales; TS) o masa seca (DM) cargada en el lecho por unidad de superficie en un año, generalmente expresada en $\text{kg TS} / \text{m}^2 / \text{año}$. La selección de una tasa de carga de sólidos apropiada se basa en las características del lodo y las condiciones climáticas (Nielsen, 2009, 2011).

6.2.2. Vegetación

Las plantas contribuyen a la deshidratación de lodos, debido a: **i)** La evapotranspiración, **ii)** La absorción de nutrientes y metales, **iii)** El movimiento del tallo que mejora la porosidad del lodo y **iv)** La creación de una zona radicular densa que favorece la conductividad hidráulica, permitiendo el desarrollo de la mineralización de lodos (Nielsen, 2009). Generalmente, las especies de plantas más utilizadas son *Phragmites Australis*, *Typha*, *Scirpus* y *Schoenoplectus*, es decir, cañas comunes. Por esta razón, los humedales también se denominan "camas de cañas" (Stefanakis, 2014).

6.2.2.1. Afectación a la vegetación a causa de la toxicidad del lodo residual: Las altas concentraciones de metales pesados en el lodo residual generado por procesos industriales inhiben el crecimiento de la vegetación en estas tecnologías, debido a que sobrepasan los niveles de tolerancia permisibles por la planta. Por ejemplo, una concentración de cromo en las plantas se ve reflejada en su desfavorable aspecto indicando la baja tolerancia de la planta al metal (Mant *et al.*, 2006).

6.2.3. Períodos de Carga y Descanso

Actualmente no existe un régimen de carga (alimentación) y descanso generalmente aceptado y aplicado. El período de carga suele durar de 1 a 7 días, mientras que la duración del reposo varía. Así pues, el nivel de SLR aplicado y las condiciones climáticas juegan un papel dominante en la selección de un período de descanso apropiado (Stefanakis, 2014).

6.2.4. Operación

En los humedales, el secado se lleva a cabo como un proceso por lotes de tal manera que el lodo se alimenta cada vez a una de las camas durante un período de carga. Después del período de carga, la cama descansa y el lodo se deshidrata, mientras que el lodo afluente se descarga en otra cama. Los periodos de descanso pueden durar días o semanas, dependiendo de la

capacidad de tratamiento, las condiciones climáticas, el contenido de materia seca y el espesor del lodo. En el ciclo siguiente, los lodos se esparcen nuevamente sobre la cama durante el mismo período de carga y se deshidratan durante el período de descanso posterior. Después de cada carga, los sólidos permanecen en la superficie y el lodo se deshidrata principalmente debido a la percolación del agua a través del medio filtrante. El contenido de agua residual se reduce aún más gracias a la evapotranspiración de la planta (Uggetti *et al*, 2010).

6.2.5. Sistema de Aireación

Es necesario instalar tuberías perforadas para evitar condiciones anaeróbicas en la capa de drenaje, y mejorar la aireación a través del filtro de grava y la capa de lodo (Uggetti *et al*, 2010). La presencia de tuberías de aireación mejora la deshidratación de lodo (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012) y permite generar un entorno aeróbico que facilita la estabilización.

A continuación, se muestran los valores de referencia reportados en los artículos y libros revisados en este estudio.

Tabla 1

Valores de referencia de acuerdo con los parámetros para el diseño y operación del humedal para el tratamiento de lodos

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Carga	La carga propuesta para los humedales en Dinamarca es 30-60 kg de TS / m ² / año para el lodo activado y de 50 kg de TS / m ² . Por otro lado, las tasas de carga de hasta 100 kg de TS / m ² / año demostraron ser extremadamente altas, y sugirió tasas de carga de 50 kg de TS / m ² / año para el lodo digerido y de 60 kg de TS / m ² / año para lodos activados.	(Nielsen, 2009) (Nielsen, 2003) (Masciandaro <i>et al.</i> ,2017) (Nielsen <i>et al.</i> , 2014)

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA
Medio filtrante	Capa de piedras: 15 - 25 cm; Capa de grava: 20 - 30 cm; Capa de arena: 10 - 15 cm; Capa de lodo 100 - 150 cm. Las capas superiores de grava (diámetro de 2 a 10 mm) o arena (diámetro de 0,5 a 1 mm), que se utilizan como capas de filtración, también son útiles para el establecimiento de plantas y el enraizamiento.	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2014) (Peruzzi <i>et al.</i> , 2013) (Gagnon <i>et al.</i> , 2013)
Profundidad de medio filtrante	La profundidad total de los medios filtrantes es de alrededor de 2.4 m (0.6 – 0.7 m de medio filtrante y 1.5 – 1.6 m para la acumulación de lodo).	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2014) (Ugetti <i>et al.</i> , 2010)
Plantas	Las plantas más comunes utilizadas en los STW son la caña común (<i>Phragmites Australis</i>) y la espadaña (<i>Typha latifolia</i>).	(Stefanakis & Tsihrintzis, 2011). (Collard <i>et al.</i> , 2016) (Gagnon <i>et al.</i> , 2013)
Temperatura de evapotranspiración	Los valores de temperatura por encima de 15-16 °C podrían aumentar los valores de evapotranspiración hasta en un 30%.	(Stefanakis & Tsihrintzis, 2011).
Carga y descanso	En Dinamarca, la mayoría de los sistemas STW funcionan con 7-8 días de carga seguidos de 55-65 días de descanso	(Nielsen, 2009). (Gagnon <i>et al.</i> , 2013) (Kadlec <i>et al.</i> , 2000)

Fuente. Autoría propia

6.3. Procesos en el humedal para el tratamiento de lodo

6.3.1. Evapotranspiración

La operación de STW se logra principalmente a través de la transpiración y evaporación del agua de la superficie del lodo (absorción de agua a través de su sistema radicular que es

transferida a sus tallos y hojas, donde se liberan a la atmósfera) (Kengne *et al.*, 2008; Uggetti *et al.*, 2010; Stefanakis y Tsihrintzis, 2012b).

En los sistemas STW, las plantas absorben la humedad y los nutrientes del lodo, mientras que sus raíces alteran las características de este, lo que da como resultado un material de mejor calidad bien deshidratado. La superficie del lodo fresco suele ser negra (debido al sulfuro de hierro) y de composición acuosa, las capas inferiores de lodo tienen un color marrón lo que indica la presencia de condiciones aeróbicas (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012).

6.3.2. Mineralización

La mineralización es el proceso de transformar la materia orgánica en compuestos como sales, cuya función es fertilizar y estabilizar el lodo. Si las partes más profundas de la capa de lodo son negras, significa que el proceso de mineralización es limitado (condiciones anaeróbicas) (Stefanakis & Tsihrintzis, 2011). La mineralización en combinación con un drenaje mejorado (agrietamiento o fracturación) y la acción aireadora de las plantas, da como resultado una deshidratación eficiente, las fracturas en la capa de lodo mejoran la evaporación del agua y la transferencia de oxígeno, lo que promueve una porosidad más uniforme a lo largo del lecho y la mineralización del lodo en el nivel inferior. De hecho, la transferencia de oxígeno de las plantas desde el aire a las raíces y a través de la superficie agrietada y a través de la aireación del filtro, crea condiciones aeróbicas en algunas zonas de la capa de lodo, lo que provoca la existencia de microorganismos aeróbicos y en última instancia, mejora la mineralización del lodo (Nielsen, 2005a, 2005b).

6.4. Remoción de nutrientes y contaminantes en los STW

El objetivo principal de la estabilización de lodos en STW es disminuir el contenido de sólidos volátiles y contaminantes a través de la actividad microbiana y la mineralización, además, el crecimiento de las plantas mejora la diversidad y riqueza bacteriana, lo que corresponde a altas tasas de eliminación de materia orgánica y nutrientes (Wang *et al.*, 2020).

Las plantas que crecen en estos sistemas son capaces de proporcionar una transferencia de oxígeno a la capa de lodo a través de sus raíces, dando como resultado un subambiente anaeróbico-aerobio que se produce alrededor de estas y la capa de lodo (Faulwetter *et al.*, 2013). La rizosfera no solo apoya la unión de microorganismos aeróbicos (bacterias nitrificantes) sino que también contribuye al crecimiento de microorganismos anaeróbicos (bacterias desnitrificantes), permitiendo una mayor eficiencia de remoción de Nitrógeno total kjeldahl (Wang *et al.*, 2020) y Fósforo total, también puede enriquecer y disminuir la concentración de metales pesados como, Cr, Cu, Ni, Cd, y Pb mediante la absorción directa en el lodo (Chen & Hu, 2019), causando altas eficiencias de remoción.

6.5. Generación de Lodos en el Tratamiento de Agua Residual

Los lodos con diferentes características pueden ser generados en el tratamiento de aguas residuales en función del nivel de remoción y de las características de los procesos; dicho lodo generalmente contiene 0.25 a 12% en peso de sólidos o masa seca (Metcalf & Eddy, 2014). Según (Metcalf & Eddy, 2014) en el contexto del tratamiento se identifican diferentes tipos de lodo los cuales se muestran en la **Tabla 1** del **Anexo No 2**. Por otro lado, los procesos convencionales para el tratamiento de lodo según Von Sperling, (2005) también se encuentran en la **Tabla 2** del mismo anexo.

Debido a su alto contenido de materia orgánica, estos lodos deben ser estabilizados antes de ser colocados en el sitio de disposición, es decir, se debe disminuir el volumen a disponer y la concentración de materia orgánica, además de eliminar los microorganismos patógenos, virus y parásitos presentes (Vigueras *et al.*, 2013).

6.6. Tratamiento y Disposición de Lodos a Nivel Local

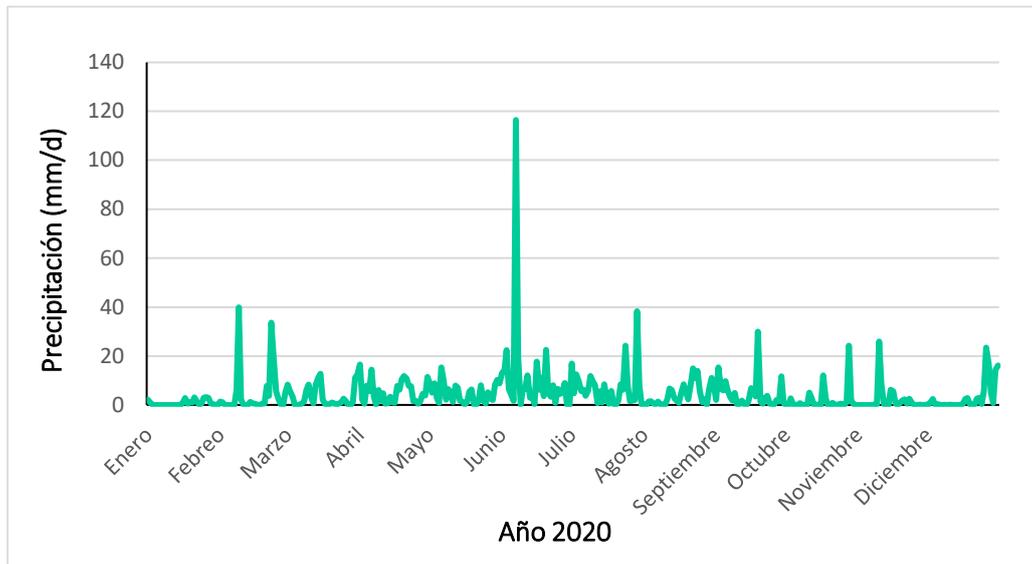
Teniendo en cuenta el contexto del estudio que se desarrollará en el departamento de Cundinamarca, se obtuvo información de 15 PTAR sobre el manejo y disposición final de lodos de los 20 municipios en total que cuentan con 32 proyectos de diseño, construcción y optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales pertenecientes a este departamento (Venegas, 2018) (*Anexo No 2*); los otros municipios no registran datos en cuanto a la gestión del lodo o no se encuentra información publicada disponible, de este modo el porcentaje de municipios que reportan información sobre el manejo y disposición final corresponde al 47% de la muestra estudiada.

De acuerdo con la *Tabla 3* del *Anexo No 2* se puede evidenciar que el lodo producido por los procesos de tratamiento de aguas residuales es usado como compostaje para la aplicación en la tierra debido a la gran cantidad de nutrientes valiosos que contiene o es llevado a rellenos sanitarios para su disposición final. Sin embargo, el lodo excedente también contiene grandes cantidades de contaminantes como metales pesados, patógenos y compuestos orgánicos tóxicos, etc., que pueden limitar su uso.

6.7. Condiciones ambientales locales

Figura 2

Precipitaciones diarias presentadas en la Sabana de Bogotá durante el año 2020



Nota: Los datos que se muestran en esta tabla son tomados de los reportes descargables de la National Aeronautics and Space Administration [NASA] (2020).

Fuente. Autoría propia

En la **Figura 2** se observa que las precipitaciones correspondientes al año 2020 en la Sabana de Bogotá son muy variables durante los días del año, por esta razón no se establece un régimen climatológico estricto, es decir no hay una temporada en donde se presenten las mismas o similares precipitaciones todos los días, además, según las predicciones realizadas por el IDEAM, indican que en la región Andina se pueden esperar condiciones de humedad o sequía en algunos departamentos (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM], 2020).

7. METODOLOGÍA

La *Figura 3* presenta un resumen gráfico de la metodología aplicada para el desarrollo del presente trabajo de grado, la cual consta de tres partes: **i)** Revisión de la literatura y recolección y presentación de la información; **ii)** Diseño y operación del humedal para el tratamiento de lodo del caso de estudio y evaluación de escenarios; **iii)** Elaboración del diseño experimental.

Igualmente, en los siguientes numerales se presentan detalles relacionado con las actividades para el desarrollo del proyecto, estas se describen a continuación:

7.1.Revisión de la Literatura

Estuvo orientada a establecer los referentes para el diseño, operación, y mantenimiento de humedales para el tratamiento de lodo. Adicionalmente se investigó en las referencias bibliográficas la aplicación de esta tecnología en escala real. Esta revisión se realizó en las bases bibliográficas ScienceDirect, Scopus e IWA Publishing, entre otras aplicando la metodología que se muestra en la *Figura 4*. En el *Anexo No 1* se presenta una lista de las referencias bibliográficas consultadas como base para realizar la construcción del humedal.

7.2.Recolección y Presentación de la Información

Ante la escasa información de una metodología establecida a nivel local para el diseño y construcción de humedales para el tratamiento de lodo, se procedió a preparar un inventario de datos de referencia utilizados en el dimensionamiento y construcción de este tipo de humedales en otros países. A partir de la revisión adelantada se efectuó una base de datos asociados a:

7.2.1. Características del Humedal para el Tratamiento de Lodo

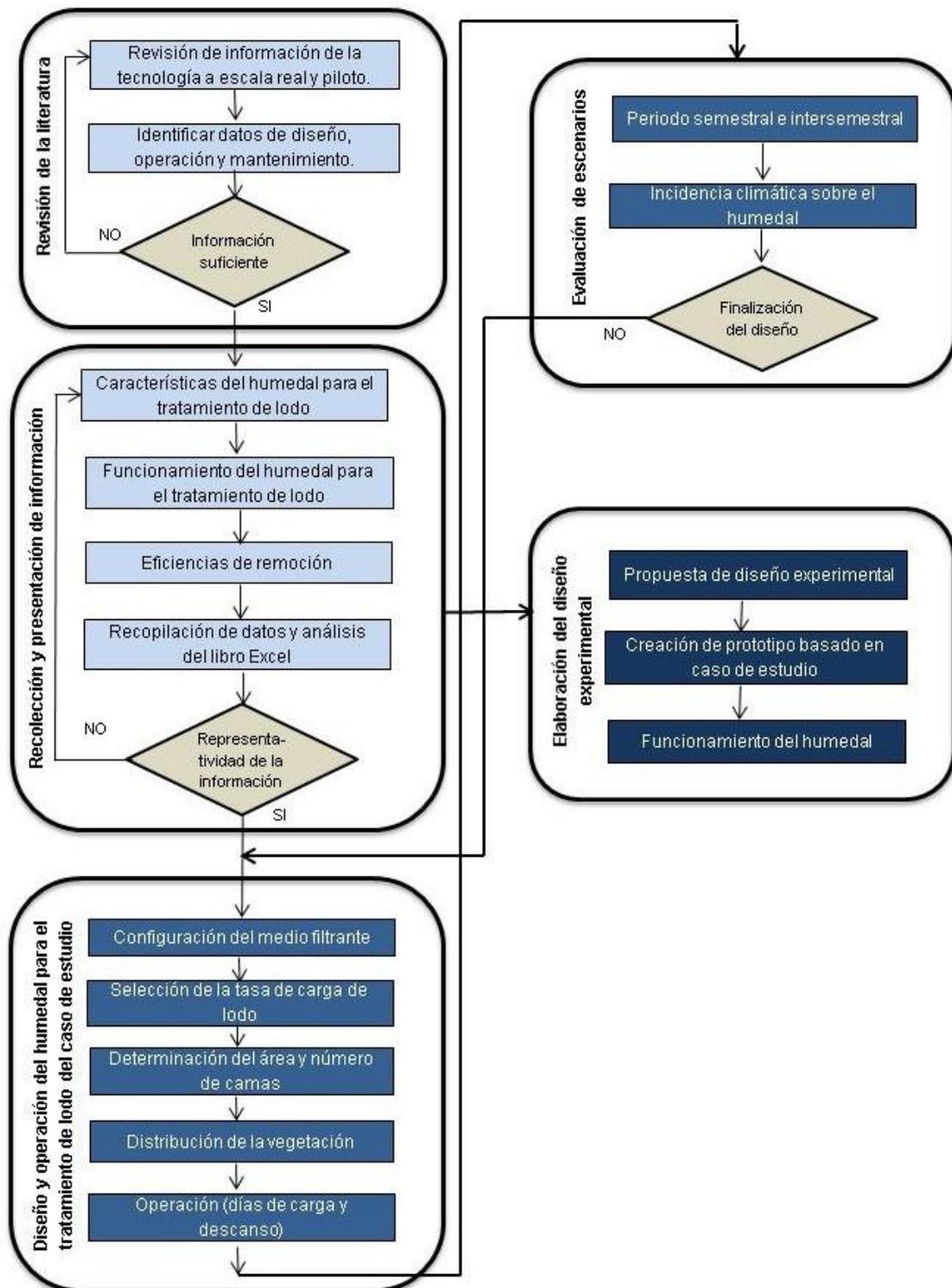
Configuración de la estructura del medio filtrante, dimensiones, y geometría.

7.2.2. Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo

La operación comprende los siguientes parámetros a definir: días de carga de lodo y descanso de las camas, tasa de carga de sólidos y la vegetación.

Figura 3

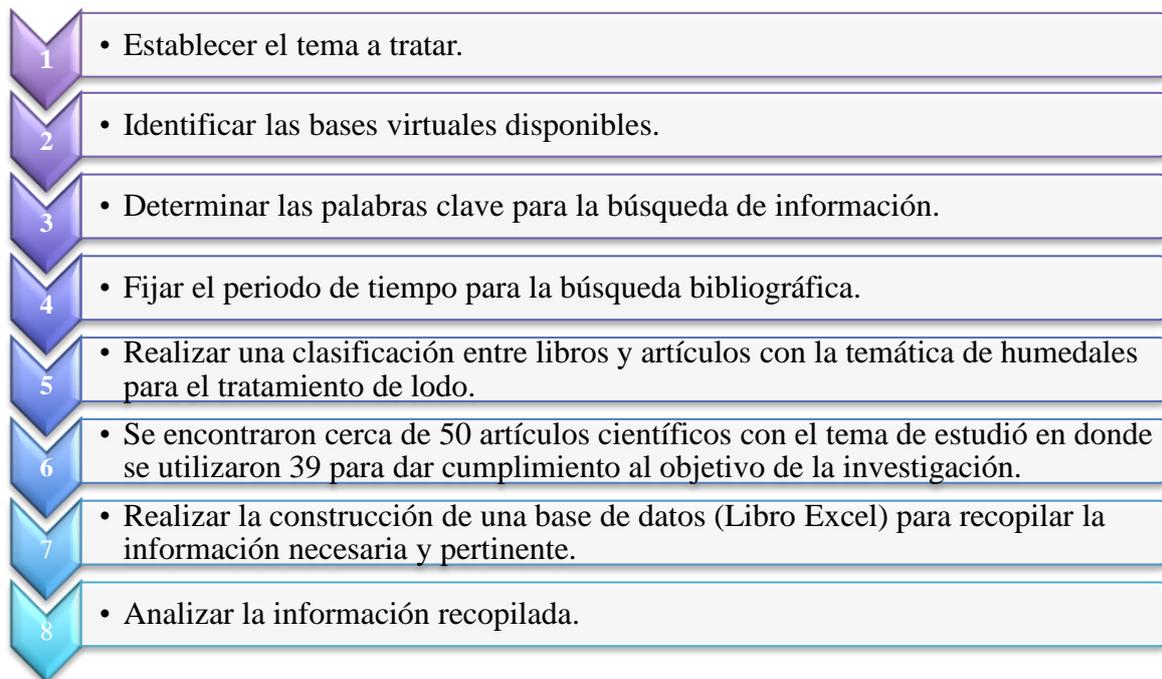
Metodología para el diseño de humedales para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

Figura 4

Metodología aplicada para la revisión bibliográfica



Fuente. Autoría propia

7.2.3. Características del Humedal para el Tratamiento de Lodo

Configuración de la estructura del medio filtrante, dimensiones, y geometría.

7.2.4. Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo

La operación comprende los siguientes parámetros a definir: días de carga de lodo y descanso de las camas, tasa de carga de sólidos y la vegetación.

7.2.5. Indicadores Cualitativos de Lodo

Para identificar las condiciones anaerobias o aerobias en las que se encuentre el humedal se considera como indicador principal el color, el cual normalmente en la superficie del lodo fresco es negro, y de composición acuosa, las capas inferiores de lodo tienen un color marrón y textura del suelo, lo que indica la presencia de condiciones aeróbicas; por otro lado, si la parte más profundas de la capa de lodo todavía presenta una coloración negra, esto significa que la mineralización es limitada (condiciones anaeróbicas). Otro indicador importante es la fractura

de la capa de lodo, la cual mejora la evapotranspiración del agua dando como resultado una mayor deshidratación (Stefanakis & Tsihrintzis, 2012).

7.2.6. Remociones de contaminantes y nutrientes en los STW

Con el fin de conocer la eficiencia de este tipo de tecnologías es importante conocer los niveles de remoción que se pueden obtener en estos humedales, estos referentes son indicativos no sólo de estabilización del lodo, sino también de insumo para obtener un lodo estabilizado que pueda ser utilizado en prácticas agrícolas; Teniendo en cuenta lo anterior, en la revisión bibliográfica se consideró la búsqueda de eficiencias de remoción de los principales contaminantes presentes en el lodo residual, tales como: VS, DQO, TKN, NT, PT y metales pesados.

7.3. Diseño y Operación del Humedal para el Tratamiento de Lodo del Caso de Estudio

Siguiendo las buenas prácticas de ingeniería se planteó el diseño de un humedal para el tratamiento de lodo secundario proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la UMNG coordenadas $4^{\circ}56'33.1''\text{N}$ $74^{\circ}00'45.6''\text{W}$, en las condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá T° ambiente Promedio 18°C , humedad relativa del 80%, presión de 82.3 KPa (NASA, 2020) y una precipitación de 500-1000 mm (IDEAM, 2020), esta PTAR se encuentra ubicada en el kilómetro 2 vía Cajicá- Zipaquirá (Cundinamarca).

Figura 5

Vista aérea del campus Nueva Granada



Fuente. Obtenida de (Google Earth, 2021)

Figura 6

PTAR de la Universidad Militar Nueva Granada, campus Nueva Granada



Fuente. Autoría propia

Se evaluaron dos escenarios, el periodo académico e intersemestral (2018-2019) puesto que, la producción de lodo es diferente de acuerdo con la características del agua reportadas en cada periodo, esto se ve influenciado principalmente por la cantidad de personas que ingresan a la sede campus Nueva Granada y la cantidad de horas que estas permanecen allí, adicionalmente se tuvieron en cuenta la temporada seca y de lluvia que se presentan en la Sabana de Bogotá, esto con el fin de precisar los datos de diseño del humedal cumpliendo con el funcionamiento para el tratamiento de lodo. Las dimensiones seleccionadas serán la propuesta para el escenario semestral, puesto que a lo largo del año predominan más meses con alto flujo de estudiantes y demás personal en comparación con el escenario intersemestral.

Los cálculos para los escenarios se pueden observar en el *Anexo No 3* que corresponde al periodo 2018-2019. A Continuación, se muestran los parámetros calculados para la elaboración del diseño:

7.3.1. Producción de Lodo en Términos de Masa Seca

Se estableció de acuerdo con el cálculo del proceso de lodos activados, este método consta de los siguientes pasos según Metcalf & Eddy (2014):

1. Definición de la caracterización de aguas residuales en el afluente en la PTAR del caso de estudio.
2. Determinación de las concentraciones de los requisitos del efluente en términos de $\text{NH}_4\text{-N}$, SST, Y DBO_5 .
3. Selección de la concentración mínima de OD en el licor de mezcla en el reactor aeróbico. Se recomienda una concentración mínima de 2,0 mg/L para la nitrificación.
4. Determinación de la tasa de crecimiento específica máxima de nitrificación (μ_{max}) basada en la temperatura del tanque de aireación y la concentración de OD, y determinación del K_n .

5. Determinación de la tasa de crecimiento específica neta y el SRT a esta tasa de crecimiento para alcanzar la concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$.
6. Obtención del SRT de diseño aplicando el factor de seguridad del paso 6.
7. Determinación de la producción de biomasa.
8. Realización de un balance de nitrógeno para determinar la concentración de NO_x y la concentración de $\text{NH}_4\text{-N}$ oxidada.
9. Cálculo de la masa de SSV y la masa de SST para el tanque de aireación.
10. Selección de una concentración de MLSS y determinación del volumen del tanque de aireación y el tiempo de retención hidráulico.
11. Determinación de la producción total de lodo y el rendimiento observado.

Una vez realizados dichos pasos, se calcularon los valores que constituyen el diseño del humedal que se muestran a continuación:

7.3.2. Área Total Requerida (m^2)

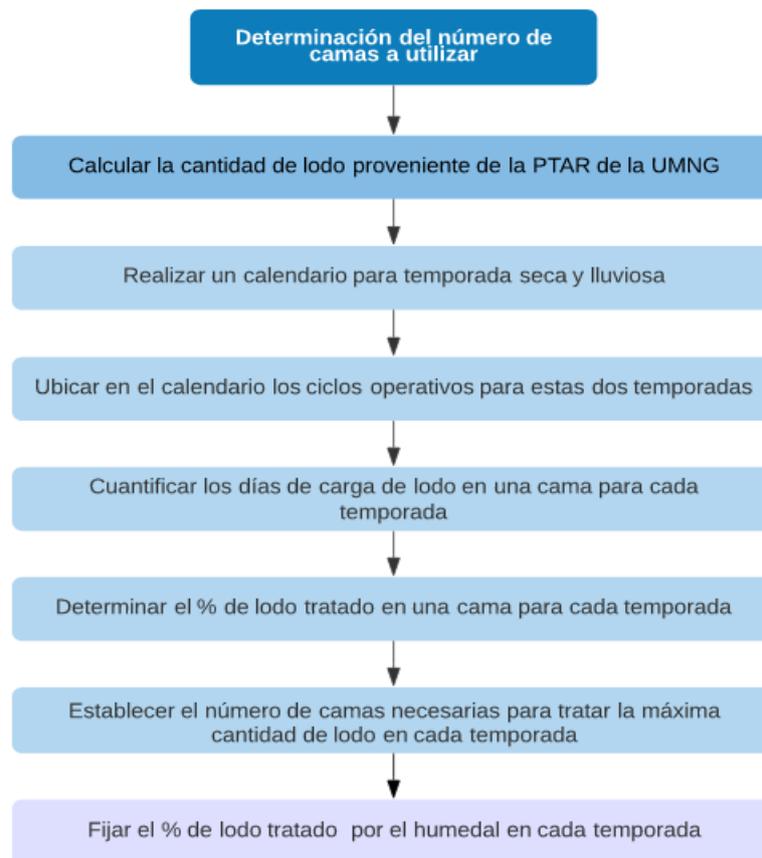
Para hallar el área se tuvo en cuenta la producción de lodo en términos de kg/ año y la carga de lodo, esta última se obtuvo de artículos y libros consultados.

7.3.3. Determinación del Número de Camas

A partir de la cantidad de lodo proveniente de la PTAR del caso de estudio se estimó el número de camas necesarias para tratar la máxima cantidad de lodo posible, la **Figura 7** muestra el procedimiento que se desarrolló.

Figura 7

Procedimiento para determinar el número de camas



Fuente. Autoría propia

7.3.4. Volumen de Carga de Lodo

Teniendo en cuenta que, la producción de lodo por la PTAR calculada anteriormente corresponde al 2% de sólidos y sabiendo que, 1m^3 de lodo pesa 1 tonelada, se calculó cuanto se debía agregar de sólidos y agua, es decir el 100% que conforma la composición del lodo residual.

7.3.5. Operación

Con base a la búsqueda bibliográfica se tomaron datos de los periodos de carga y descanso que reportaron los autores (*Anexo No 1*). Para establecer la operación del humedal a nivel local,

se descartaron las publicaciones cuyas temperaturas difieren significativamente de las registradas en la Sabana de Bogotá, debido a que en los casos de estudio encontrados en la literatura reportan temperaturas correspondientes a las estaciones climáticas (verano, primavera, otoño e invierno) y según la ubicación geográfica en la que se encuentra el país solo se registra temporada seca y de lluvia.

7.3.6. Densidad de plantas

Se determinó el número de plantas necesarias por unidad de área teniendo en cuenta las fuentes bibliográficas.

7.3.7. Cálculo de evapotranspiración

Para realizar el cálculo de la ET se utilizó la siguiente fórmula, (Kadlec *et al*, 2008).

$$ET = K_C \cdot ET_0$$

ET = Evapotranspiración de humedales, que es la pérdida de cuerpos de agua con vegetación.

K_C = Coeficiente de cultivo de humedal, adimensional.

ET₀ = Pérdida de agua calculada a partir de información meteorológica regional, para un cultivo de referencia y la superficie saturada del suelo.

7.3.8. Cálculo de pérdida de agua para la puesta en marcha

El cálculo de la pérdida de agua por evapotranspiración semanalmente se realiza mediante la siguiente expresión:

$$ET = V_{in} - ((V_{d7} - V_{d1}) + V_{out})$$

V_{in} = Volumen de entrada (lodos + volumen de lluvia por la semana).

V_{d1} = Volumen dentro de la cama, día 1.

V_{d7} = Volumen dentro de la cama, día 7.

V_{out} = Volumen medido a la salida del sistema.

7.4. Elaboración del Diseño Experimental

El diseño experimental se realizó teniendo en cuenta los resultados obtenidos del diseño del caso de estudio. Para este nuevo diseño la producción de lodo en términos de TS se redujo a $\frac{1}{25}$ puesto que son pruebas piloto con un área disponible de 2m^2 por cama.

7.5. Elaboración de Informe y Divulgación de Resultados

Este trabajo incluye memorias de cálculo, planos del diseño del humedal del caso de estudio, y su correspondiente manual de operación y mantenimiento.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diseño del humedal para el tratamiento de lodo se llevó a cabo siguiendo paso a paso la metodología anteriormente mencionada, cabe destacar que este proyecto estuvo limitado por la falta de información al evidenciar que, en la búsqueda bibliográfica, en Colombia aún no se conocen publicaciones donde se aplique esta tecnología, sin embargo, se logra proponer un procedimiento constructivo y operacional para las condiciones ambientales locales.

Este proyecto suministra una alternativa para el manejo de lodos provenientes de PTAR, cuyos resultados permitirán establecer una propuesta amigable con el medio ambiente, que podría ser aplicada inicialmente en el lugar en donde se tomaron los datos para la aplicación y seguidamente a nivel departamental en Colombia.

8.1. Procedimientos para el Diseño de Humedales para el Tratamiento de Lodo

El dimensionamiento de humedales para el tratamiento de lodo se basa principalmente en reglas empíricas y generalmente toma en consideración la producción de lodo (toneladas de materia seca por año), el tipo de lodo y las condiciones climáticas (Stefanakis *et al.*, 2014). Las publicaciones consultadas reportan lineamientos generales para realizar el proceso constructivo, pero cabe destacar que la operación y correcto funcionamiento depende en gran medida de las condiciones climáticas propias del lugar de implementación, por esta razón, surge la necesidad de crear una metodología que sea aplicable a nuestro caso de estudio con el fin de obtener una disposición de lodos más económica y amigable con el medio ambiente.

8.1.1. Procedimientos Reportados en la Literatura

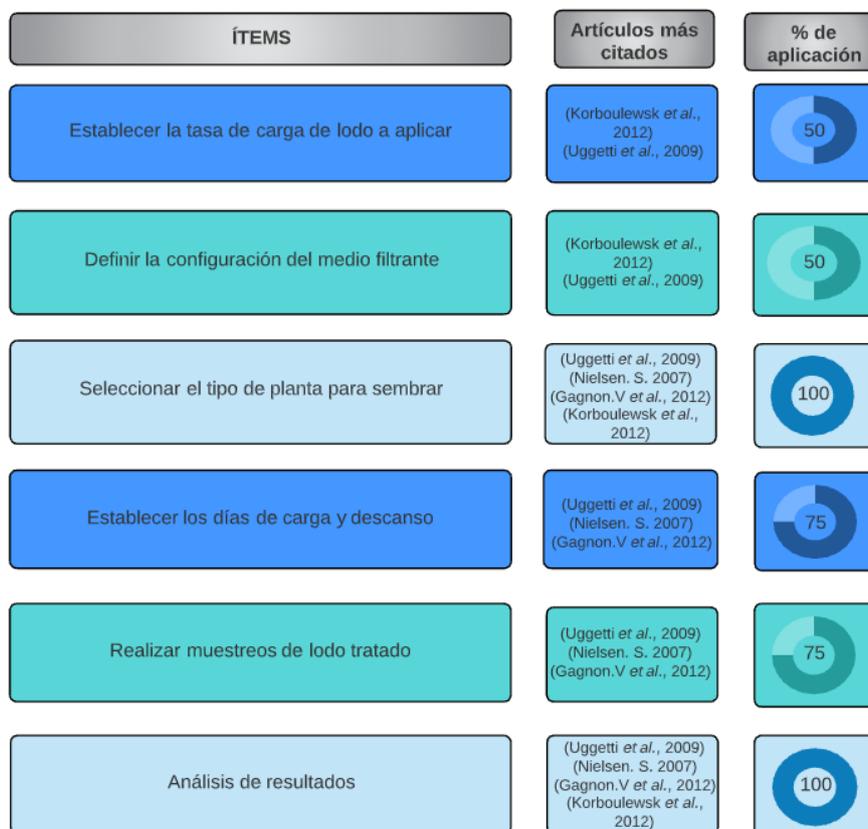
De acuerdo con la revisión bibliográfica se evidenciaron pautas para el diseño y construcción de humedales para el tratamiento de lodo, los cuales sirvieron de guía para elaborar el diseño del caso de estudio y el experimental presentados en este documento.

➤ **Procedimiento en Artículos**

Los procedimientos se seleccionaron teniendo en cuenta los artículos con mayor número de citas.

Figura 8

Procedimiento para el diseño de un humedal para el tratamiento de lodo reportado en artículos



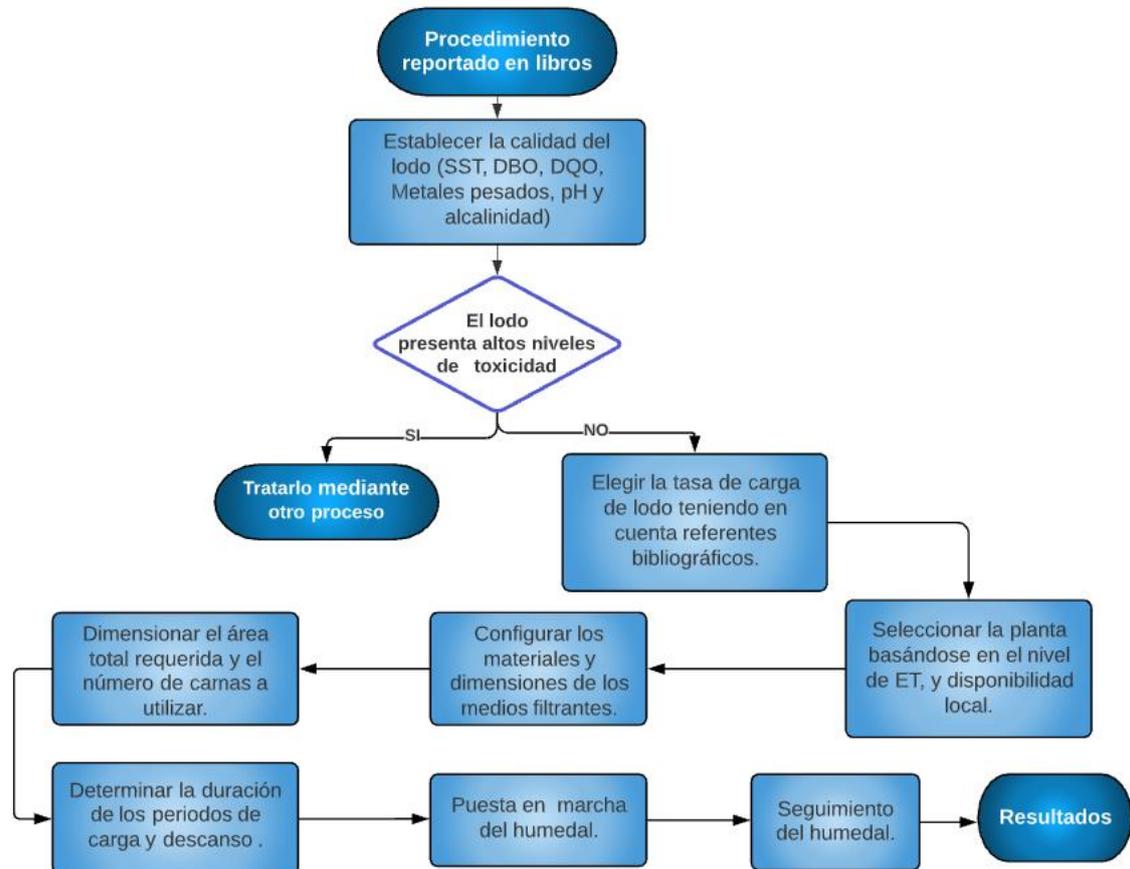
Fuente. Autoría propia

➤ **Procedimiento en Libros**

Esta tecnología se encuentra principalmente en pequeñas comunidades con una población que varía desde 5.000 a 10.000 habitantes. El procedimiento según (Stefanakis *et al*, 2014) se encuentra en la figura que se presenta a continuación:

Figura 9

Procedimiento para el diseño de un humedal para el tratamiento de lodo reportado en libros



Fuente. Autoría propia

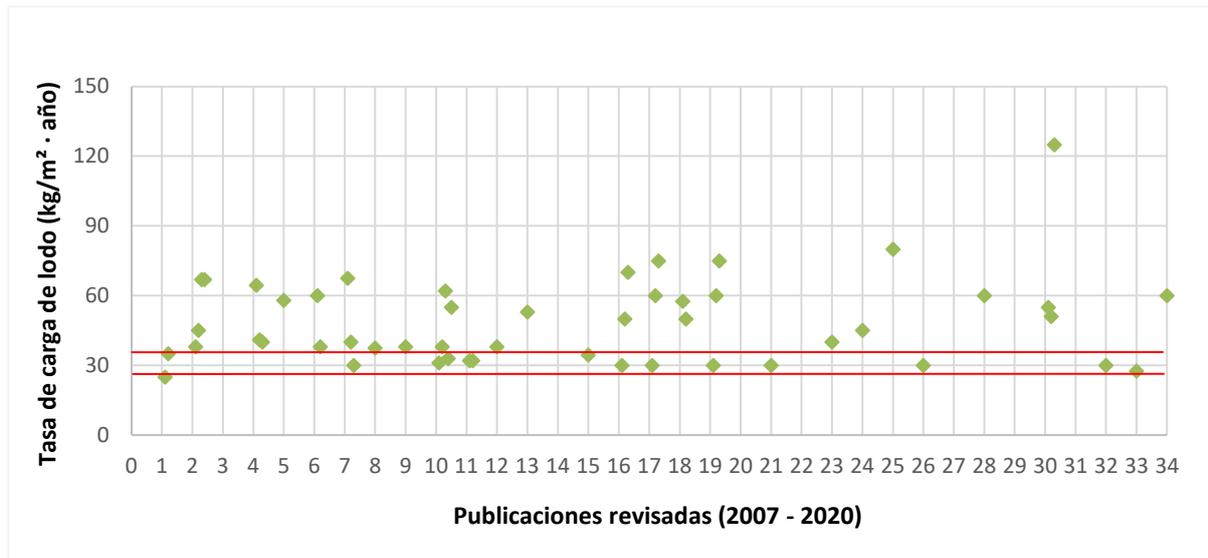
8.2. Valores de Referencia Reportados en la Literatura

Las convenciones del eje horizontal que se presentan en las siguientes gráficas se encuentra en el *Anexo No 1* que corresponden a los autores consultados en la revisión bibliográfica.

➤ *Tasa de Carga de lodos*

Figura 10

Carga de lodo suministrada en humedales para tratamiento de lodo en las publicaciones consultadas



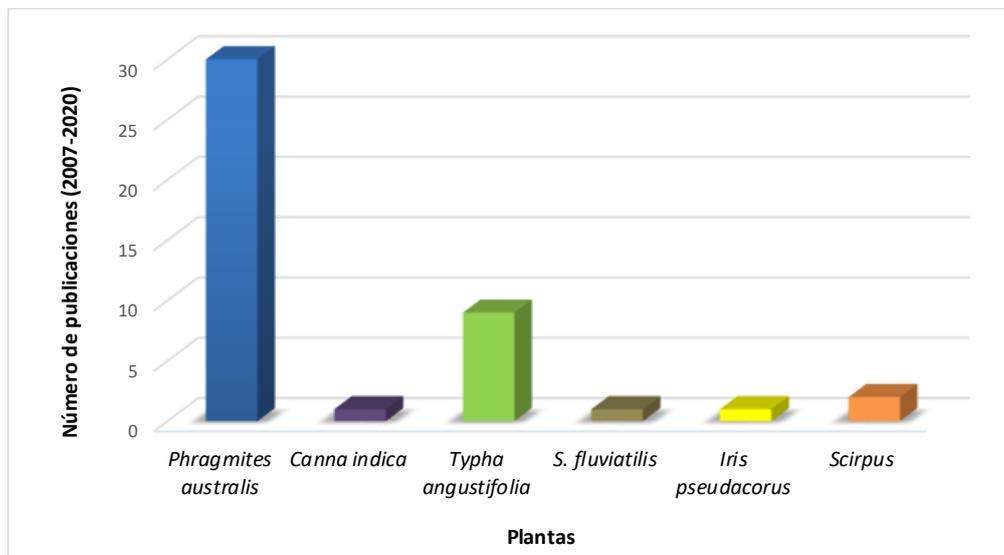
Fuente. Autoría propia

Estudios revelaron que la estabilización de los lodos mejoró y la materia orgánica se descompuso más rápido en una tasa de carga de 30 kg TS / m² / año en comparación con tasas de carga mayores (Masciandro *et al.*, 2017; Nielsen, 2011; Vincent *et al.*, 2012). Otros estudios también han informado que las altas tasas de carga (que exceden la capacidad del sistema) tienen efectos adversos sobre el crecimiento de las plantas, la deshidratación y la mineralización de lodos (Uggetti *et al.*, 2010). Al mismo tiempo, dado que las plantas necesitan suficiente agua y nutrientes para crecer, la tasa de carga de lodos en los humedales no debería ser demasiado baja.

➤ *Vegetación*

Figura 11

Especies de plantas implementadas en humedales para tratamiento de lodo residual



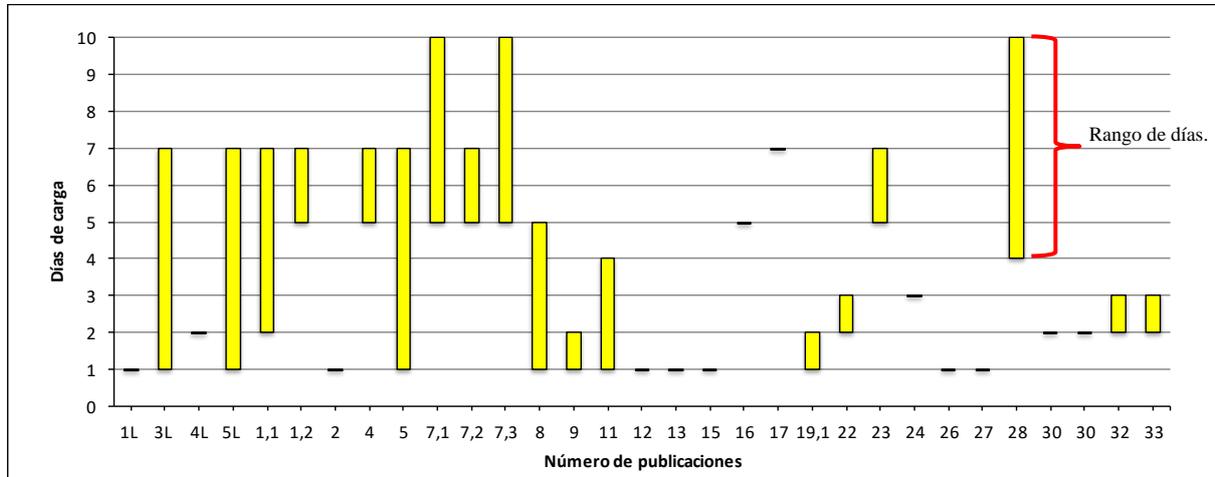
Fuente. Autoría propia

La especie más ampliamente utilizada en humedales de tratamiento para las aguas y lodos residual es la caña común (*Phragmites Australis*) (**Figura 11**). La espadaña (*Typha latifolia*) también se ha utilizado ampliamente en los humedales de tratamiento, especialmente debido a su alta tasa de crecimiento inicial. Las plantas contribuyen principalmente a la deshidratación de lodo a través de la evapotranspiración. Estudios estimaron valores de ET que van de 4 a 12 mm/día en 1 m² plantado con *Phragmites Australis*. Los valores de ET varían según la estación, la temperatura del aire, la velocidad del viento y la humedad relativa (Uggetti *et al*, 2010).

➤ *Operación*

Figura 12

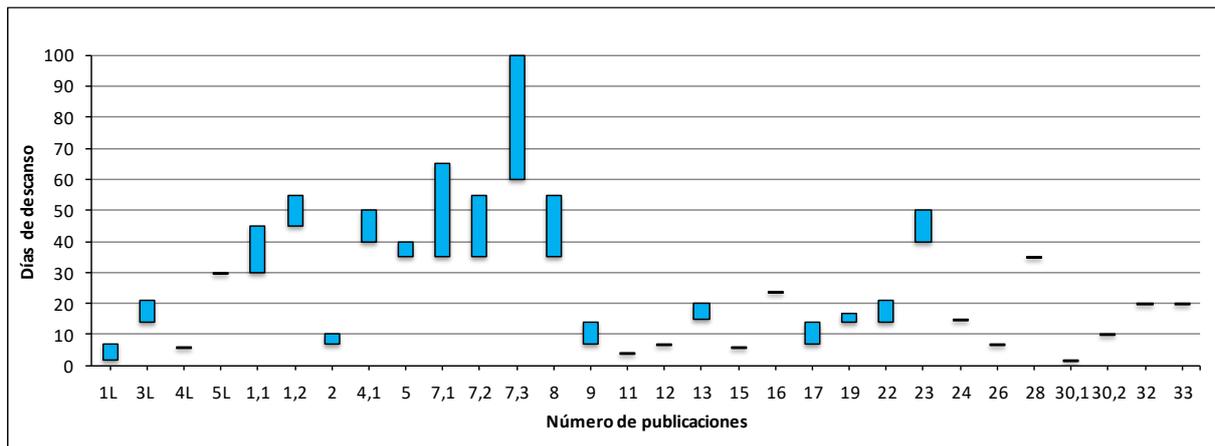
Días de carga de lodo empleados por cama para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

Figura 13

Días de descanso de lodo empleados por cama para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

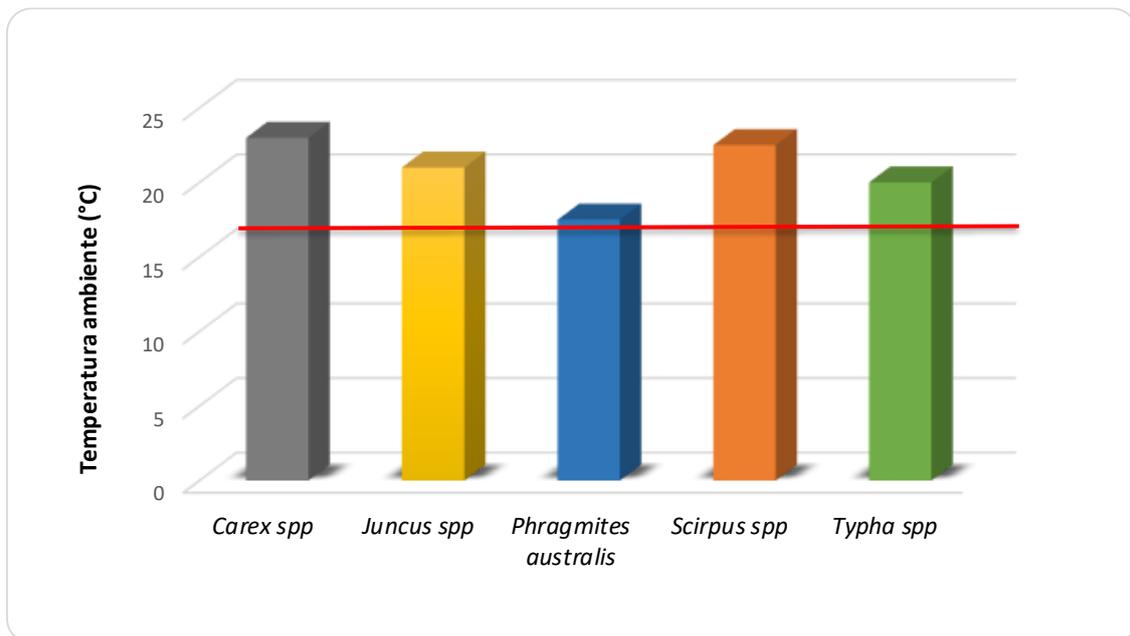
Las **Figuras 12 y 13** representan el rango de los días de carga o descanso (longitud de la barra), y la media de los datos se encuentra en el punto medio de la barra rectangular. Los demás puntos que no cuentan con un rango de días indican un solo valor en las publicaciones consultadas.

Actualmente, no existe una estrategia estándar recomendada para los periodos de carga y descanso, esto se evidencia en las **Figuras 12 y 13** donde se observa que no hay una tendencia similar entre los casos de estudio. Por ejemplo, algunos sistemas se cargaron durante 7-8 días y descansaron durante 55-56 días, otros se cargaron durante 1-3 días y descansaron durante 14-21 días y otros tuvieron 2 días de carga seguidos por 14 días de descanso.

➤ **Temperatura ambiente**

Figura 14

Temperatura ambiente óptima para el desarrollo y crecimiento de las plantas comunes emergentes en el tratamiento de humedales construidos de flujo vertical



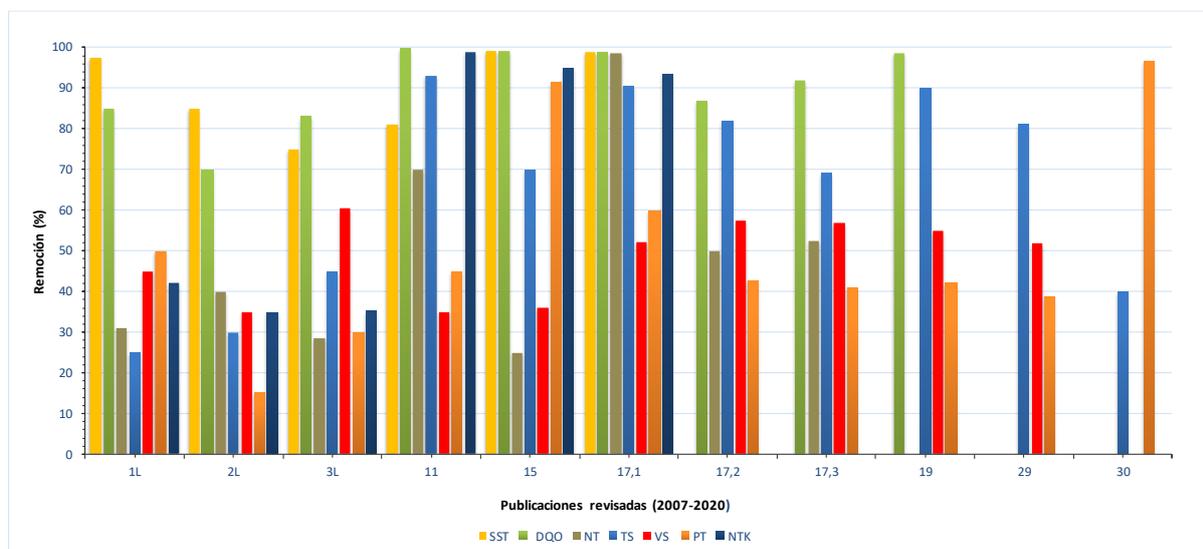
Fuente. Autoría propia

El rango de temperaturas más apropiado para el crecimiento de la vegetación se encuentra entre los 5 y 24 °C, siendo preferentes las temperaturas cálidas para aumentar la tasa de ET.

➤ *Eficiencias de remoción*

Figura 15

Eficiencias de remoción presentadas en la revisión bibliográfica en humedales para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

Los humedales para el tratamiento de lodo han demostrado tener altas eficiencias de remoción en cuanto a materia orgánica, sólidos suspendidos volátiles, nitrógeno total, y fósforo total en lodo residual mediante los procesos de mineralización, esto permite obtener lodos estabilizados que pueden convertirse en subproductos para la generación de compostaje en industrias de especies arbóreas y ornamentales. Lo anteriormente mencionado representa una oportunidad para transformar de manera eficiente estos lodos secundarios en recursos y evitar problemas de contaminación. La **Figura 15** muestra algunos porcentajes de remoción encontrados en la revisión bibliográfica.

8.3. Consideraciones necesarias para el diseño y operación

Los procedimientos encontrados para el diseño y construcción de humedales para el tratamiento de lodo no resultan ser del todo aplicables puesto que en las condiciones climáticas de la Sabana de Bogotá predomina una temporada lluviosa (abril, mayo, septiembre, octubre y noviembre) una temporada seca (enero, febrero, marzo, julio y agosto) y un tiempo de transición dado en los meses de junio y diciembre (IDEAM, 2020) sin embargo, el estudio realizado proporciona una guía para poder realizar nuestra propuesta de dimensionamiento la cual se encuentra en el *Anexo No 3*, que consta de cálculos pertenecientes al diseño y operación de esta tecnología.

A partir del trabajo realizado, se tomaron las siguientes consideraciones de diseño:

Impermeabilización del Área: Para la adecuación de los medios filtrantes, inicialmente se debe impermeabilizar el lugar con una geomembrana HDPE para evitar filtraciones de lixiviado que alteren negativamente los horizontes del suelo y puedan causar su contaminación.

Tasa de Carga de Lodo: Según las referencias bibliográficas se encuentra en un rango de 30-60 kg TS / m² / año (Nielsen, 2009), cargas superiores a 100 kg TS / m² / año presentan problemas operacionales al ser extremadamente altas (Nielsen, 2003). Para el caso de estudio, de acuerdo con la dispersión de los datos que se observan en la *Figura 10* se estableció que la carga corresponde a 30 kg TS / m² / año.

Volumen de Carga de Lodo: De acuerdo con el cálculo explicado en el numeral **7.3.4** se obtuvo un valor de 1.40 m³/d de lodo a cargar.

Vegetación: La densidad de plantas por unidad de área se estimó que es de 4 plantas/m² teniendo en cuenta que este valor puede ser acertado y validado de manera experimental, Según Stefanakis *et al.* (2014) indica que, para garantizar una rápida adaptación, la densidad inicial de la planta debe oscilar entre 4 a 10/plantas m².

Medios Filtrantes: Los valores de las capas se escogieron a través del *Anexo No 5* realizado con las 39 fuentes bibliográficas consultadas en los resultados obtuvimos un valor de 0,6m de grosor para el medio filtrante, y una profundidad de acumulación de lodo de 0,76m (*Tabla 2*), lo cual es consistente con los valores reportados por Stefanakis *et al.* (2014), que indica que el valor más común para la profundidad total de los medios filtrantes es de alrededor de 1.0 a 2.4 m (0.6 – 0.7 m de medio filtrante y 0.76 – 0.95 m para la acumulación de lodo).

Tabla 2

Dimensionamiento del medio filtrante

CAPAS	ESPESOR (cm)	MATERIAL DEL MEDIO FILTRANTE	DIÁMETRO DE GRANO (mm)
Capa superior	15	Grava fina	6-10
Capa intermedia	20	Grava media	15-25
Capa inferior	25	Piedra	30-60

Fuente. Autoría propia

Producción de Lodo en la PTAR Caso de Estudio: El valor obtenido en la hoja de cálculo de lodos activados (*Anexo No 4*) según la metodología del numeral **7.3.1** fue de 28 kg ST/d para el primer escenario y 5,0 kg ST/d para el segundo escenario (período académico e intersemestral respectivamente), a partir de estos datos se obtuvo lo siguiente:

Área Total: La superficie requerida para la implementación de esta tecnología para el tratamiento de lodos está en función de la tasa de carga de lodo y la producción de lodo por la PTAR, el área requerida corresponde a 291 m² para operar a la tasa de carga ya mencionada.

Número de Camas: Con base a los cálculos realizados en el *Anexo No 3*, se determinó el número de camas que tratarían la máxima cantidad de lodo durante 1 año, dando como resultado 6 camas cada una con un área de 48 m², (*Figura 16*) las cuales en la temporada seca tratan el 100% de la producción de lodo generado por la PTAR en estudio y en la temporada

lluviosa tratan el 69% por los periodos de descanso ya que, en esta temporada son más prolongados y no es posible realizar la carga de lodo todos los días del mes (**Figura 17**).

Figura 16

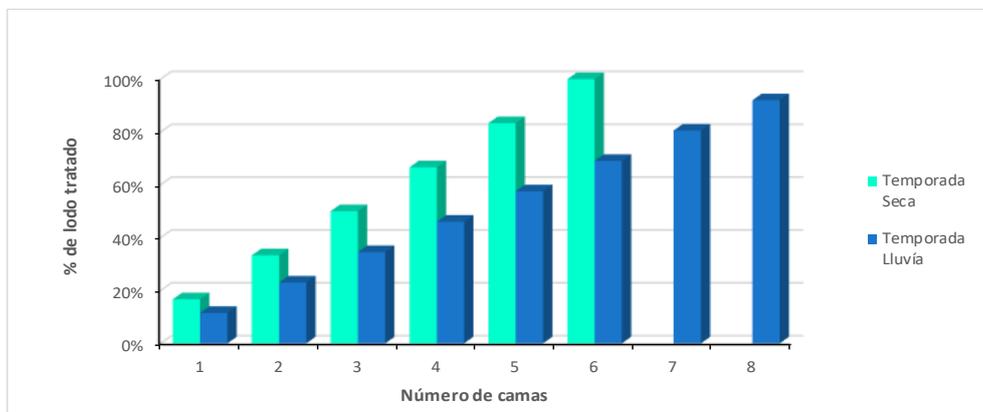
Vista superior de la configuración de los Humedales para el tratamiento de lodo en la PTAR del caso de estudio



Fuente. Autoría propia

Figura 17

Número de camas necesarias para tratar la totalidad del lodo en la temporada seca y de lluvia



Fuente. Autoría propia

Operación: Según la información obtenida no existe un patrón definido para cada cambio estacional como se observa en el *Figuras 12 y 13*, pues su variabilidad es considerable. Los días de carga y descanso se escogieron teniendo en cuenta la aplicación de lodo en las publicaciones revisadas y las estaciones climáticas registradas en cada una de éstas. El período de descanso suele ser más prolongado respecto al período de carga para permitir la deshidratación y secado de los lodos cargados, mediante drenaje y evapotranspiración.

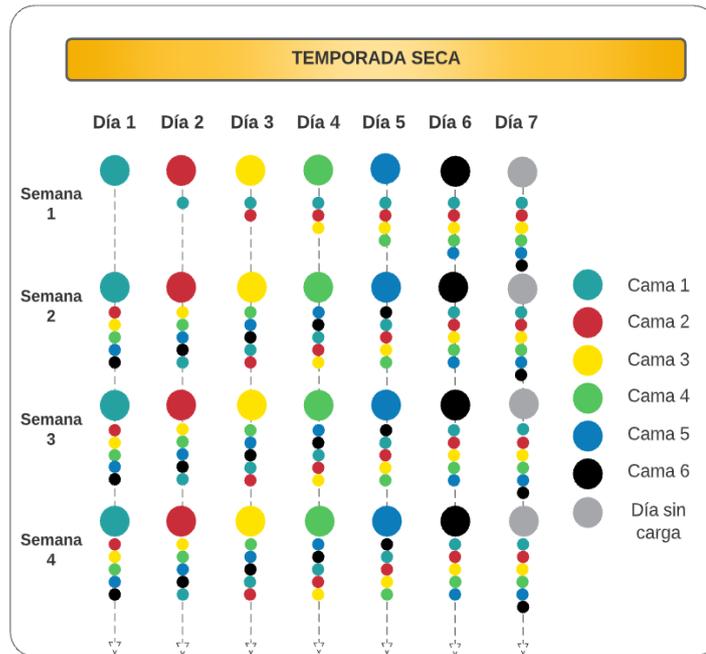
Con base en lo anteriormente mencionado, se determinó la siguiente frecuencia de operación para el caso de estudio (*Figura 18 y Figura 19*):

- Temporada seca: 1 día de carga seguidos de 7 días de descanso.
- Temporada lluvia: 1 día de carga seguido de 10-11 días de descanso.

En la *Figura 18 y Figura 19* cada cama está representada por un círculo con su respectivo color como se muestra en la parte derecha de las figuras, los círculos de mayor tamaño indican el día de carga y los círculos de menor tamaño los días de descanso de cada cama. Para estos ciclos de operación se estableció que el día séptimo (domingo) no se cargaría, debido a que el aporte de carga en el lodo este día es mínimo puesto que se reduce la cantidad de personas en la universidad comparado con los otros días de la semana, y además el personal encargado de operar el humedal podría no estar laborando.

Figura 18

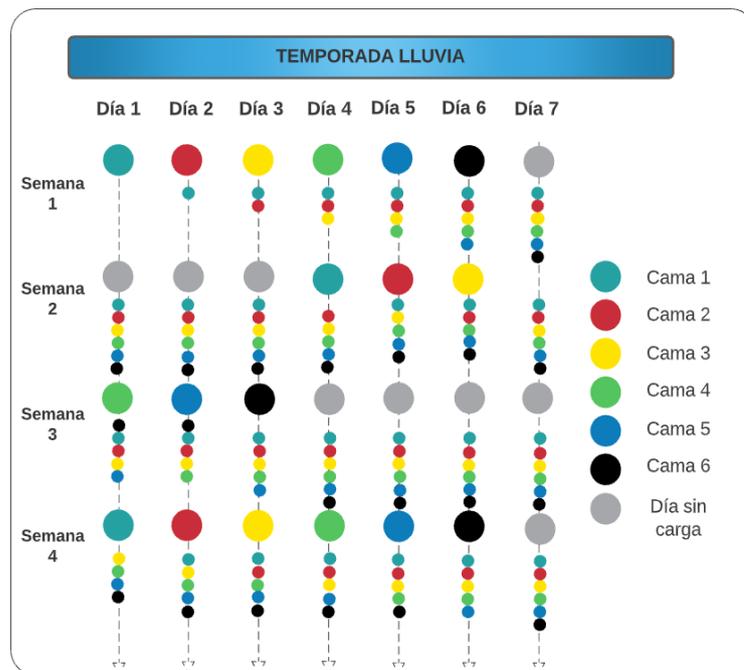
Ciclo de operación del humedal en temporada seca



Fuente. Autoría propia

Figura 19

Ciclo de operación del humedal en temporada lluvia



Fuente. Autoría propia

Para esta frecuencia de operación en los días de carga el líquido percolado proveniente de la deshidratación del lodo debe ser reincorporado al sistema de tratamiento de aguas residuales ubicado en la PTAR del caso de estudio.

Evapotranspiración: De acuerdo con la ET del humedal, en el *Anexo No 3* se realizó el cálculo por medio de la fórmula encontrada en el libro *Treatment wetlands second edition*, (Kadlec *et al.*, 2008). En promedio el valor de ET anual es de 5 mm/d, sin embargo, los valores de Kc, no se encontraban disponibles para todos los meses del año

8.4. Aplicabilidad de procedimientos

Tasa de carga de lodo: El valor seleccionado es el más implementado además de presentar remociones superiores al 90% de materia orgánica, Nitrógeno total, Fósforo y sólidos totales, por esta razón, se puede deducir que esta carga es adecuada y que cumple con los límites establecidos en la revisión bibliográfica evitando una sobrecarga en el sistema, sin embargo, el factor climático presenta influencia en las tasas de aplicación diaria que puedan variar esta carga anual.

Vegetación: En los países en donde la tecnología de humedales para el tratamiento de lodo se ha implementado, es evidente que la especie *Phragmites Australis* presenta mayores tasas de evapotranspiración seguida de la especie *Typha latifolia*, aumentando las eficiencias de deshidratación.

Para este proyecto se escogió la caña *Phragmites Australis*, especie de distribución cosmopolita, que se adapta con alta capacidad competitiva y coloniza hábitats como riberas, estuarios, orillas de lagos y costas (Wang *et al.*, 2020) se encuentra disponible en la Sabana de Bogotá específicamente en el humedal de Torca - Guaymaral, y los humedales de Bogotá tales como Conejera, Juan amarillo, Córdoba, Jaboque, Santa María del Lago, y Tibanica (Díaz *et al.*, 2012).

Esta caña presenta mayor eficiencia de deshidratación por su alta tasa de ET registrados en la literatura; además, en relación con la temperatura es la que mejor se ajusta a las condiciones climáticas de la Sabana de Bogotá (16°C) según la **Figura 14**. De acuerdo con Uggetti *et al.* (2010) la especie *Phragmites Australis* demuestra alta capacidad de adaptación al ambiente de lodos residuales.

Operación: Con relación a los días de carga y descanso, estos pueden ser cortos en comparación con los casos de estudio encontrados en condiciones climáticas altamente variables, dado que, la temperatura ambiente en la Sabana de Bogotá generalmente es menos fluctuante, en cambio, las temperaturas ambiente reportadas en los casos de estudio varían de 33°C a -10°C por sus estaciones de invierno, otoño primavera y verano, por ejemplo en países como, Dinamarca, Estados Unidos, Canadá, Italia, Polonia, China y Francia.

Temperatura Ambiente: Teniendo en cuenta lo anterior se puede deducir que, los humedales para el tratamiento de lodo funcionarán en condiciones locales de la Sabana de Bogotá ya que en esta zona se registran temperaturas que varían de 7°C a 19°C. Algunos estudios registraron que el crecimiento de la planta, la evaporación y la actividad microbiana mejora cuando el valor de la temperatura ambiente es cercano a 15 °C lo cual es favorable para el proceso de estabilización. Por otro lado, rara vez la temperatura baja a menos de 3°C.

Cabe destacar que, en épocas de baja temperatura y altas precipitaciones a nivel local esta tecnología no trata el 100% de la producción de lodo que se genera diariamente, por lo tanto, se requiere hacer uso de un método complementario para tratar el 30% restante en estas épocas.

Evapotranspiración: Los valores de temperatura por encima de 15-16 ° C podrían aumentar la tasa de ET en STW en un 30%, mientras que las temperaturas más altas durante los meses de verano mejoran la deshidratación de lodos en STW en un 40% (Langergraber *et al* ,2020).

Sin embargo, existe un factor limitante correspondiente a altas precipitaciones en épocas lluviosas, lo que genera incertidumbre en cuanto a las tasas de asimilación de agua por parte de la especie vegetativa plantada, que registra una tasa de evapotranspiración promedio de 7.07 mm/d.

Troesch *et al.* (2009) reportaron valores de ET en 3.6 mm/d en verano y 1.8 mm/d en invierno debido a la evaporación y transpiración de la planta.

Dotro, Molle, Puigagut & Von Sperling (2017) mencionan que la ET no es fácil de medir, pero los valores reportados pueden oscilar entre 0 y 50 mm/d, y los estudios de investigación en Brasil indicaron que los valores de ET se encuentran en el orden de 5 a 30 mm/d.

Teniendo en cuenta las publicaciones anteriores, podemos decir que la ET en la Sabana de Bogotá se encuentra dentro de los rangos reportados por otros estudios, lo que nos indica que estos humedales pueden ser implementados en condiciones ambientales locales.

Mineralización: Gracias a la ubicación geográfica el humedal se encontraría bajo condiciones de clima tropical, que de acuerdo con Stefanakis *et al.*, (2014) permiten el crecimiento de las plantas y la liberación de oxígeno por las raíces de estas, además, aumenta la acumulación de materia orgánica que estimula la actividad microbiana, maximizando la eliminación de patógenos.

El clima frío local no reporta temperaturas cercanas a punto de congelación de manera prolongada, siendo esto una ventaja con respecto a países europeos en épocas invernales, ya que esto genera disminución en las velocidades de reacción de la degradación de contaminantes en el tratamiento con humedales (Dotro *et al.*, 2017).

8.5. Procedimiento Propuesto para el Diseño y Operación de un Humedal para el Tratamiento de Lodo

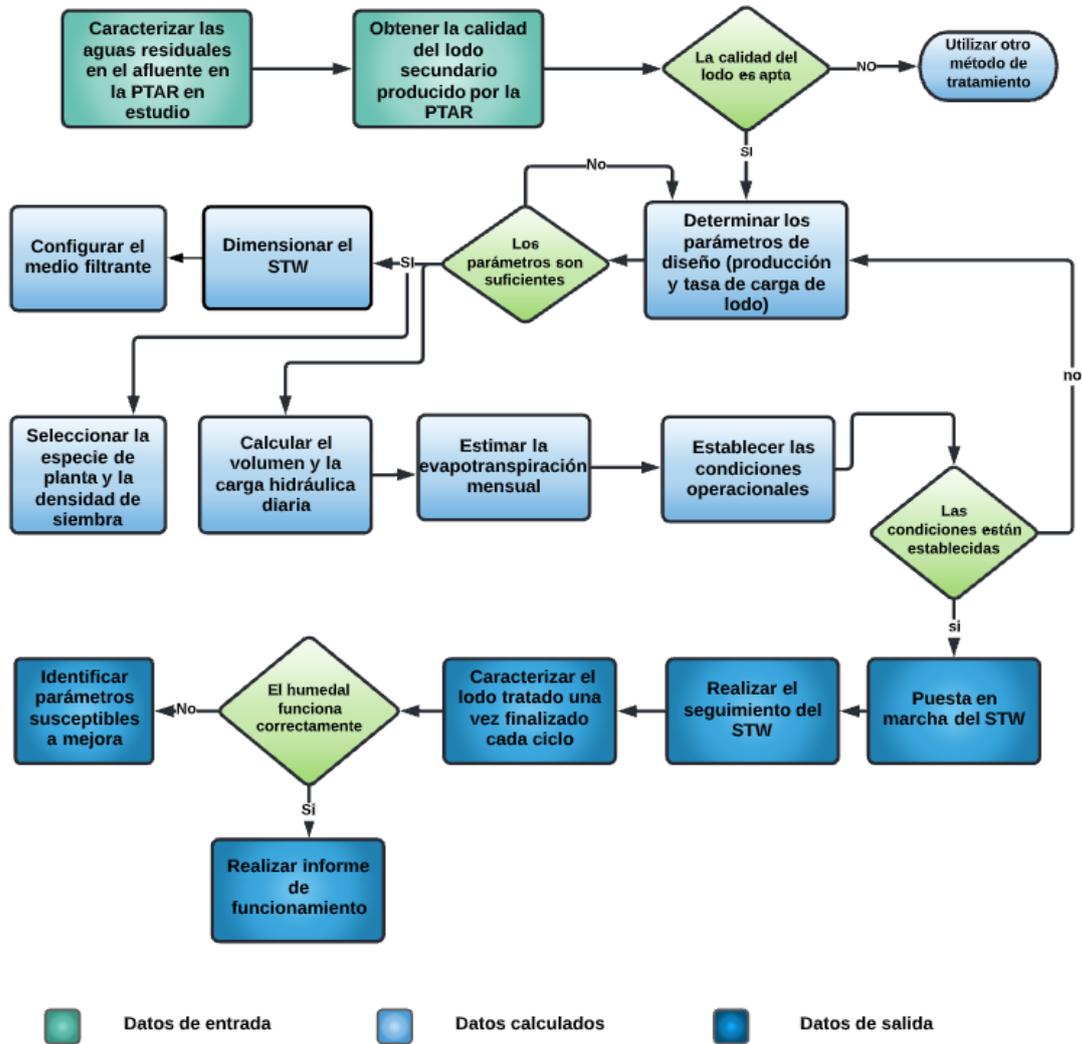
A partir de los resultados obtenidos anteriormente se pudo establecer el procedimiento de diseño y operacional para el caso de estudio, sin embargo se requiere realizar la caracterización inicial y final al tratamiento del lodo a tratar, ya que esta caracterización permite establecer los niveles de toxicidad (metales pesados) que pueden afectar de manera significativa a la vegetación y las características de un subproducto que cumpla funciones agrícolas (abono) para cultivos no frutales que se encuentren en las instalaciones de la sede campus Nueva Granada de la Universidad Militar Nueva Granada, esto con el fin de aprovechar de manera sostenible el lodo estabilizado.

Adicionalmente con este procedimiento se requiere realizar una bitácora cuyo contenido muestre el seguimiento del humedal para poder tomar decisiones que permita el mejoramiento de esta tecnología en condiciones locales, cabe resaltar que es importante no sólo realizar un seguimiento al humedal, sino también a las condiciones meteorológicas de la Sabana de Bogotá, para poder registrar un régimen hidrológico que ajuste la condición operativa y afiance los parámetros constructivos.

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

Figura 20

Procedimiento propuesto para el diseño y puesta en marcha de un humedal para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

8.6. Diseño Experimental

A partir del diseño realizado para el caso de estudio en la PTAR sede campus Nueva Granada de la Universidad Militar Nueva Granada se planteó un diseño experimental (*Anexo No 3*), el cual mediante su funcionamiento aportará datos experimentales que permitirán el mejoramiento en el diseño y operación del humedal para el tratamiento de lodo y así poder

validar su construcción a escala real en las instalaciones de la universidad. Para ello, se establecieron las siguientes condiciones (NASA, 2020):

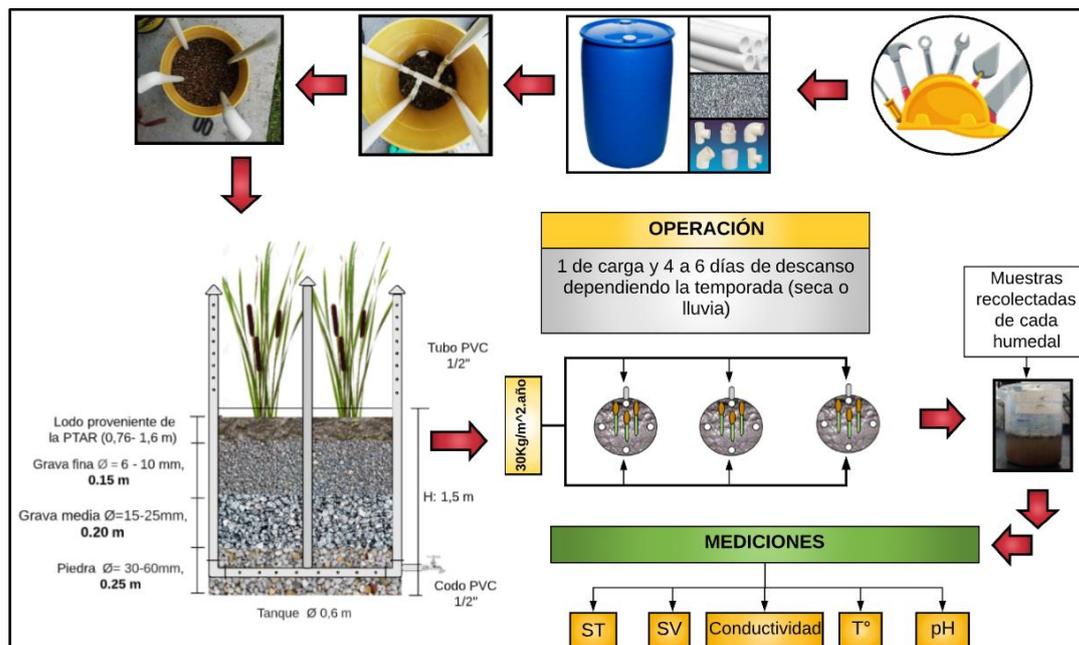
- Temperatura ambiente Promedio 18 °C
- Presión: 82.3 kPa
- Humedad relativa del 80%

Configuración de Banco de Pruebas

Se podrán construir 3 camas de flujo vertical a escala piloto, en el campus Nueva Granada de la Universidad Militar Nueva Granada, para ello, se utilizarán canecas plásticas de 55 galones con un área de 2m², tubos, uniones en PVC y el material filtrante. El lecho de cada cama que formarán el medio de drenaje donde serán plantadas las plantas está distribuido como se muestra en la **Figura 21**. Los humedales serán plantados con la caña *Phragmites Australis* debido a que esta especie resulta ser la más adecuada en el proceso de evapotranspiración.

Figura 21

Configuración del banco de pruebas del humedal para el tratamiento de lodo



Fuente. Autoría propia

Operación del Humedal Experimental: Una vez esté listo el medio filtrante se procederá con la alimentación, la operación propuesta es de 1 de carga y 4 a 6 días de descanso dependiendo la temporada (seca o lluvia).

En la alimentación se produce un lixiviado proveniente de la carga con lodo secundario (líquido percolado en el medio filtrante), este lixiviado debe ser reingresado al tratamiento primario de la PTAR ubicada en sitio de experimentación para ser tratado.

Mediciones en Estación Meteorológica: Las mediciones de precipitación, temperatura y humedad relativa se extraerán de la estación meteorológica ubicada en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada.

Análisis Para Realizar a Escala de Laboratorio: Al iniciar y finalizar la operación, se debe tomar una muestra de lodo del humedal en un vaso precipitado para tomar los siguientes datos:

- Conductividad hidráulica como indicador de volumen en el sustrato, para esta medición se utilizará una sonda multiparamétrica portátil marca Hanna referencia HI 9829, siguiendo el método estándar para análisis de agua.
- pH como nivel permisible adoptado por la planta, para esta medición se utilizará una sonda multiparamétrica portátil marca Hanna referencia HI 9829, o un pH-metro, siguiendo el método estándar para análisis de agua.
- Sólidos Totales (ST) como indicadores de eficiencia de deshidratación y procesos de mineralización respectivamente, a través de los métodos estándar para el análisis de agua.

Datos esperados: Con la implementación del humedal evaporativo experimental se espera obtener remociones de:

- Sólidos totales entre el 30 y 40 % y Sólidos volátiles entre el 40 y 60 %
- Demanda química de oxígeno del 90%

- Nitrógeno total entre el 40 y 60%
- Fósforo total entre el 52 y el 68%
- Cromo entre el 70 y 90%
- Cadmio del 15%

Estas remociones permitirán validar la implementación de esta tecnología en condiciones locales y adicionalmente la información recolectada en el método experimental permitirá establecer la aplicabilidad a gran escala, ya que, además de ser una tecnología de bajo costo es amigable con el medio ambiente.

8.7. Costos

Para este trabajo se estimaron los costos tanto del diseño experimental como del caso de estudio con el fin de mostrar la inversión inicial que se requiere para la implementación de esta tecnología. Cabe recalcar que este tipo de tratamientos no requieren costos energéticos.

8.7.1. Costos del Diseño Experimental

Tabla 3

Costo de los materiales requeridos para construir el diseño experimental con 3 camas

MATERIALES	CANTIDAD	VALOR (\$)
Caneca plástica 55 galones	3	¹ 405.000
Tubo PVC ½ x 1m	12	² 74.400
Tee PVC ½	6	² 9.000
Codo 90 ½	12	² 12.000
Llave plástica ½	3	² 14.700
Grava fina 1kg	45	² 54.000
Grava media 1kg	12	² 84.000
Piedras 1kg	15	² 178.500
TOTAL		831.600

8.7.2. Costos del Diseño del Caso de Estudio

Tabla 4

Costo de los materiales requeridos para construir el diseño del caso de estudio con 6 camas

MATERIALES	CANTIDAD	VALOR (\$)
Geomembrana HDPE x 1m²	408	¹ 6.895.200
Tubo PVC 4'' x 6m	36	² 3.366.000
Tee PVC 4''	12	² 118.800
Codo de 3 vías 4''	24	² 381.600
Grava fina x m³	11	³ 3.832.752
Grava media x m³	14	³ 2.439.024
Piedras x m³	18	³ 878.220
TOTAL		17.911.596

¹<https://www.mercadolibre.com.co/>

² <https://www.homecenter.com.co>

³<https://www.idu.gov.co>

9. CONCLUSIONES

Las consideraciones necesarias para el diseño y operación de humedales para el tratamiento de lodo secundario en condiciones de la Sabana de Bogotá se presentan en las siguientes cuatro categorías: **(1)** Información de entrada para el diseño (condiciones ambientales): temperatura ambiente, evapotranspiración y precipitación, esta última como factor limitante del funcionamiento del humedal. **(2)** Información de entrada para el diseño (condiciones del proceso): caracterización fisicoquímica del afluente de la PTAR en estudio y del lodo residual secundario antes del tratamiento, cálculo de la producción de lodo en la PTAR. **(3)** Información que el diseñador debe tener en cuenta para el proceso constructivo: tasa de carga de lodo, carga hidráulica, vegetación, configuración del medio filtrante, dimensionamiento (área) y definición del ciclo operativo (carga y descanso). **(4)** Información de salida (monitoreo del proceso): resultados de puesta en marcha, caracterización del lodo una vez finalizado cada ciclo de operación y alternativas de mejora para el proceso.

Los humedales para el tratamiento de lodo en condiciones ambientales de la Sabana de Bogotá son una alternativa parcialmente aplicable para el tratamiento de lodo. Tienen una limitación asociada a la temporada de lluvia; como consecuencia de las altas precipitaciones no se logra tratar el 100% de lodo generado por la PTAR. Lo anterior tomando como referencia la infraestructura dimensionada para la temporada seca y considerando la operación requerida para la condición de lluvia (días de carga y descanso). Finalmente, un factor limitante para la implementación de este proceso está ligado al alto requerimiento de área por unidad de volumen tratado.

Se propuso una metodología para el dimensionamiento del caso de estudio (PTAR sede campus Nueva Granada). Lo anterior resulta un aporte teniendo en cuenta que a nivel local no se conocen experiencias a escala real en este tipo de procesos.

Es necesario validar los resultados obtenidos teóricamente para el caso de estudio presentado en este trabajo, aplicando el diseño experimental propuesto. Lo anterior permitirá consolidar información valiosa para la toma de decisiones sobre el diseño y funcionamiento de los humedales para el tratamiento de lodo.

10. BIBLIOGRAFÍA

Amezquita, D., & Bejarano, P. (2018). Evaluación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Gachancipá [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16684/1/trabajo%20de%20grado%20gachancipa%20final%20con%20imagen.pdf>

Bermúdez Grisales, J. A., & Carrillo Loaiza, J. E. (2019). Evaluación y diagnóstico a la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del casco urbano del municipio de Guasca Cundinamarca [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/24358/1/trabajo%20de%20grado%20final%20-%20ptar%20guasca%20cundinamarca%20-%20504641%20-%20504120.pdf>, 28, 44-45.

Benito, J. (2020). Atención a la acción popular No .2009-058 Realizar las acciones pertinentes para la mitigación de olores ofensivos provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Chía I. <https://www.chia-cundinamarca.gov.co/2020/sentenciariobogota/Presentaci%C3%B3n%20PTAR%20Olores.pdf>

Brix, H., Kadlec, R., Knight, R., Vymazal, J., Cooper, P., & Haberl, R. (2000). Constructed wetlands for pollution control: Process, performance, design and operation (Vol. 8). IWA Publishing. <https://www.ircwash.org/resources/constructed-wetlands-pollution-control-process-performance-design-and-operation>

Caicedo, P. V., Rahman, K. Z., Kuschik, P., Blumberg, M., Paschke, A., Janzen, W., & Schüürmann, G. (2015). Comparison of heavy metal content in two sludge drying reed beds of different age. *Ecological Engineering*, 74, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.10.025>

Camacho, S. (2019). Diagnóstico de la planta de tratamiento de agua residual la carbonera, en el municipio de la Mesa, departamento de Cundinamarca [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás de Colombia]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/19944/2019SebastianCamacho.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., & García, J. (2007). Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, 41(6), 1388–1398. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.12.019>

Chen, Z., & Hu, S. (2019). Heavy metals distribution and their bioavailability in earthworm assistant sludge treatment wetland. *Journal of Hazardous Materials*, 366, 615-623. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.12.039>

Cleverson, V., Von Sperling, M., & Fernandes, F. (2007). *Sludge Treatment and Disposal*. 6. Recuperado de <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/9781780402130.pdf>

Díaz-Espinosa A.M., Díaz-Triana J.E y O. Vargas. (eds). 2012. Catálogo de plantas invasoras de los humedales de Bogotá. Grupo de Restauración Ecológica de la Universidad Nacional de Colombia y Secretaría Distrital de Ambiente. Bogotá, D.C., Colombia. 248 p.

Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). *Treatment wetlands Volumen 7*. Water Science and Technology. Recuperado de <https://www.iwapublishing.com/sites/default/files/ebooks/V7%20Treatment%20Wetlands.pdf>

Emservilla s.a. e.s.p. (2017). *Sistema de Alcantarillado del Municipio de Ubaté*. Obtenido de <https://emservilla.gov.co/alcantarillado/#:~:text=La%20PTAR%20del%20Municipio%20Villa,el%20sustrato%20o%20agua%20residual.>

Empresa de acueducto y Alcantarillado de Madrid. (2019). *Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Madrid PTAR 1 entra en funcionamiento - Alcaldía de Madrid*. <http://www.madrid-cundinamarca.gov.co/noticias/planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-madrid-ptar>

Faulwetter, J. L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M. D., Brisson, J., ... & Stein, O. R. (2009). Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: a review. *Ecological engineering*, 35(6), 987-1004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>

Gagnon, V., Chazarenc, F., Kõiv, M., & Brisson, J. (2012). Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland. *Water Research*, 46(16), 5305-5315. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.007>

Giraldi, D., Masciandaro, G., Peruzzi, E., Bianchi, V., Peruzzi, P., & Ceccanti, B. (2009). Hydraulic and biochemical analyses on full-scale sludge consolidation reed beds in Tuscany (Italy). 1209-1216. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.418>

Google Earth. Vista aérea del Campus Nueva Granada [Mapa Online]. Cajicá-Cundinamarca: Google Earth. Recuperado de <https://www.google.com/intl/es/earth/>. Consultado el 24 de marzo de 2021.

Hazen and Sawyer, & Nippon KOEI. (2011). *Alternativas para el Manejo y Disposición de Biosólidos de la PTAR Salitre*. 20, 1–161.

Hu, S., & Chen, Z. (2018). Earthworm effects on biosolids characteristics in sludge treatment wetlands. *Ecological Engineering*, 118(March), 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.016>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2020). Tiempo y clima. <http://www.ideam.gov.co/>

Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands*. CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781420012514>

Kengne, I.M., Akoa, A., Soh, E.K., Tsama, V., Ngoutane, M.M., Dodane, P.H., Kone', D., 2008. Effects of faecal sludge application on growth characteristics and chemical composition of *Echinochloa pyramidalis* (Lam.) Hitch. and Chase and *Cyperus papyrus* L. *Ecological Engineering* 34, 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.007>.

Kim, B. J., & Smith, E. D. (1997). Evaluation of sludge dewatering reed beds: A niche for small systems. *Water Science and Technology*, 35(6), 21-28. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00091-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00091-7)

Korboulewsky, N., Wang, R., & Baldy, V. (2012). Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal. *Bioresource Technology*, 105, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.037>

Koottatep, T., Polprasert, C., Oanh, N. T. K., Heinss, U., Montangero, A., & Strauss, M. (2001). Potentials of vertical flow constructed wetlands for septage treatment in tropical regions. In *Advances in water and wastewater treatment technology* (pp. 315-323). Elsevier. DOI:10.1016/B978-044450563-7/50215-8

Langergraber, G., Dotro, G., Nivala, J., Rizzo, A., & Stein, O. R. (Eds.). (2019). *Wetland Technology: Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands*. Water Science and Technology. <https://doi.org/10.2166/9781789060171>

Lee, S., Hahn, C., Rhee, M., Oh, J. E., Song, J., Chen, Y., Lu, G., Perdana, & Fallis, A. (2012). Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de bojacá-cundinamarca. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Li, H. (2018). Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management: A compendium of hot topics and features from IWA Specialist Groups. *Water Intelligence Online*, 17, 9781780408378. <https://doi.org/10.2166/9781780408378>

Li, H., & Groups, I. (2016). Global Trends & Challenges in Water Science, Research and Management: A compendium of hot topics and features from IWA Specialist Groups, second edition, 20-50. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20079.84646>

López Vázquez, C. M., Buitrón Méndez, G., García, H. A., & Cervantes Carrillo, F. J. (2017). Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. *Water Intelligence Online*, 16, 9781780409146. <https://doi.org/10.2166/9781780409146>

Mant, C., Costa, S., Williams, J., & Tambourgi, E. (2006). Phytoremediation of chromium by model constructed wetland. *Bioresource Technology*, 97(15), 1767-1772. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.09.010>

Marcos Von Sperling, C. A. (2005). *Biological Wastewater Treatments in Warm Climate Regions*. London: IWA Publishing, 12-34.

Metcalf & Eddy, A. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery* (5.a ed.). McGraw-Hill.

Morales, K., & Rodríguez, N. (2017). estado del arte sobre el proceso de descontaminación del río Bogotá en el periodo 2010—2016 y sus implicaciones en el medio ambiente [Trabajo de grado, Universidad La Gran Colombia]. [https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5526/estado%20del%20arte%20sobre%](https://repository.ugc.edu.co/bitstream/handle/11396/5526/estado%20del%20arte%20sobre%20)

20el%20proceso%20de%20descontaminacion%20del%20rio%20bogota%20en%20el%20per
iodo%202010%202016.pdf?sequence=1&isallowed=y

National Aeronautics and Space Administration [NASA]. (2020). POWER Data Access Viewer. Recuperado de: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

Nielsen, S. (2003). Sludge drying reed beds. *Water Science and Technology*, 48 (5), 101-109. <https://doi.org/10.2166/wst.2003.0292>

Nielsen, S. (2005a). Sludge reed bed facilities: operation and problems. *Water Science and Technology*, 51(9), 99-107. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0297>

Nielsen, S., (2005b). Mineralisation of hazardous organic compounds in a sludge reed bed and sludge storage. *Water Science and Technology*, 51(9), 109-117. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0299>

Nielsen, S. (2007). Helsing sludge reed bed system: reduction of pathogenic microorganisms. *Water Science and Technology*, 56(3), 175-182. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.491>

Nielsen, S., (2009). Sludge drying reed beds. *Water Science and Technology* 48 (5), 101-109. <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es9834733>

Nielsen, S., (2011). Sludge treatment reed bed facilities- organic load and operation problems. *Water Science and Technology* 63 (5), 941-947. doi:10.2166/wst.2011.273. <https://doi.org/10.1016/j.cwj.2011.05.111>

Nielsen, S., & Cooper, D. J. (2011). Dewatering sludge originating in water treatment works in reed bed systems. *Water Science and Technology*, 64(2), 361-366. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.581>

Ortiz, C., López, M. C., & Rivas, F. A. (2012). Prevalencia de helmintos en la planta de aguas residuales del municipio El Rosal, Cundinamarca. *Revista de Salud Pública*, 14(2), 296-304. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642012000200010>.

Perez, A. L. L., & Quinayás, S. L. R. (2016). Evaluación del manejo y operación de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tocancipá (Cundinamarca) [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/3359/LosadaAngie,RiveraSindy2016.pdf;jsessionid=118011DDADA4885C6E398B8B5915891A?sequence=1>

Peruzzi, E., Nielsen, S., Macci, C., Doni, S., Iannelli, R., Chiarugi, M., & Masciandaro, G. (2013). Organic matter stabilization in reed bed systems: Danish and Italian examples. *Water science and technology*, 68(8), 1888-1894. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.448>

Poveda, I. E. (2016). Propuesta de mejoramiento de las operaciones en la planta de tratamiento de agua residual en el municipio de la calera (Cundinamarca) [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/13947/4/propuesta%20de%20mejoramiento%20de%20las%20operaciones%20en%20la%20planta%20de%20tratamiento%20de%20ag>

ua%20residual%20en%20el%20municipio%20de%20la%20calera%20%28cundinamarca%29.pdf, 36-38.

Ruiz, A., & Quevedo, L. (2017). Análisis de los lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas residuales del municipio de Guatavita [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/14811>

Sosa, A. (2018). Diagnóstico de la PTAR del municipio de Granada (Cundinamarca) Guatavita [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/23157/SosaGonzalezAndr%c3%a9sFelipe2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Stefanakis, A.I., Tsihrintzis, V.A., (2012). Effect of various design and operation parameters on performance of pilot-scale sludge drying reed beds. *Ecological Engineering* 38, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2011.10.003>

Stefanakis, A. I., Komilis, D. P., & Tsihrintzis, V. A. (2011). Stability and maturity of thickened wastewater sludge treated in pilot-scale sludge treatment wetlands. *Water Research*, 45(19), 6441-6452. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.09.036>

Stefanakis, A. I., & Tsihrintzis, V. A. (2011). Dewatering mechanisms in pilot-scale Sludge Drying Reed Beds: Effect of design and operational parameters. *Chemical Engineering Journal*, 172(1), 430–443. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.05.111>

Stefanakis, A., Akrotos, C., Tsihrintzis, V., (2014) *Vertical Flow Constructed Wetlands, Eco-engineering Systems for Wastewater and Sludge Treatment*. Elsevier, 152-297.

Troesch, S., Lienard, A., Molle, P., Merlin, G., & Esser, D. (2009). Sludge drying reed beds: full-and pilot-scale study for activated sludge treatment. *Water Science and Technology*, 60(5), 1145-1154. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.388>

Uggetti, E., Llorens, E., Pedescoll, A., Ferrer, I., Castellnou, R., & García, J. (2009). Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain. *Bioresource technology*, 100(17), 3882-3890. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.03.047

Uggetti, E., Ferrer, I., Llorens, E., & García, J. (2010). Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art. *Bioresource Technology*, 101(9), 2905–2912. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.102>

Uggetti, E., Ferrer, I., Arias, C., Brix, H., & García, J. (2012). Carbon footprint of sludge treatment reed beds. *Ecological Engineering*, 44, 298-302. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.020>

Vásquez, J., Vargas, G., (2018). Aprovechamiento de lodos planta de tratamiento de aguas residuales municipio de funza, como insumo de cultivo y mejoramiento del suelo [Trabajo de grado, Universidad Católica de Colombia]. <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/16425/1/Trabajo%20de%20Grado%20-%20%20Lodos%20Funza.pdf>, 25-31.

Venegas, A. (2018). Solamente 48,2% de los municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales [Corporativa]. La República. <https://www.larepublica.co/infraestructura/solamente-482-de-los-municipios-cuentan-con-plantas-de-tratamiento-de-aguas-residuales-2611155>

Vincent, J., Forquet, N., Molle, P., & Wisniewski, C. (2012). Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): Influence of sludge characteristics and loading rates. *Bioresource Technology*, 116, 161-169. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.023>

Vigueras-Carmona, S. E., Zafra-Jiménez, G., García-Rivero, M., Martínez-Trujillo, M. A., & Pérez-Vargas, J. (2013). Efecto del pretratamiento sobre la biodegradabilidad anaerobia y calidad microbiológica de lodos residuales secundarios. *Revista mexicana de ingeniería química*, 12(2), 293-301.

Wang, J., Chen, G., Fu, Z., Qiao, H., & Liu, F. (2020). Assessing wetland nitrogen removal and reed (*Phragmites australis*) nutrient responses for the selection of optimal harvest time. *Journal of Environmental Management*, 111783. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111783>

Wang, S., Cui, Y., Li, A., Zhang, W., Wang, D., Chen, Z., & Liang, J. (2020). Deciphering of organic matter and nutrient removal and bacterial community in three sludge treatment wetlands under different operating conditions. *Journal of Environmental Management*, 260, 110159. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110159>

Werther, J. & Ogada, T. (1998). Combustión de lodos de depuradora. *Progress in Energy and Combustion Science*, 25 (1), pp. 55 - 116. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(98\)00020-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00020-3)

11. ANEXOS

ANEXO No 1. Convenciones de fuentes bibliográficas consultadas en el análisis estadístico

Tabla 1

Publicaciones consultadas para el tratamiento de lodo residual mediante humedales (elaboración propia).

CONVENCIÓN	NOMBRE DE LA PUBLICACIÓN	REFERENCIA
1L	Wetland Technology Practical Information on the Design and Application of Treatment Wetlands	(Langergraber <i>et al.</i> , 2020)
2L	Treatment wetlands volumen 7	(Dotro <i>et al.</i> , 2017)
3L	Vertical Flow Constructed Wetlands	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2014)
4L	Treatment wetlands second edition	(Kadlec <i>et al.</i> , 2008)
5L	Constructed Wetlands for Pollution Control	(Kadlec <i>et al.</i> , 2000)
1	Sewage sludge and waterworks sludge stabilization in sludge treatment reed bed systems	(Masciandaro <i>et al.</i> , 2017)
2	Reed bed systems for sludge treatment: case studies in Italy	(Masciandaro <i>et al.</i> , 2015)
3	Economic assessment of sludge handling and environmental impact of sludge treatment in a reed bed system	(Nielsen, 2015)
4	Stabilisation and mineralisation of sludge in reed bed systems after 10–20 years of operation	(Nielsen <i>et al.</i> , 2014)
5	Short-term performance analysis of sludge treatment reed beds	(Iannelli <i>et al.</i> , 2013)
6	Organic matter stabilization in reed bed systems: Danish and Italian examples	(Peruzzi <i>et al.</i> , 2013)
7	Sludge treatment reed bed facilities – organic load and operation problems	(Nielsen, 2011)
8	Dewatering sludge originating in water treatment works in reed bed systems	(Nielsen, 2011)
9	Hydraulic and biochemical analyses on full-scale sludge consolidation reed beds in Tuscany (Italy)	(Giraldi, 2009)
10	Polish experience in operation of sludge treatment reed beds	(Kolecka <i>et al.</i> , 2018)

CONVENCIÓN	NOMBRE DE LA PUBLICACIÓN	REFERENCIA
11	Surplus sludge treatment in two sludge treatment beds under subtropical condition in China	(Hu <i>et al.</i> , 2017)
12	Stabilization process in reed bed systems for sludge treatment	(Peruzzi <i>et al.</i> , 2017)
13	Integrated dewatering and stabilization system as an environmentally friendly technology in sewage sludge management in Poland	(Kolecka <i>et al.</i> , 2017)
14	Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes: Solar, thermal and reed beds e Impact on organic matter characteristics	(Collard <i>et al.</i> , 2016)
15	Effect of plant species on sludge dewatering and fate of pollutants in sludge treatment wetlands.	(Gagnon <i>et al.</i> , 2013)
16	Mechanical and hydraulic properties of sludge deposit on sludge drying reed beds (SDRBs): Influence of sludge characteristics and loading rates.	(Vincent <i>et al.</i> , 2012)
17	Effect of various design and operation parameters on performance of pilot-scale Sludge Drying Reed Beds.	(Stefanakis & Tsihrintzis, 2012)
18	Carbon footprint of sludge treatment reed beds	(Uggetti <i>et al.</i> , 2012)
19	Stability and maturity of thickened wastewater sludge treated in pilot-scale sludge treatment wetlands (piloto)	(Stefanakis <i>et al.</i> , 2011)
20	Purification processes involved in sludge treatment by a vertical flow wetland system: Focus on the role of the substrate and plants on N and P removal	(Korboulewsky <i>et al.</i> , 2012)
21	Effect of plant species on water quality at the outlet of a sludge treatment wetland (piloto)	(Gagnon <i>et al.</i> , 2012)
22	Sludge treatment wetlands: A review on the state of the art	(Uggetti <i>et al.</i> , 2010)
23	Musk fragrances, DEHP and heavy metals in a 20 years old sludge treatment reed bed system	(Matamoros <i>et al.</i> , 2012)
24	Efficiency assessment of a reed bed pilot plant (<i>Phragmites australis</i>) for sludge stabilisation in Tuscany (Italy)	(Bianchi <i>et al.</i> , 2011)
25	Effects of loading rates and plant species on sludge characteristics in earthworm assistant sludge treatment wetlands.	(Hu <i>et al.</i> , 2020)
26	Comparison of heavy metal content in two sludge drying reed beds of different age (piloto) SDRB I	(Caicedo <i>et al.</i> , 2015)
27	Spatial distribution of pharmaceuticals in conventional wastewater treatment plant with Sludge Treatment Reed Beds technology	(Kolecka <i>et al.</i> , 2019)
28	Sludge reed bed facilities: operation and problems	(Nielsen, 2005a)
29	Potentials of vertical flow constructed wetlands for	(Koottatep <i>et</i>

CONVENCIÓN	NOMBRE DE LA PUBLICACIÓN	REFERENCIA
	septage treatment in tropical regions.	<i>al.</i> , 2001)
30	Sludge dewatering and stabilization in drying reed beds: Characterization of three full-scale systems in Catalonia, Spain	(Uggetti <i>et al.</i> , 2009)
31	Dewatering of primary settled urban sludge in a vertical flow wetland.	(Melidis <i>et al.</i> , 2010)
32	Treatment of septage in sludge drying reed beds: a case study on pilot-scale beds.	(Troesch <i>et al.</i> , 2009)
33	Sludge drying reed beds: full- and pilot-scale study for activated sludge treatment.	(Troesch <i>et al.</i> , 2009)
34	Helsingør sludge reed bed system: reduction of pathogenic microorganisms.	(Nielsen, 2007)

ANEXO No 2. Tipos de lodo, tratamientos convencionales y disposición final de lodos

Tabla 1

Tipos de lodo generado en plantas de tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2014)

TIPO DE LODO	DESCRIPCIÓN GENERAL
<i>Lodo primario</i>	Generado por los tanques de sedimentación primario, es generalmente gris y viscoso.
<i>Lodo de la precipitación química</i>	Contiene sales metálicas, es de color oscuro, su superficie puede ser roja en presencia de grandes cantidades de hierro, el lodo de cal es de color marrón-grisáceo, el lodo químico es menos viscoso y gelatinoso debido al hidrato de hierro y aluminio que contiene, si el lodo se deja en el tanque se descompone de manera similar al lodo primario.
<i>Lodo secundario</i>	Procedente del lodo activado generalmente tiene una apariencia floculante, es de color marrón, este lodo es bien digerido en condiciones anaeróbicas.
<i>Lodos de digestión aeróbica</i>	Son de color marrón a marrón oscuro y tiene una apariencia floculante, el olor de este lodo es inofensivo debido a una buena digestión aeróbica y son deshidratados fácilmente en lechos de secado.
<i>Lodos de digestión anaeróbica</i>	Son de color marrón oscuro a negro y contienen una cantidad de biosólidos lentamente digeribles, en cantidades excepcionalmente grandes, no presenta olores ofensivos.

Tabla 2

Tratamientos convencionales para el tratamiento de lodo (Von Sperling, 2005).

PROCESO	DESCRIPCIÓN GENERAL
<i>Espesamiento</i>	Reduce el contenido de agua y volumen.
<i>Estabilización</i>	Elimina materia orgánica, sólidos volátiles.
<i>Acondicionamiento</i>	Proceso, basado en la adición de productos químicos para aumentar su capacidad de deshidratación y mejorar la captura de sólidos en los sistemas de deshidratación de lodos.
<i>Deshidratación</i>	Proceso cuyo objetivo es eliminar el agua y reducir aún más el volumen, produciendo un lodo con un comportamiento mecánico cercano a los sólidos.
<i>Desinfección</i>	Es necesaria si su destino es el reciclaje agrícola, ya que los procesos de digestión anaeróbica o aeróbica generalmente empleados no reducen el contenido de patógenos a niveles aceptables, la desinfección no es necesaria si el lodo se va a incinerar o eliminar en vertederos y por último su disposición final.

➤ **Tratamiento y disposición de lodos a nivel local:**

Tabla 3

Características del tratamiento y disposición de lodos en el departamento de Cundinamarca (Elaboración propia).

PTAR	HABITANTES	TRATAMIENTO DE LODO	DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO
Rosal (Municipal)	32.000	Los lodos que no se recirculan, pasan a los lechos de secado, los cuales posteriormente son removidos hacia su sitio de disposición final (Ortiz et al., 2012).	Son dispuestos en la parte posterior de la planta de tratamiento, a orillas de la quebrada El Rosal (Ortiz et al., 2012).
Calera (Municipal)	11.849	Los lodos digeridos son transportados por medio de bombas a los lechos de secado, donde se realiza la filtración de los lixiviados y el secado de los lodos, consta con 16 lechos de secado (Poveda, 2016).	Disposición sobre la flora interna del predio de la planta (Poveda, 2016).

PTAR	HABITANTES	TRATAMIENTO DE LODO	DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO
Bojacá (Municipal)	12.000	Los lodos producidos en el sedimentador secundario y depositados en la parte inferior son conducidos por una tubería de 8 pulgadas, hacia un pozo de bombeo en el cual se ubica la bomba de lodos, en donde después son conducidos a los lechos de secado (Lee et al., 2012).	No se indica la técnica de disposición final.
Funza (Municipal)	75.350	Los lodos son transportados a un hidrociclón donde se les adiciona un polímero para iniciar el proceso de secado, después es llevado al lecho de secado y luego de esto son transportados a su disposición final (Vásquez et al 2018).	Disposición final en relleno sanitario, pero pueden ser utilizados en la agricultura, en plantaciones forestales, como insumo para elaboración de abonos, reparación y mejoramiento de suelos degradados, y cobertura en rellenos sanitarios (Vásquez et al 2018).
Guasca (Municipal)	12.763	Utilización de lechos de secado para lodos provenientes del reactor UAS (Bermúdez Grisales, J. A., & Carrillo Loaiza, J. E., 2019).	No se indica la técnica de disposición final.
El Salitre (Bogotá)	2'700.000	Digestión anaeróbica mediante tres tanques de digestión anaeróbica con un volumen nominal de 8.500 m ³ cada uno. (Hazen and Sawyer & Nippon KOEI, 2011).	Actualmente la torta de lodos es finalmente enviada al relleno El Corzo. (Hazen and Sawyer & Nippon KOEI, 2011).
Madrid (Municipal)	64.094	Se realiza un proceso de escurrido y centrifugado para volverlos más espesos y reducir su humedad (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Madrid, 2019).	Compostaje u otros (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Madrid, 2019).
Chía (Municipal)	138.822	No se cuenta con un sistema para extracción y estabilización de lodos residuales de proceso (Benito, 2020).	Son enterrados en Trinchos abiertos ubicados en predio en donde se encuentra la PTAR (Benito, 2020).
Tocancipá (Municipal)	23.981	Dispone de lagunas de secado rectangulares (Perez & Quinayás, 2016)	No indica
Gachancipá (Municipal)	10.886	La planta tiene un tratamiento por lodos activados que en este momento no se encuentra en funcionamiento. Sin embargo,	No indica

PTAR	HABITANTES	TRATAMIENTO DE LODO	DISPOSICIÓN FINAL DEL LODO
		Dispone de lechos de secado rectangulares (Amezquita & Bejarano, 2018)	
Facatativá (Municipal)	15.000	Los lodos son tratados mediante espesamiento en un tanque espesador de flujo ascendente y deshidratados en lechos de secado (Morales & Rodríguez, 2017).	Son llevados al sitio de disposición final (Morales & Rodríguez, 2017).
Guatavita (Municipal)	6.898	Se cuenta con cuatro lechos de secado (Ruiz & Quevedo, 2017).	Disposición final en relleno sanitario (Ruiz & Quevedo, 2017).
Granada (Municipal)	2.039	Los lodos que se generan en los diferentes procesos de la PTAR se tratan en un lecho de secado. El área existente de lechos es de solo 40 m ² (Sosa, 2018).	Se disponen en un lugar para recuperación de cobertura vegetal sin ocasionar ningún inconveniente por su composición (Sosa, 2018).
La mesa (Municipal)	30.930	La deshidratación de los lodos provenientes desde el tratamiento biológico se realiza mediante un filtro de banda de tracción hidráulica y con un sistema de dosificación del polielectrolito utilizado para la línea de deshidratación (Camacho, 2019).	Son transportados al relleno sanitario de Mondoñedo (Camacho, 2019).
Ubaté (Municipal)	18.000	Lechos de secado: Existe una batería compuesta por cuatro unidades de secado individual. El proceso que se lleva a cabo básicamente consiste en deshidratación de lodos (90% agua aproximadamente) (EMSERVILLA S.A. E.S.P, 2017).	Dentro del lote de la planta se encogió el sitio para la disposición final de los residuos provenientes de las diferentes labores realizadas en la planta. Para esta disposición se excavo un hueco o trinchera (EMSERVILLA S.A. E.S.P, 2017).

ANEXO No 3. Diseño humedal para el tratamiento de lodo

Este anexo se encuentra en hoja de cálculo que acompaña al documento.

ANEXO No 4. Hoja de cálculo de lodos activados del humedal para el tratamiento de lodo

Este anexo se encuentra en hoja de cálculo que acompaña al documento.

ANEXO No 5. Bibliografía

Este anexo se encuentra en hoja de cálculo que acompaña al documento.

ANEXO No 6. Planos del diseño del caso de estudio

Este anexo se encuentra en formato pdf que acompaña al documento.