Revista RENPYS "Recursos Naturales Producción y Sostenibilidad"
ISSN 2953-6561

https://doi.org/10.61236/renpys.v3i1.627

Publicación Semestral. Vol. 3, No. 1, enero-junio 2024, Ecuador (p. 42-56). Edición continua

Análisis del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales del campus Salache usando dinámica computacional de fluidos

José Luis Ágreda Oña[1], David Santiago Carrera Molina[1], Ámbar Pamela Oña Chuquimarca[1], Patricia Priscila Maldonado Campaña[2]

[1] Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de CAREN, Ingeniería Ambiental, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

[2] Universidad Técnica de Cotopaxi, Facultad de CIYA, Ingeniería Ambiental, Latacunga, Cotopaxi, Ecuador.

***Dirección para correspondencia:** jose.agreda2101@utc.edu.ec

Fecha de Recepción: 29/11/2023 Fecha de Aceptación: 15/01/2024 Fecha de Publicación: 26/01/2024

Resumen

En la actualidad el tratamiento de aguas residuales es importante en la salud pública, y como un gran fortín es la experimentación a nivel de laboratorio enfocado a las características hidráulicas aplicadas a las operaciones unitarias de la remediación hídrica. La investigación estuvo dirigida a la simulación dinámica computacional del sistema depurador de aguas residuales domésticas del CAMPUS Salache, analizando el diseño de remoción de contaminantes como DQO y sólidos sedimentables, a través de la ecuación de Navier Stokes y la MO de las depuradoras hídricas son muy útiles para el análisis de matriz ASM1 en la aplicación de biocinética en el funcionamiento de la línea de trabajo del sistema. Las pruebas pilot del desempeño en la baja de los contaminantes; actualmente se está llevando estás pruebas por el lado de la simulación computacional, como beneficio para la investigación es una amalgama extensa de variables y pruebas que permiten optimizar las líneas de tratamiento. El método utilizado fue generar una malla de alta definición para la simulación de un tanque homogeneizador y ecualizador con un volumen de 29.81 m^3, un sedimentador con un volumen de 12.8 m^3, un reactor secundario de 4 m de altura con una eficiencia de remoción del 99% de materia orgánica y un tanque de mezclado con un volumen de 0.4 m^3 para la cloración, a través del análisis de la ecuación de Navier Stokes para fluidos Newtonianos. Los resultados revelaron un correcto flujo de transición de 0.4 m/s de velocidad de paso en la parte baja de los deflectores del sedimentador generando un régimen de flujo laminar que cumple las condiciones idóneas para la precipitación de los sólidos sedimentables. Las mejoras en el tanque de cloración, en los sedimentadores y filtro percolador permitieron aprovechar el principio Venturi para la mezcla rápida del desinfectante en el clorador.

Palabras claves: Depuradora Anaeróbica, Aguas Residuales, Dinámica Computacional de Fluidos, Flujo Laminar, Tratamientos Convencionales de agua

Analysis of the design of a wastewater treatment plant at campus salache using computational fluid dynamics

Abstract

Currently, wastewater treatment is crucial for public health, and laboratory experimentation focused on hydraulic characteristics applied to unit operations of water remediation plays a vital role. This research aimed to

IDs Orcid:
José Luis Agreda Oña: http://orcid.org/0009-0005-5858-869X
David Santiago Carrera Molina: http://orcid.org/0000-0002-4808-7358
Ámbar Pamela Oña Chuquimarca: http://orcid.org/0009-0002-1355-0223
Patricia Priscila Maldonado Campaña: http://orcid.org/0009-0008-3053-3648

Artículo científico: Análisis del diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales del campus Salache usando dinámica computacional de fluidos.

computationally simulate the domestic wastewater treatment system at the Salache CAMPUS, analyzing the design for the removal of contaminants such as COD and settleable solids, using the Navier Stokes equation and the ASM1 matrix for biokinetic application in the system's operation. Pilot tests of water treatment plants are highly useful for performance analysis in contaminant reduction; these tests are being conducted through computational simulation, offering an extensive array of variables and tests to optimize treatment lines. The method involved generating a high-definition mesh for simulating a homogenizer and equalizer tank with a volume of 29.81 m^3, a sedimentation tank with a volume of 12.8 m^3, a secondary reactor of 4 m in height with 99% organic matter removal efficiency, and a mixing tank with a volume of 0.4 m3 for chlorination, through the analysis of the Navier Stokes equation for Newtonian fluids. Results revealed a correct transition flow of 0.4 m/s passage velocity at the lower part of the sedimentation tank baffles, generating a laminar flow regime that meets the ideal conditions for settleable solids precipitation. Improvements in the chlorination tank, sedimentation tanks, and percolating filter allowed for the utilization of the Venturi principle for rapid mixing of the disinfectant in the chlorinator.

Keywords: Anaerobic Wastewater Treatment Plant, Wastewater, Computational Fluid Dynamics, Laminar Flow, Conventional Water Treatments

1. INTRODUCCIÓN

Las descargas directas de aguas residuales domésticas sin tratamiento previo pueden generar un grave impacto ambiental en los cuerpos de agua. Según La Agencia Europea de Medio Ambiente (2023), se menciona que estas descargas tienen un fuerte componente de contaminación al medio hídrico superficial en el mundo. Según el informe de 2020 sobre el agua y el cambio climático publicado por la UNESCO, más de 2.200 millones de personas no tienen actualmente acceso al recurso hídrico, mientras que otros 4.200 millones de personas carecen por completo de sistemas adecuados de saneamiento del mismo (UNESCO, 2020).

Las aguas producto de las actividades económicas tienen una gran cantidad de constituyentes físicos, químicos y biológicos que hacen imposible un uso adecuado del recurso; como patógenos, nutrientes, metales pesados y productos químicos, que pueden afectar negativamente la salud de los ecosistemas y, en última instancia, la salud humana (Organización Mundial de la Salud, 2022; Jiménez, 2021). Por lo tanto, resulta fundamental adoptar medidas para prevenir y controlar las descargas directas de aguas residuales domésticas o aguas servidas, a través de la implementación de sistemas de tratamientos adecuados y la fomentación de enfoques sostenibles para administrar los recursos hídricos (Paucar et al., 2022).

La disposición de aguas residuales sin el tratamiento adecuado o las condiciones adecuadas de diseño genera problemas en la calidad ambiental de los cuerpos hídricos, generando inconvenientes con el ecosistema (García et al., 2021); además, se plantea que las descargas directas de aguas residuales domésticas es un problema ambiental de gran impacto en todo el mundo (Pérez et al., 2019). Según la OMS y UNICEF (2022), cerca de dos millones de personas mueren cada año debido a enfermedades relacionadas con el agua contaminada. En este sentido, resulta vital tomar medidas para prevenir la descarga directa de aguas residuales, siendo prioridad la implementación de proyectos de saneamiento y alcantarillado, ya que la importancia recae en el nivel del contexto de la colectividad que se ve beneficiada por los servicios ecosistémicos de los recursos disponibles (Herrera et al., 2019).

El tratamiento de las aguas residuales urbanas es un problema no resuelto (Pérez et al., 2022). Algunos países del mundo, no implementan procedimientos de gestión adecuados en sus sistemas de aguas residuales para reducir la contaminación de fuentes acuíferas alternativas como el agua de lluvia y utilizan este recurso como medida de sostenibilidad para las redes de distribución (Calle, 2023).

Hay muchas formas de reducir la contaminación, una de ellas es tratar la demanda química de oxígeno (DQO) ya que es indispensable como insumo inicial en la biocinética para la oxidación orgánica (Álvarez, 2019). En algunos casos, se requiere un tratamiento previo para retener los residuos sólidos urbanos. Sin embargo, en procesos a mayor escala se realizará 5 etapas: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario, tratamiento terciario y la desinfección (Diaz et al., 2023). Se estima que cada etapa debe mantener un diseño único y propio por cada característica del proceso a realizar para mantener la eficiencia de la planta (ECODES, 2021; CENTA, 2021).

Según Mancilla (2021) en su trabajo investigativo menciona que la dinámica de fluidos computacional ha sido utilizada como una herramienta prometedora para mejorar los perfiles de oxígeno disuelto y desempeño (Lobatón et al., 2020). De este modo, el software SALOME da apertura y capacidad a la resolución de problemas como: resistencia, cálculos de filtración, problemas de conducción de calor en un sólido, problemas asociados con la deformación de la red computacional, distribución de temperaturas, tensiones

mecánicas, termoelasticidad, porosidad en el objeto simulado (Pakhnenko, 2022; Zhao et al., 2024).

El OpenFOAM es un software libre y de código abierto con gran reputación en CFD (Bo et al., 2024). Es ampliamente utilizado en varias áreas de ingeniería y ciencias para simular flujos tan complejos como aquellos que involucran reacciones químicas, turbulencia, transferencia de calor, fenómenos acústicos, de mecánica de sólidos y electromagnéticos. OpenFOAM está disponible para sistemas operativos como Mac, Windows y Linux, su descarga e instrucciones de instalación son de libre acceso (Aguirre et al., 2022).

Por lo que la presente investigación tuvo como objetivo diseñar, simular, y evaluar los diseños de los equipos de tratamiento de aguas residuales domésticas a través de la simulación computacional de fluidos dinámica (CFD) en función de mejorar el desempeño en la remoción de materia orgánica.

2. METODOLOGÍA

2.1 Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó en la planta de tratamiento de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales perteneciente a la Universidad Técnica de Cotopaxi - Campus Salache. El lugar de estudio se encuentra ubicada debajo de la casa hacienda y a lado de las plantaciones del invernadero del campus.

Figura 1. Área de estudio, tanque anaeróbico CEYPSA

2.2 Técnicas físicas y químicas para la recolección de datos

Para el presente estudio se emplearon diversas técnicas como observación en campo, recolección de muestras, análisis en laboratorio, cálculo de DQO, medición de caudales instantáneos en las cajas de revisión y la elaboración de un diseño utilizando los Softwares Salome, OpenFoam y ParaView Además, se llevó a cabo un análisis de datos mediante la experimentación en el laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi, lo que permitió realizar las medidas necesarias para diseñar los tanques que comprenden la planta de tratamiento y verificar su correcto funcionamiento. El cálculo del caudal medio se realizó a partir del volumen total producido durante el día, representado por el área debajo de la curva de caudal vs tiempo (Figura 2) obtenida mediante la metodología CAHN (Caudales Adaptados al Hidrograma Natural), que se fundamenta en la evaluación de tres aspectos: hidrológico, hidráulico y biótico. Este método se utiliza para determinar caudales ecológicos, y se adapta al volumen que pasa por un punto de aforo durante 10 horas de monitoreo (García., 2003).

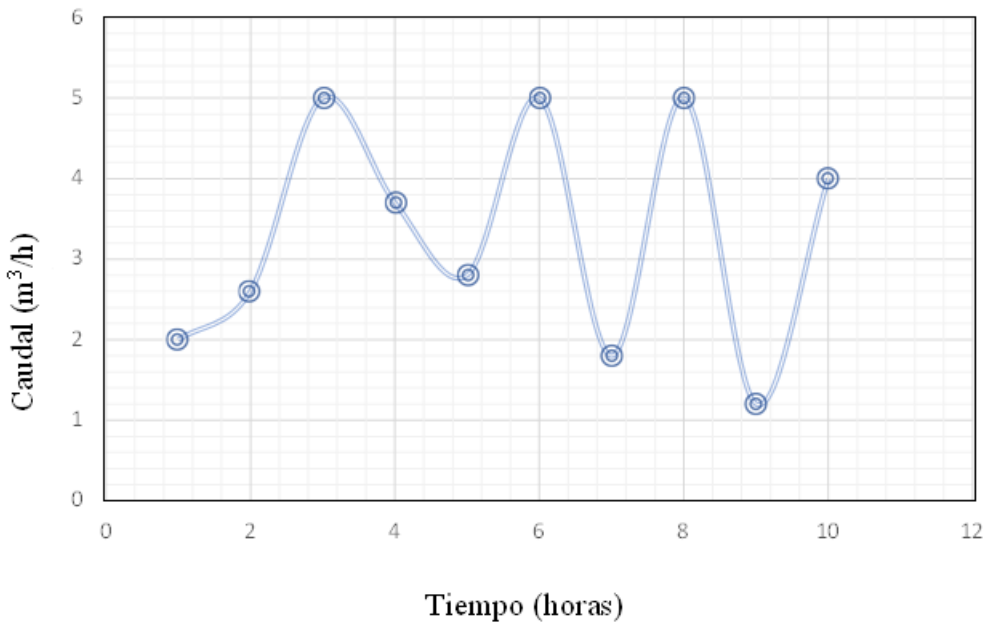

Figura 2. Volumen representado por el área bajo la curva.

2.3 Procedimiento de la fase de laboratorio

Se recolectaron 25 muestras en intervalos de una hora durante tres días siguiendo el protocolo de muestreo basado en Standard Methods (2018), de este modo, se realizó el análisis de DQO, el cual indica el uso de reactivos estandarizados como soluciones patrones, entre ellos tenemos: ácido sulfúrico, sulfato de mercurio (II), dicromato de potasio, sulfato de plata y las muestras almacenadas en viales (Alcívar et al., 2023).

Se procedió a colocar los viales preparados en el termoreactor para ejercer la digestión ácida de la muestra y proceder a dar lectura del parámetro de DQO, metodología adaptada de HANNA Instruments para el año 2021. A su vez se tuvo una repetitividad de observación de cuatro semanas con el fin de descartar datos atípicos adaptados de lo establecido (Leneydi., 2019).

2.4 Metodología para el diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales

La metodología del diseño se basó fundamentalmente en operaciones unitarias físicas y biológicas que requirieron información tomada producto de la observación directa establecida en un plan de monitoreo que abarcó horarios de alto consumo de agua, teniendo en cuenta que, el dimensionamiento se divide en tratamiento primario y secundario con su respectiva fase de desinfección (Alférez Rivas & Nieves Pimiento, 2019).

2.4.1 Tanque ecualizador

El depósito ecualizador controla las cargas de volumen mediante un conjunto de trampas de grasa que actúan como sedimentadores primarios para la eliminación de sólidos, en su mayoría suspendidos (Rueda et al., 2019). La configuración del depósito ecualizador se llevó a cabo siguiendo la metodología definida en la Norma CO. 10.7 602 que rige para el territorio ecuatoriano en los sectores rurales:

$$Qp = Qm \times 1.25 \quad (1)$$

donde:

Qp: Caudal punta ($\frac{m^3}{s}$)

Qm: Caudal medio ($\frac{m^3}{s}$)

Para el cálculo del volumen del tanque ecualizador en forma rectangular (m³), se emplearon los datos de caudal máximo y el tiempo en días. Las fórmulas de diseño se adaptaron de la revisión al autor Lozano Rivas en su obra del 2019; de este modo, una vez obtenido el volumen del tanque ecualizador, se multiplicó por un factor de seguridad de 1.25, y luego se utilizó para calcular su área superficial mediante la fórmula:

$$V_{tanque} = Qp \times t \quad (2)$$

$$As = \frac{V_{tanque}}{h} \quad (3)$$

En este contexto: *As:* Superficie *(m²), h:* Dimensión vertical *(m)*

En la formulación de esta ecuación, se consideró una dimensión vertical de aproximadamente 3 metros, conforme a la normativa que especifica que la profundidad puede variar. Seguidamente se calculó el ancho y el largo del tanque ecualizador empleando ecuaciones de diseño y criterios que establecen un ancho de 2,5 metros, basado en el dimensionamiento observado por varios autores entre ellos (Lozano, 2012).

$$As = B \times L \quad (4)$$

$$L = \frac{As}{B} \quad (5)$$

donde:

B: Ancho (m)

L: Largo (m)

2.4.2 Sedimentador primario

Para el dimensionamiento del sedimentador primario se calculó a través de la aplicación del principio de STOKES que generaliza la fuerza de arrastre y flotación en una partícula que desciende en un fluido (Changoluisa, 2023).

Velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{g \times \emptyset_{particula}{}^2 \times (\rho_{sol} - \rho_{fluido})}{18 \times \mu_{fluido}} \quad (6)$$

donde:

V_s: Velocidad de sedimentación $(\frac{m}{s})$
g: gravedad $(\frac{m}{s^2})$
$\emptyset_{particula}$: Diámetro de la partícula $(1 \times 10^{-3} m)$
ρ_{sol}: Densidad del sólido $\left(2500 \frac{kg}{m3}\right)$
ρ_{fluido}: Densidad del fluido, agua $(1000 \frac{kg}{m^3})$
μ_{fluido}: viscosidad, agua a 4°C $(1 \times 10^{-3} \frac{kg}{m*s})$

Volumen del Tanque sedimentador primario:

$$V_{TS} = Q_p \times TRH \quad (7)$$

donde:

V_{TS}: Volumen del depósito de sedimentación primaria (m^3)

TRH: Tiempo de retención hidráulico$(10\ horas)$

Área superficial:

$$As = \frac{V_{TS}}{h} \quad (8)$$

donde:

As: Área superficial (m^2)

h: Altura (m), se seleccionó una altura de 3 metros conforme a las regulaciones.

Anchura del depósito de sedimentación primaria

$$B = \frac{As}{L} \quad (9)$$

$$\frac{L}{B} = 3\ a\ 5 \quad (10)$$

La longitud máxima de estos clarificadores es de alrededor de 30 metros, siempre y cuando se conserve la proporción entre la longitud y el ancho en un rango de 3 a 5 (Vallejos, 2020). Por lo tanto, se tomó en cuenta una longitud de 4 metros.

Carga hidráulica:

$$q = \frac{Qp}{As} \quad (11)$$

donde:

q: Carga hidráulica $(\frac{m}{h})$

Velocidad Horizontal:

$$Vh = \frac{Qp}{B \times h} \quad (12)$$

donde:

Vh: Velocidad horizontal $(\frac{m}{h})$

Velocidad horizontal máxima:

$$Vh_{max} = 20 \times V_s \quad (13)$$

donde:

Vh_{max}: Velocidad horizontal máxima $(\frac{m}{s})$

En donde la Vh_{max} debe ser mayor que la Vh, condición necesaria para poder garantizar el asentamiento de las partículas suspendidas en el agua residual.

$$Vh_{max} > Vh \quad (14)$$

2.4.3 Filtro Percolador

Un filtro percolador es una superficie, ya sea de grava, roca o un material plástico, en la que se rocían las aguas

residuales previamente tratadas (Laura et al., 2023), generando oxidación biológica a través de biopelículas en el material de soporte. En este sistema, los microorganismos se adhieren al material del filtro y forman una capa biológica sobre él. A medida que las aguas residuales se filtran a través del material, los microorganismos digieren y eliminan los contaminantes presentes en el agua (Lesikar et al., 2002). Para el levantamiento de la data requerida y el dimensionamiento del reactor biológico se tomó la metodología expresada en la obra de David Hendricks que establece la teoría fundamental de los procesos unitarios biológicos para la oxidación de materia orgánica (Hendricks, 2011).

Carga másica:

$$Cm = Q_p \times C_{contaminante} \quad (15)$$

donde:

Cm: carga másica $\left(\frac{kg}{día}\right)$
Q_p: Caudal punta $(\frac{m^3}{día})$
$C_{contaminante}$: Carga contaminante del DQO $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

Para obtener el valor del contaminante aportado por el sistema se promedió los datos de laboratorio y procedió a determinar del DQO de las muestras y la carga orgánica; lo cual, se ha estimado en 1,8 $\frac{Kg}{m^3 * día}$ según (Lozano, 2012).

Volumen de soporte del filtro percolador:

$$V_{soporte} = \frac{Cm}{C_{orgánica}} \quad (16)$$

donde:

$V_{soporte}$: Volumen de soporte (m^3)

$C_{orgánica}$: Carga orgánica de trabajo $(\frac{Kg}{m^3 * día})$

Área superficial:

$$As = \frac{V_{soporte}}{h} \quad (17)$$

Radio del filtro percolador:

$$As = \pi r^2 \quad (18)$$

despejando,

$$r = \sqrt{\frac{As}{\pi}} \quad (19)$$

donde:

r: radio del filtro percolador (m)

As: Área superficial (m^2)

π: Valor de pi

Carga hidráulica: $q = \frac{Q_p}{As}$ (20)

DQO del efluente:

$$S = S_o \times e^{\frac{-k*h}{q^n}} \quad (21)$$

donde:

S: DQO del efluente, salida $(\frac{mg}{l})$

S_o: DQO del afluente, entrada $(\frac{mg}{l})$

e: Valor de Euler

k: Constante de tratabilidad $((m * d)^{-0.5})$

n: Constante del material (0.5)

La constante de tratabilidad de aguas residuales domésticas, se empleó un determinado valor 2.21 $(m * d)^{-0.5}$(Hendricks, 2011), además se considera un valor de DQO del efluente teniendo en cuenta la recirculación, seguí la siguiente ecuación:

$$S_r = \frac{S_o + (R \times S)}{1 + R} \times e^{\frac{-k*h}{q^n}} \quad (22)$$

donde:

S_r: DQO del efluente con recirculación $(\frac{mg}{l})$
R: valor de recirculación

Para el filtro percolador es utilizó un valor de 50% por concepto de recirculación desde el sedimentador secundario hacia el filtro percolador, adicional se considera la eficiencia del tratamiento según la siguiente expresión:

Eficiencia:

$$E = (1 - \frac{S_r}{s}) \times 100 \quad (23)$$

donde:

E: Eficiencia (%)

Siendo así, la eficiencia un dato esencial para establecer la medida de remoción de materia orgánica del sistema de tratamiento.

2.4.4 Sedimentador Secundario

Para el sedimentador secundario, se calculó parámetros de velocidad de sedimentación y el volumen del tanque sedimentador primario utilizando un THR de 3 horas. Además, se tomó en cuenta la proporción entre la

longitud y el ancho establecido del depósito de sedimentación. Adicional, se instauró un criterio de funcionamiento de los parámetros de velocidad horizontal y horizontal máxima.

2.4.5 Tanque - Cloración

En función de dimensionar el tanque clorador y gestionar el proceso de oxidación de patógenos, se adaptó las metodologías de David Hendricks y Lozano Rivas.

Volumen:

$$V = Q_p \times TRH \quad (24)$$

V: Volumen del tanque (m^3)

TRH: Tiempo de retención hidráulico, 1 hora (h)

2.5 Simulación de la Planta de tratamiento de aguas residuales domésticas

Para la simulación de la biocinética del filtro percolador, se aplicó el modelo matemático ASM1 para proyectar el desempeño biocinético del biorreactor en el comportamiento de los microorganismos y su relación con los diferentes procesos que degradan la materia orgánica, utilizando valores estequiométricos y cinéticos para procesos anaeróbicos y aeróbicos (Burger et al., 2023). Dicha proyección consideró la tasa específica de crecimiento, fracción de muerte y consumo de sustrato de bacterias autótrofas y heterótrofas con su incidencia en la temperatura y la concentración de oxígeno disuelto en el birreactor del proceso de tratamiento secundario. Además, el modelo ASM1 utiliza ecuaciones diferenciales de primer orden para representar la dinámica de la oxidación de la materia orgánica mediante diversos microorganismos en el reactor de lodos activados, resultando la siguiente expresión:

- DQO fácilmente biodegradable:

$$(\mathrm{Ss}).\left(\frac{d}{dt}SS(t)\right) = 5820 - SS(t) + \left[K_h \cdot \frac{\frac{Xs}{Xbh}}{K_x+\frac{Xs}{Xbh}} \cdot \left[\frac{So}{K_{oh}+So} + ny_h \cdot \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh}+So}\right) \cdot \left(\frac{Sno}{K_{oh}+Sno}\right)\right] - \left[mu_h \cdot \left(\frac{SS(t)}{K_s+SS(t)}\right) \cdot \left(\frac{So}{K_{oh}+So}\right) + mu_h \cdot \left(\frac{SS(t)}{K_s+SS(t)}\right) \cdot \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh}+So}\right) \cdot \left(\frac{Sno}{K_{oh}+Sno}\right) \cdot ny_g\right] \cdot \frac{1}{Y_h}\right] \cdot Xbh \cdot SS(t)$$

- DQO lentamente biodegradable (Xs):

$$\left(\frac{d}{dt}XS(t)\right) = 5820 - XS(t) + \left[\left(1 - f_p\right) \cdot (b_h \cdot Xbh + b_a \cdot Xba) - K_h \left(\frac{\frac{XS(t)}{Xbh}}{K_x + \frac{XS(t)}{Xbh}}\right) \cdot \left[\frac{So}{K_{oh} + So} + ny_h \cdot \left(\frac{K_{oh}}{K_{oh} + So}\right) \cdot \left(\frac{Sno}{K_{oh} + Sno}\right)\right] \cdot Xbh\right] XS(t)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con la visualización del área de estudio se determinó el espacio más cercano a las canchas sintéticas del campus como sitio factible para implementar el PTAR, ya que cumple con los aspectos necesarios para la ejecución del mismo.

3.1. Capacidad total diaria del caudal

Para la mejora del levantamiento del caudal medio, se estableció un punto de aforo en una de las cajas de revisión, monitoreando 13 horas seguidas el efluente del campus. Se obtuvieron como resultados valores correspondientes al caudal oscilante entre 0,16 y 0,39 (l/s), manteniendo una variación de tiempo entre los 2 a 6 segundos. Como caudal final promedio se registró un valor de 0,28 l/s (1,03 m^3/h), además este método mejora sustancialmente la precisión del resultado obtenido en función del caudal con respecto al tiempo garantizando que el área bajo la curva sea el volumen acumulado diario que se divide para el tiempo de observación (Mayoración et al., 2023).

Según (Rodríguez et al., 2010) en las cuencas urbanizadas, los problemas ambientales se intensifican debido a la influencia de las actividades humanas y la utilización de los recursos locales, tomando en cuenta este planteamiento los resultados obtenidos del registro de caudal permiten entender el comportamiento del flujo de agua en el campus de la facultad.

3.2. Niveles de DQO

Mediante las pruebas de DQO se obtuvo valores oscilantes entre 5 y 10 [620 nm (g/l O_2)], teniendo un valor promedio de las 25 muestras de 5.82 mg/L. Cabe recalcar que las muestras mantienen un rango horario

que va de 8h00 hasta 17h00. Los resultados obtenidos a partir de la experimentación indican que las muestras 22, 14 y 23 presentan un nivel más elevado de DQO, con valores de 10.3 g/m^3, 9.8 g/m^3 y 8.4 g/m^3, respectivamente. Estos valores revelan que durante el horario de 9 a 11 a.m. Existe un mayor nivel de contaminación en el ambiente.

De tal modo que, en la figura 3 se puede observar una clara tendencia al aumento en el nivel de DQO en dicho horario (Sánchez et al., 2023).

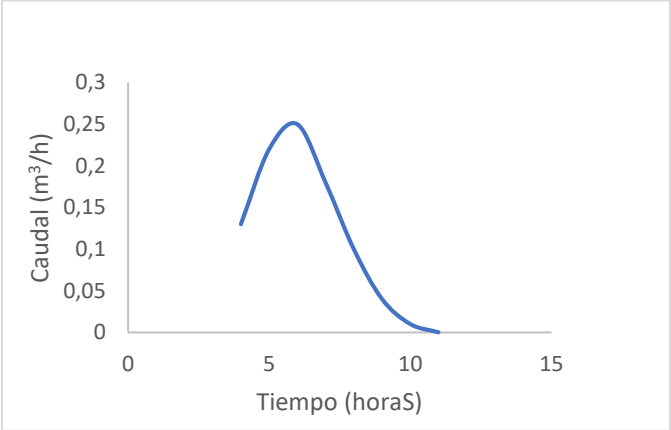

Figura 3. Campana de gauss de niveles de DQO.

3.3. Diseño de la Planta de Tratamientos de Aguas Residuales

3.3.1. Línea de Tratamiento

La línea de tratamiento utilizada para establecer los métodos depuradores adecuado del sistema analizado de aguas residuales domésticas; parte desde el tanque ecualizador, sedimentador primario, tanques anaerobios y finaliza en el tanque de cloración o la cámara de contacto.

3.3.2. Tanque ecualizador

Se calcularon las dimensiones apropiadas para un caudal promedio de 1.02 m^3/h, un caudal máximo de 1.28 m^3/h, un volumen de 24.42 m^3 y un factor de seguridad (en términos de volumen) de 29.81 m^3, utilizando las ecuaciones presentadas en el estudio. Estos resultados se dimensionaron y se simularon generando los siguientes gráficos:

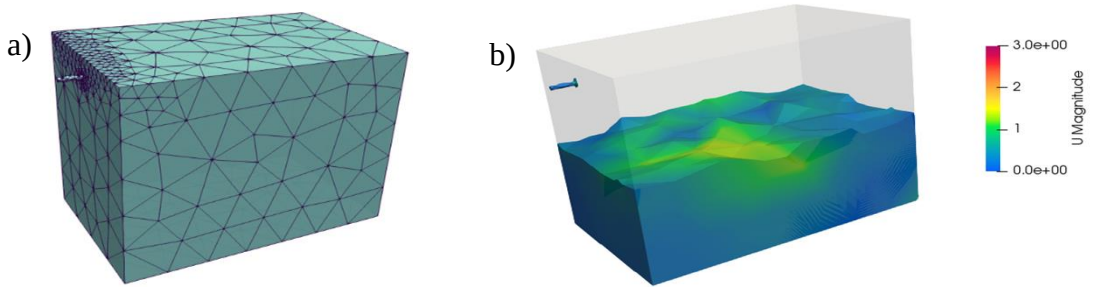

Figura 4. a) Malla del tanque ecualizador y b) Simulación del tanque ecualizador.

De tal modo que, en la figura 4a se muestra la malla de simulación generada a partir de los datos obtenidos con las ecuaciones, y en la figura 4b, se presenta la simulación donde se muestra la escala de velocidad en el tanque entre 0.01 m/s hasta 1.2 m/s, proyectando un correcto funcionamiento y garantizando un flujo laminar que avala la separación de arenas de 2.5 mm de diámetro y pequeños porcentajes de materia orgánica por arrastre, esto potencia la eficacia de la remoción de los sólidos suspendidos en el agua residual (Herrera et al., 2024).

3.3.3. Sedimentador

Se determinaron las dimensiones del tanque sedimentador para las siguientes condiciones: caudal máximo de 1.28 m^3/h, velocidad de sedimentación de 0.82 m/s, diámetro de partícula de 0.001 m, densidades del líquido y sólido de 1000 y 2500 kg/m^3 respectivamente, viscosidad de 0.001 kg/m*s y un volumen del tanque de sedimentación de 12.8 m^3. Las dimensiones encontradas son las siguientes: 10 h en TRH, 4 m^2 en Área Superficial, 3m de altura, 1 m de

Ancho, 4 m de Largo, con un valor de 0.3 m/h en la Carga Hidráulica, 0,0001m/s en Velocidad Horizontal y 16.33 m/s en Velocidad Horizontal Máxima.

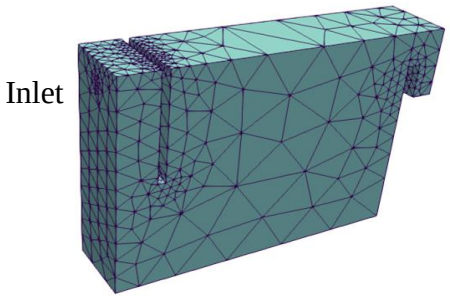

Figura 5. Malla del tanque sedimentador primario

Se muestra en la figura 5, la malla de simulación con mayor resolución de polígonos para tener precisión en los resultados de la entrada de caudal, como resultado de la simulación en el área baja del deflector de velocidad existe una zona de 0.4 m/s de velocidad generando una turbulencia que impedirá que los sedimentos colmaten la entrada de agua; además, se puede observar que en la decantación del tanque, la velocidad que predomina es de 0,2 m/s, permitiendo una correcta sedimentación de los sólidos suspendidos; estos efectos se lograron obtener al modificar el punto de entrada del afluente a 2.8m de altura respecto a la horizontal en la simulación (Medina, 2019; Su et al., 2019).

3.3.4. Simulación de biocinética de Filtro percolador

Se establecieron las dimensiones del filtro de percolador tomando en cuenta una carga másica de 178.79 kg/día, un caudal máximo de 1.28 m^3/h y una carga contaminante de 5.82 kg/m^3. Los resultados de este análisis se presentan de la siguiente manera, 98.15 m^3 en Volumen de soporte, 1.8 (Kg/m*día) como Carga Orgánica de Trabajo, 19.63 m^2 en Área Superficial, 2.5 m en Radio, 5 m de Altura, 1.55 m/día en Carga Hidráulica, 5820 g/m^3 en DQO del Afluente, 0.81 g/m^3 en DQO del Efluente, en Constante de tratabilidad 2.21 [$(m*día)^{-0.5}$], Constante del material con un valor de 0.5, en DQO del Efluente (recirculación) se obtuvo 0.54 g/m^3 , Valor de recirculación 0.5 y en eficiencia se encontró un 99.90%. Estos resultados destacan la capacidad del sistema para degradar eficientemente los contaminantes presentes en las aguas residuales y proporcionan una visión completa de la efectividad del Filtro Percolador en la depuración de aguas residuales; además, se reducen costos de operación, costos de nitrificación y desnitrificación según lo estudiado (Ostace et al., 2011).

Al aplicar la metodología ASM1 en la simulación biocinética, se estableció un cambio en la entrada del caudal al tanque de oxidación anaeróbica, ubicado a 4 m de altura con respecto a la horizontal, este cambio generó una mejor difusión molecular de oxígeno en la parte superior del tanque provocando un efecto facultativo de los microorganismos anaerobios y aerobios de las biopelículas del filtro percolador; los resultados obtenidos en la simulación del sustrato fácilmente biodegradable (Ss) muestran una remoción del 99.75% en un periodo de 20 días (Sánchez et al., 2023). A pesar de que este valor es menor al obtenido a través de las ecuaciones, el margen de error es mínimo, con tan solo un 0.15%. Es importante mencionar que el valor inicial estándar del Ss obtenido para el filtro percolador fue de 5820 mg/l, lo que demuestra una eficiente reducción de la fracción de Ss a 15 mg/l. Los resultados de la simulación se pueden observar en la figura 6a y 6b (Orjuela et al., 2023).

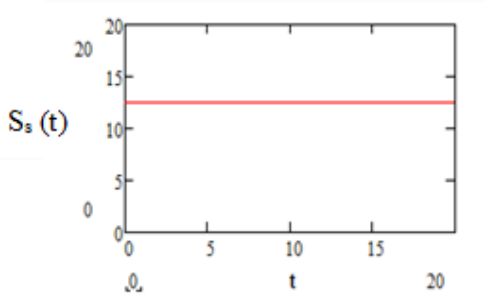

Figura 6a. DQO [mg/L] Fácilmente Biodegradable vs. Tiempo en Días.

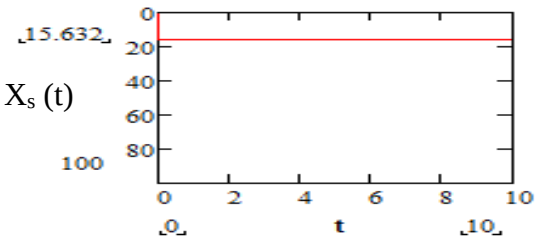

Figura 6b. DQO [mg/L] lentamente Biodegradable vs. Tiempo en Días.

La simulación del sustrato lentamente biodegradable (Xs) arrojó un valor inicial estándar de 5820 mg/l obtenido del filtro percolador. Durante un período de 10 días se pudo observar una reducción de la fracción de Xs, la cual fue menor a 20 mg/l. Este resultado es importante porque el Xs es un componente del agua

residual que tarda más tiempo en ser biodegradable, lo que hace que su tratamiento sea más difícil (Burguer et al., 2023; cieza et al., 2021).

3.3.5. Tanque Sedimentador Secundario

En un inicio las dimensiones del sedimentador secundario se determinaron mediante el uso de ecuaciones establecidas previamente, teniendo en cuenta un caudal máximo de 1.28 m^3/h, una velocidad de sedimentación de 0.44 m/s, un diámetro de partícula de 0.001 m, una densidad del fluido y del sólido de 1000 y 1800 kg/m^3 respectivamente, una viscosidad de 0.001 kg/m*s y un volumen del tanque sedimentador de 3.75 m^3. Los resultados de estas ecuaciones son las siguientes: 3 h en TRH, 1,25 m^2 en Área Superficial, 3m de altura, 0.5 m de Ancho, 2.5 m de Largo, 2m de altura la entrada del flujo tiene un valor de 1 m/h Carga Hidráulica, 0,0002m/s en Velocidad Horizontal y 8,71 m/s en Velocidad Horizontal Máxima.

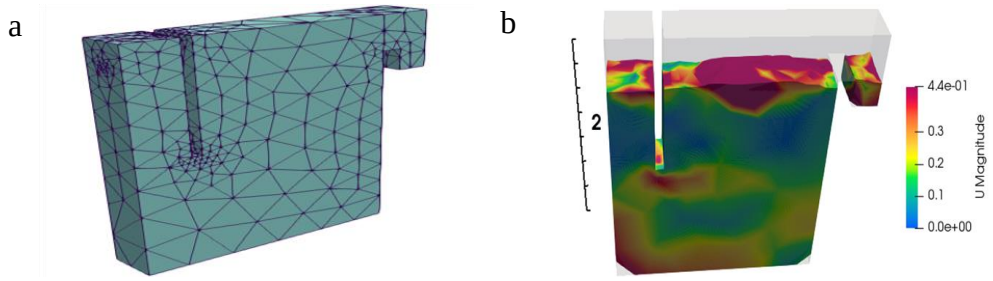

Figura 7. *a) Malla del tanque sedimentador secundario y b) Simulación del tanque sedimentador secundario.*

En la figura 7a y 7b, se muestra la malla de simulación y la escala de la velocidad del fluido dentro del tanque. Los resultados obtenidos fueron desfavorables dado que la velocidad del fluido fue adversa y excede la velocidad de sedimentación (0.44 m/s). Se propuso los siguientes cambios para mejorar el desempeño del sistema; se acortó el tanque en el fondo y se aumentó su longitud, manteniendo así el volumen y mejorando la eficiencia del tanque (Aguilar et al., 2021).

La reubicación del tanque sedimentador a la entrada del afluente a una altura de 1,7 m, provocó sustancialmente un cambio en la dinámica del fluido, predominando una velocidad de paso 0.25 m/s en el recorrido del agua residual como se indica en la figura 8, estos resultados garantizan la adecuada remoción del contaminante, optimizando costos de implementación y área del proyecto.

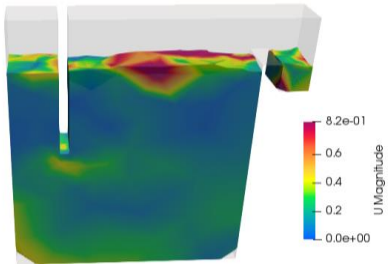

Figura 8. Simulación del tanque sedimentador secundario.

3.3.6. Tanque de cloración

Con respecto al tanque de cloración se presentan las dimensiones, resaltando que los valores se obtuvieron a partir de las ecuaciones establecidas anteriormente: 1 h en TRH, 1.28 m^3en Caudal Punta, Volumen 1.5 m^3, 1.5 m de Altura, 1 m de Ancho, 1 m de Largo, Área Superficial en 1 m^2.

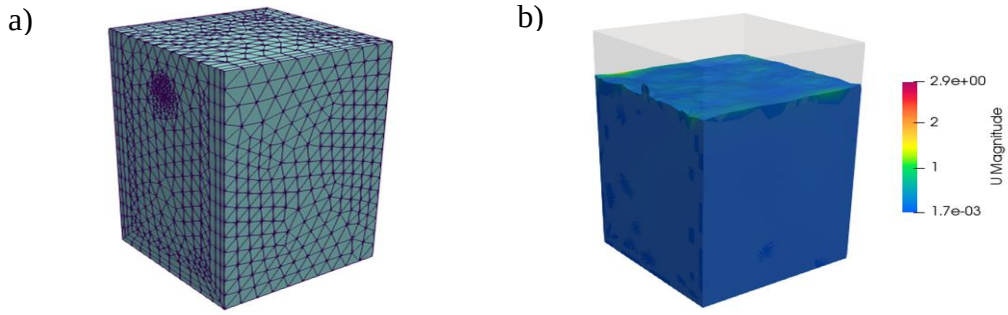

Figura 9. *a) Malla del tanque de cloración y b) Simulación del tanque clarificador.*

En la figura 9a y 9b, los resultados de la simulación fueron negativos debido a que no existe una velocidad significativa que permita la mezcla entre el líquido y el cloro, por lo que fue necesario cambiar el volumen del tanque de 1.5 m^3 a 0.4 m^3 y el diámetro de la entrada del afluente de 0.72-0.2 mm, creando una especie de cono. En este caso, se utilizó el principio de Bernoulli para mejorar la velocidad de mezcla del fluido con el cloro generando diseños que aprovechan el comportamiento hidráulico para mezcla de agentes químicos (Medina S. et al., 2017).

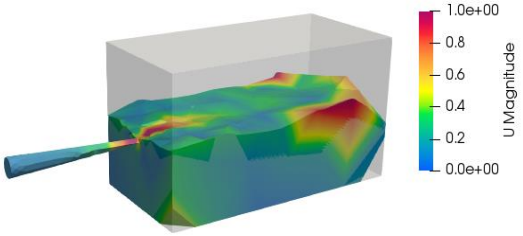

Figura 10. Simulación del tanque de cloración con las dimensiones modificadas.

En la figura 10, la simulación del tanque de cloro se presenta con dimensiones modificadas, donde se puede observar que al implementar una baja del área del inlet se logró aumentar la velocidad de entrada del líquido creando un vórtice que permitió la homogeneización del cloro (Duque et al., 2023; Robles et al., 2023).

4. CONCLUSIÓN

Luego de determinar la simulación del filtro de flujo, se concluye que la remoción de los niveles de DQO es del 99.75%. Mediante la simulación se pudo diagnosticar que las dimensiones obtenidas del tanque homogeneizador y ecualizador con un volumen de 29.81 m^3 y la configuración primaria son suficientes para regular el flujo de sólidos y, en consecuencia, decantar la materia sedimentable y la materia orgánica.

El tanque sedimentador secundario sobrepasa la velocidad de sedimentación que es de 0.4 m/s y el tanque de desinfección no alcanza la velocidad precisada que es de 0.2 m/s para la homogeneización del cloro, por lo que fue necesaria la modificación geométrica generando un cono que utiliza el principio Venturi llegando a velocidades de 0.9 m/s suficientes para la mezcla rápida del desinfectante. Las mejoras en el tanque de cloración, en los sedimentadores y filtro percolador permitirán aprovechar el principio Venturi para la mezcla rápida del desinfectante en el clorador, aumentar la eficiencia de remoción en los sedimentadores debido a la baja velocidad de paso que fue determinada con las nuevas medidas simuladas y finalmente el filtro percolador mejoró su rendimiento al trabajar con fracciones de difícil biodegradabilidad fundamentadas en la matriz ASM1.

5. REFERENCIAS

Agencia Europea de Medio Ambiente. (2023). *¿Cuáles son las principales fuentes de la contaminación del agua?* HELPCENTER FAQ de la AEMA. https://www.eea.europa.eu/es/help/preguntas-frecuentes/cuales-son-las-principales-fuentes

Aguilar-Rodriguez, C. E., Ramirez-Ruiz, C., & Villarroel, E. D. M. (2021). Uso de cfd como herramienta para la modelación y predicción numérica de los fluidos: Aplicaciones en estructuras hidráulicas y agricultura [conferencia]. *Sexto Congreso Nacional de Riego (*COMEII-2021*)*, Drenaje y Biosistemas, Hermosillo, Sonora. http://riego.mx/congresos/comeii2021/files/ponencias/extenso/COMEII-21048.pdf

Aguirre-López, M. A., Cantú-González, J. R., & Hueyotl-Zahuantitla, F. (2022). Diseño de cuerpos sólidos con FreeCAD y su uso en dinámica de fluidos computacional. *Revista Electrónica sobre Tecnología, Educación y Sociedad*, *9*(17), Article 17. https://ctes.org.mx/index.php/ctes/article/view/770

Alférez Rivas, L. E., & Nieves Pimiento, N. (2019). Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR): Impacto ambiental esperado e impacto ambiental provocado. *Caribeña de Ciencias Sociales*, (junio). https://www.eumed.net/rev/caribe/2019/06/tratamiento-aguas-residuales.html

Álvarez, J., Smeltekop, H., Cuba, N., & Loza-Murguia, M. (2011). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales del prebeneficiado de café (Coffea arabica) implementado en la comunidad Carmen Pampa provincia Nor Yungas del Departamento de La Paz. *Journal of the Selva Andina Research Society*, *2*(1), 34-42. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942011000100005&lng=es&tlng=es

Alcívar, D. G., & Gutiérrez, Y. D. L. M. Á. (2023). Relación entre Calidad del Agua y la Salud de los Habitantes del Río Portoviejo, Manabí. *593 Digital Publisher CEIT*, *8*(5),

545-553. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9124316

Bo, Y., Li, Y., & Gao, W. (2024). Exploring the effects of turbulent field on propagation behaviors in confined hydrogen-air explosion using OpenFOAM. *International Journal of Hydrogen Energy*, *50*, 912-927. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.303

Bürger, R., Careaga, J., Diehl, S., Jeison, D., & Pineda, R. (2023). en el tratamiento de aguas servidas. *Researchgate*. https://www.researchgate.net/profile/Raimund-Buerger-2/publication/373515642_Serie_Comunicacional_CRHIAM_Modelos_de_sedimentacion_reactiva_para_procesos_de_lodos_activados_en_el_tratamiento_de_aguas_servidas/links/64efb5ce0f7ab20a8667044d/Serie-Comunicacional-CRHIAM-Modelos-de-sedimentacion-reactiva-para-procesos-de-lodos-activados-en-el-tratamiento-de-aguas-servidas.pdf

Calle Pérez, D. L. (2023). *Riesgos que se pueden presentar en las etapas de planificación y ejecución, en los proyectos de infraestructura de servicios públicos de acueducto en el municipio de Rionegro, Antioquia*. [Trabajo de grado, Corporación Universitaria Minuto de Dios] UNIMINUTO. https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/18007

Changoluisa Choloquinga, M. E., & Naranjo Vásquez, T. L. (2023). Diseño y simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas para el campus Salache [Tesis de grado, Universidad Técnica de Cotopaxi] Dspace. http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/11452

Cieza Pérez, A., Lozada, M. C., Rodríguez, V. H. P., & Alarcón, M. C. (2021). La Gestión de procesos internos en las empresas prestadoras de servicio de agua y alcantarillado en el Perú. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, *5*(6), 12185-12201. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i6.1224

Cusiche Pérez, L. F., Miranda Zambrano, G. A., Cusiche Pérez, L. F., & Miranda Zambrano, G. A. (2019). Contaminación por aguas residuales e indicadores de calidad en la reserva nacional 'Lago Junín', Perú. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, *10*(6), 1433-1447. https://doi.org/10.29312/remexca.v10i6.1870

Diaz Amaya, E. F., & Gélvez Peña, D. F. (2023). *Pretratamiento de Aguas Residuales Mediante la Construcción de un Cribado Autolimpiante* [Tesis de grado, Universidad de Santander] UDES. https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/8864

Duque-Sarango, P., & Zagal-Andrade, C. (2023). Modelamiento del tratamiento biológico: análisis con un ensayo experimental en un reactor discontinuo aeróbio: Modeling of biological treatment: analysis with experimental test in a batch reactor aerobic. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, *6*(2), 1097-1107. https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-012

ECODES. (2021). *La depuración en pequeños municipios: Retos y soluciones*. ECODES. https://ecodes.org/images/que-hacemos/MITERD_2021/Informes/La_depuracion_en_pequenos_municipios_retos_y_soluciones_Analisis_de_las_tecnologias_existentes_y_de_las_soluciones_basadas_en_la_naturaleza.pdf

ETAPA-EP. (2017). *Diseños Definitivos de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Guangarcucho. Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. ETAPA-EP. https://www.etapa.net.ec/Portals/0/Documentos/licitacion%20publica%20planta%20guangarcucho/ANEXO%205/ANEXO%203%20Manual%20de%20OyM.pdf?ver=2021-08-04-172825-320

Fundación CENTA. (2021). *Guía técnica para la selección y diseño de líneas de tratamiento de aguas residuales*. AECID. https://www.aguasresiduales.info/media/images/ckfinder/userfiles/files/Mod_00_Guia_PTAR(2).pdf

Martínez Santa-María, Fernández Yuste, J. A., & Confederación Hidrográfica del Tajo. (2003). *Régimen ambiental de caudales Cuenca*, del 29 de septiembre al 3 de octubre de 2003. Universidad Internacional Menéndez Pelayo.http://ingenio.upm.es/permalink/f/7o10cf/34UPM_ALMA2154141210004212

Hendricks David. (2011). *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes Unit Processes Physical, Chemical, and Biological*. IWA Editions. pg 727 Physical, Chemical, and

Biological. https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315276052/water-treatment-unit-processes-david-hendricks

Herrera-Campuzano, Y. P., & Pacheco-Bustos, C. A. (2024). *Estudio de impactos ambientales sobre alternativas de sistemas de saneamiento para la solución de vertimientos en la zona costera del distrito de Riohacha, en La Guajira. Colombia. Revista Ingenio, 21*(1). https://doi.org/10.22463/issn.2011-642X

HANNA Instruments. (2019). *Guía para el análisis de la demanda química de oxígeno (DQO)*. HANNA Instruments Colombia. https://www.hannacolombia.com/blog/post/115/guia-para-el-analisis-la-demanda-quimica-oxigeno-dqo

Herrera, G. C. G., & Naranjo, S. I. L. (2019). Evaluación del impacto ambiental de los sistemas de alcantarillado sanitario y planta de tratamiento de aguas residuales en Ecuador. *Ciencia Digital, 3*(3.2.1), Article 3.2.1. https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v3i3.2.1.783

Laura, B., Eliana, D., Laura, O., María, S., Sandoval, L., & Lizcano, V. (2023). Evaluación hidrodinámica y arranque de un filtro percolador a escala laboratorio Hydrodynamic evaluation and startup of a laboratory-scale trickling filter. *Researchgate*. https://doi.org/10.5281/zenodo.8133136

Lesikar, B., & Enciso, J. (2002). *Filtro percolador. En Sistemas individuales para el tratamiento de aguas negras*. World Wide Web. https://cidta.usal.es/cursos/simulacion/modulos/libros/uni_04/Texas/filtro%20percolador.pdf

Lozano, W. (2012). Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales. Universidad Piloto de Colombia. *Researchgate.* https://www.researchgate.net/publication/298354134_Diseno_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales

Lobaton, H., & López Mejía, N. (2020). *Dinámica Computacional de Fluidos Aplicada a Vitrinas Refrigeradas*. https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Lobaton/publication/341685407_Dinamica_Computacional_de_Fluidos_Aplicada_a_Vitrinas_Refrigeradas/links/5f14d244a6fdcc3ed718a2fe/Dinamica-Computacional-de-Fluidos-Aplicada-a-Vitrinas-Refrigeradas.pdf

Mancilla-Duarte, N., & Molina-Rodríguez, K. L. (2021). *Modelado del proceso de lodos activados para la remoción de materia orgánica, de la planta de tratamiento de aguas residuales Salitre, mediante el uso del software Lynx ASM1*. [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia] RIUCaC. https://hdl.handle.net/10983/26757

Mayoración, p. C. M. D. Y. (2023). *Estudio de diagnóstico de la operación de los filtros en planta de tratamiento de agua potable Vizcachas*. [Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica del Ecuador] .Statistics for DSpace Instance. https://repositorio.puce.edu.ec/bitstreams/f879a102-4834-4c06-b591-3f525d87fdda.

Miranda Vallejos, N. X. (2020). *Estudio de diagnóstico de la operación de los filtros en planta de tratamiento de agua potable Vizcachas.*[Tesis de grado, Universidad de chile] Universidad de Chile https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176542

Organización Mundial de la Salud. (2022). *Desafíos globales del agua*. Naciones Unidas. https://www.un.org/es/global-issues/water

Organización Mundial de la Salud & Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia. (2022). Global progress report on WASH in health care facilities: Fundamentals first [Comunicado de prensa conjunto]. *Organización Mundial de la Salud*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240017542

Ostace, G. S., Cristea, V. M., & Agachi, P. Ș. (2011). Cost reduction of the wastewater treatment plant operation by MPC based on modified ASM1 with two-step nitrification/denitrification model. *Computers & chemical engineering, 35*(11), 2469-2479. https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2011.03.031

Orjuela Palacio, J. M., Sciammaro, L. P., & Zaritzky, N. E. (2023). Método alternativo de obtención de queratina empleando sulfuro de sodio, sin

diálisis, para la reconversión de biomasa de la industria avícola. In *VII Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería (La Plata, 25 al 27 de abril de 2023)*. http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/157881

Paucar Aedo, F. G., & Real Ferrer, G. (2022). Reutilización de aguas en España y el Perú: Avances y desafíos. *Sostenibilidad: económica, social y ambiental. 2022, 4*: 75-100. https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad2022.4.05

Pakhnenko, V. P. (2022). Application of the Salome Software Package for Numerical Modeling Geophysical Tasks. En T. *Chaplina (Ed.), Processes in GeoMedia—Volume IV* (pp. 375-385). https://doi.org/10.1007/978-3-030-76328-2_39

Pelea, L. P. (2019). Valores atípicos en los datos,¿ cómo identificarlos y manejarlos?. *Revista Del Jardín Botánico Nacional, 40*, 99-107. https://www.jstor.org/stable/26937051

Pérez, Y. A., Cortés, D. A. G., & Haza, U. J. J. (2022). Humedales construidos como alternativa de tratamiento de aguas residuales en zonas urbanas: una revisión. *Ecosistemas, 31*(1), 2279-2279.. https://doi.org/10.7818/ECOS.2279

Présiga-López, D., Rubio-Clemente, A., & Pérez, J. F. (2021). Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas. *Revista UIS Ingenierías*, *20*(1), 121-134. https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011

Ramírez Jiménez, D. F. (2021). Sistema de medición y control de temperatura para un prototipo de planta de tratamiento de aguas residuales. I*nvestigación e Innovación en Ingenierías, 9*(1), 100-113. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7878759

Rodríguez, J., García, C., & Pardo, J. (2015). Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales. *Tecnura, 19*(46), 149-164. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a03

Rueda, F., Molano, A., & Pramparo, L. (2019). Evaluación de un sistema de tratamiento de aguas residuales no domésticas para la remoción de carga orgánica en industria de bebidas no alcohólicas. *Entre Ciencia e Ingeniería, 13*(26). https://doi.org/10.31908/19098367.1150

Robles-Casillas, F., Becerra-López, M. M., Ávila-López, C., Waybell-Campos, L. R., Jasso-Frausto, L. F., González-Durón, J. M., & Waybell-López, L. F. (2023). Planta de Tratamiento Inteligente de Aguas Residuales con un Sistema y Método de Monitoreo. *Conciencia Tecnológica*, (65), 33-47. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94475786004

Sánchez Rengifo, P. A., Piragauta Aguilar QEPD, M. Á., & Riaño Melo, O. (2023). Biodegradación de polietilenglicol 400 con consorcio de Pseudomonas sp. y Rhizobium trifolii. R*evista Colombiana de Biotecnología, 25*(1), 69-77. https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v25n1.91128

Searcy, J. (1963). *Flow-Duration Curves—Manual of Hydrology: Part 2*. Low-Flow Techniques. https://pubs.usgs.gov/wsp/1542a/report.pdf

Senagua, Norma C.O. 10.7 *Revisión de la normativa*. Compras Públicas. https://www.compraspublicas.gob.ec/ProcesoContratacion/compras/PC/bajarArchivo.cpe?Archivo=LDl-tMWnH_ynJaeWxz_aLvVQ0HLyQpLuvEhLHqPAsWU,

Standard Methods. (2018). 5220 *CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD)*. En Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. https://doi.org/10.2105/SMWW.2882.103.com/es/analitos/microbiologia/

Su, J., Wang, L., Zhang, Y. and Gu, Z. A Numerical Study on Influent Flow Rate Variations in a Secondary *Settling Tank. Processes, 7*(12), p.884. doi: https://doi.org/10.3390/pr7120884, 2019.

UNESCO. (2020). *Informe del 2020 Agua y cambio climático*. UNESCO. https://es.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020

Medina, M. E. V. (2019). *Secondary settling tanks modeling: study of the dynamics of activated*

sludge sedimentation by computational fluids dynamics [Tesis de grado, Université de Strasbourg] HAL. https://theses.hal.science/tel-02526921/

Zhao, B., Cai, Y., Wang, Q., Zeng, X., Wang, S., & Li, G. Mxsimlab: An Incremental Integration-Based Cae Software Development and Application Platformmxsimlab: An Incremental Integration-Based Cae Software Development and Application Platform. *Available at SSRN 4691640*. https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4691640