

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:  
INGENIEROS AMBIENTALES**

**TEMA:  
MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO MODELOS ASM**

**AUTORES:  
BOLÍVAR MAURICIO ARTOS BELALCÁZAR  
JOE BOLÍVAR CONSTANTE CERVANTES**

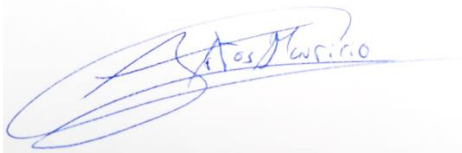
**TUTOR:  
JUAN GABRIEL MOLLOCANA LARA**

**Quito, marzo 2020**

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

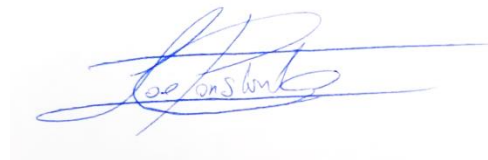
Nosotros Bolívar Mauricio Artos Belalcázar, con documento de identificación N.º 1723565493, y Joe Bolívar Constante Cervantes con documento de identificación N.º 1717213993, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO MODELOS ASM, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIEROS AMBIENTALES, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Bolívar Mauricio Artos Belalcázar

1723565493



Joe Bolívar Constante Cervantes

1717213993

Marzo, 2020

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo Experimental, MODELADO Y SIMULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EMPLEANDO MODELOS ASM, realizado por Bolívar Mauricio Artos Belalcázar y Joe Bolívar Constante Cervantes, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo 2020

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Juan Gabriel Mollocana Lara', is written over a light blue grid background.

**JUAN GABRIEL MOLLOCANA LARA**

1721700647

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de investigación está dedicado a mis padres, familia y amigos.

A mi madre Mayra Mercedes Cervantes Torres y a mi padre José Bolívar Constante Cervantes por todo su amor y apoyo incondicional, gracias por el ejemplo que me han brindado para lograr cumplir mis sueños y metas.

A mis abuelos maternos y paternos por todo el amor y cuidado.

A todos mis amigos y seres queridos que han formado parte de mi vida en los momentos buenos y malos, cada día aprendo algo nuevo de ustedes para ser mejor persona, gracias por todo lo que han aportado en mi vida.

A mi hijo Joe Jared Constante Cervantes, tu eres mi motor que no me deja rendir, mi mayor logro y sueño.

*Joe*

A mi padre Bolívar Lautaro Artos Andino por todo el sacrificio que ha hecho para permitirme salir adelante como persona y como profesional. Su ejemplo de lucha me inspira todos los días para conseguir mis metas.

A mi madre Clara Margoth Belalcázar Molina por todo el amor que me ha dado, la comprensión y la paciencia con la que me ha guiado para ser un hombre correcto. Agradezco su forma de criarme y los valores inculcados en mí para nunca desviarme de mis objetivos.

A mis hermanos por confiar en mí y estar presentes siempre que los necesito. Su ayuda incondicional ha sido un fuerte apoyo para concluir mis estudios.

A mis familiares y amigos por haber sido una parte importante en mi vida y haber estado junto a mí en los buenos y malos momentos ayudándome a crecer como persona y vivir experiencias enriquecedoras.

***Mauricio***

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Politécnica Salesiana por permitir el progreso de la investigación y ofrecer recursos claves para su ejecución.

Al Ing. Juan Gabriel Mollocana por la paciencia y el profesionalismo entregado para llevar a cabo el trabajo experimental y la ayuda brindada para resolver los inconvenientes presentados durante el desarrollo del mismo.

Al Departamento de Gestión Ambiental del Camal Metropolitano de Quito, en especial al Ing. Aldo Moscoso por ceder el acceso a las instalaciones de la empresa e indicar el funcionamiento de la PTAR.

## ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	3
2.1.	Objetivo General.....	3
2.2.	Objetivos Específicos .....	3
3.	MARCO TEÓRICO .....	4
3.1.	Antecedentes de la Empresa Pública Metropolitana de Rastro de Quito (EMRAQ-EP) 4	4
3.2.	Introducción a las aguas residuales.....	6
3.3.	Tipos de aguas residuales .....	7
3.3.1.	Aguas residuales domésticas .....	7
3.3.2.	Aguas residuales municipales.....	8
3.3.3.	Aguas residuales industriales.....	8
3.3.4.	Escorrentías agrícolas .....	8
3.4.	Características de las aguas residuales.....	8
3.4.1.	Acidez.....	8
3.4.2.	Alcalinidad .....	9
3.4.3.	Demanda biológica de oxígeno .....	9

3.4.4.	Demanda química de oxígeno .....	9
3.4.5.	Materia orgánica.....	9
3.4.6.	Nitrógeno.....	10
3.4.7.	Oxígeno disuelto.....	10
3.4.8.	pH.....	10
3.5.	Composición de las aguas residuales.....	11
3.6.	Efectos de las aguas residuales .....	14
3.6.1.	Efectos en la salud humana .....	14
3.6.2.	Efectos ambientales .....	14
3.6.3.	Efectos económicos .....	15
3.7.	Introducción al tratamiento de aguas residuales .....	15
3.8.	Contaminantes de las aguas residuales .....	16
3.9.	Clasificación de los tratamientos de aguas residuales .....	17
3.9.1.	Tratamiento primario.....	17
3.9.2.	Tratamiento secundario .....	17
3.9.3.	Tratamiento terciario .....	18
3.10.	Planta de tratamiento de aguas residuales con lodos activados .....	18
3.11.	Antecedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de la EMRAQ-EP.....	20



3.12.	Antecedentes del modelamiento.....	20
3.13.	Introducción al modelado y simulación .....	23
3.13.1.	Modelado .....	23
3.13.2.	Construcción de un modelo .....	23
3.13.3.	Simulación .....	26
3.13.4.	Importancia de la simulación.....	26
3.14.	Fundamentos de modelado y simulación de una PTAR .....	27
3.15.	Selección de modelos de lodos activados .....	28
3.16.	Modelos ASM .....	29
3.16.1.	Modelo ASM1 .....	30
3.17.	Estequiometría y Cinética .....	36
3.17.1.	Estequiometría .....	36
3.17.2.	Cinética .....	37
3.18.	Características del programa GPS-X.....	39
3.19.	Influent Advisor .....	40
3.20.	Protocolos de Caracterización .....	41
3.20.1.	Protocolo de la Stowa .....	41
3.20.2.	Protocolo de WERF .....	45
3.21.	Conversión de datos de campaña en información compatible con ASM1.....	46

3.22.	Protocolos de Calibración del modelo .....	47
3.22.1.	Protocolo de Petersen.....	47
3.22.2.	Protocolo de Vanrolleghem .....	48
3.22.3.	Protocolo de Langergraber.....	49
3.23.	Parametrización y calibración del modelo .....	50
3.24.	Funcionamiento de la PTAR de la EMRAQ-EP .....	52
3.25.	Procesos de tratamiento de la PTAR de la EMRAQ-EP.....	54
3.1.1	Cribado o tamizado.....	54
3.1.2	Separador de sólidos automático .....	55
3.1.3	Homogenización.....	55
3.1.4	Aireación .....	56
3.1.5	Sedimentación secundaria .....	58
3.1.6	Desinfección .....	59
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	61
4.1.	Reconocimiento del área de estudio .....	64
4.2.	Muestreo .....	65
4.2.1.	Premuestreo .....	65
4.2.2.	Campaña de muestreo 1.....	67
4.2.3.	Campaña de muestreo 2.....	72

4.3.	Caracterización del Influyente .....	74
4.3.1.	Fraccionamiento de la DQO .....	76
4.3.2.	Determinación de DBOu .....	77
4.3.3.	Modelación de la PTAR .....	79
4.3.4.	Simulación .....	83
4.3.5.	Creación de Escenario .....	83
4.4.	Parametrización .....	84
4.4.1.	Determinación de Yh.....	84
4.4.2.	Determinación de Bh .....	85
4.4.3.	Entradas físicas y operacionales .....	86
4.5.	Análisis de Sensibilidad.....	87
4.6.	Calibración del modelo con el software GPS-X.....	90
4.7.	Coefficiente de determinación R <sup>2</sup> .....	92
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	93
5.1.	Resultados de la Campaña de muestreo 1 .....	93
5.2.	Dimensiones de los Equipos .....	94
5.3.	Fraccionamiento de la DQO .....	96
5.4.	Software GPS-X .....	98
5.4.1.	Resultados de simulación del proceso actual .....	98

5.4.2.	Resultados de calibración .....	100
5.4.3.	Resultados de Validación .....	102
5.5	Discusión .....	105
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
6.1	Conclusiones .....	108
6.2	Recomendaciones .....	109
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	110
8.	ANEXOS .....	111

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Datos de ubicación de la EMRAQ-EP</i> .....	4
Tabla 2. <i>Límites de Descarga al Sistema de Alcantarillado Público</i> .....	12
Tabla 3. <i>Contaminantes de las Aguas Residuales</i> .....	16
Tabla 4. <i>Tratamiento primario en la PTAR de la empresa RASTRO</i> .....	17
Tabla 5. <i>Softwares especializados en modelamiento y simulación de una PTAR</i> .....	22
Tabla 6. <i>Variables de estado del modelo ASM1 (Loaiza, 2007)</i> .....	31
Tabla 7. <i>Nomenclatura de parámetros del modelo ASM1</i> .....	38
Tabla 8. <i>Ecuaciones para fraccionamiento de Substrato</i> .....	43
Tabla 9. <i>Valores promedios y rangos de los parámetros del ASM1 (Henze et al. 2002)</i> .....	51
Tabla 10. <i>Producción de Aguas Residuales en la PTAR de la EMRAQ-EP</i> .....	53
Tabla 11. <i>Resultados de medición de parámetros in-situ en el muestreo</i> .....	66
Tabla 12. <i>Materiales y equipos utilizados en la campaña de muestreo</i> .....	68
Tabla 13. <i>Parámetros establecidos para la campaña de muestreo</i> .....	71
Tabla 14. <i>Resultados de análisis para el fraccionamiento de la DQO</i> .....	73
Tabla 15. <i>Resultados de análisis de alícuotas para la determinación de coeficientes cinéticos y estequiométricos</i> .....	74
Tabla 16. <i>Cálculo de DBOU</i> .....	78
Tabla 17. <i>Promedio de la relación DBO5/DBOU</i> .....	79
Tabla 18. <i>Condiciones ambientales en la PTAR</i> .....	82
Tabla 19. <i>Valores calculados para <math>Y_h</math></i> .....	85
Tabla 20. <i>Flujo de entrada al biorreactor</i> .....	86
Tabla 21. <i>Datos físicos y operacionales del biorreactor</i> .....	86

Tabla 22. <i>Datos físicos y operacionales del sedimentador secundario</i> .....	87
Tabla 23. <i>Fracciones calibradas de influente y biorreactor</i> .....	92
Tabla 24. <i>Resultados de la medición de parámetros</i> .....	93
Tabla 25. <i>Especificaciones Técnicas del Biorreactor</i> .....	94
Tabla 26. <i>Especificaciones Técnicas del Sedimentador Secundario</i> .....	95
Tabla 27. <i>DQO total y soluble de Influyente y Efluente</i> .....	96
Tabla 28. <i>Cálculo de DBOU y DBObio</i> .....	97
Tabla 29. <i>Resultados Fraccionamiento de la DQO</i> .....	97
Tabla 30. <i>Resultados de parametrización SST medidos y SST simulados</i> .....	98
Tabla 31. <i>Resultados de SST medidos y SSV simulados</i> .....	99
Tabla 32. <i>Resultados de DBO medida y DBO simulada</i> .....	99
Tabla 33. <i>Resultados DQO medida y DQO simulada</i> .....	100
Tabla 34. <i>Resultados SST medidos y SST simulados - Calibrados</i> .....	100
Tabla 35. <i>Resultados SSV medidos y SSV simulados - Calibrados</i> .....	101
Tabla 36. <i>Resultados DBO medida y DBO simulada - Calibrados</i> .....	101
Tabla 37. <i>Resultados DQO medida y DQO simulada - Calibrados</i> .....	102
Tabla 38. <i>Resultados SST medidos y SST simulados- Validación</i> .....	103
Tabla 39 . <i>Resultados SSV medido y SSV simulado - Validación</i> .....	103
Tabla 40. <i>Resultados DBO medida y DBO simulada - Validación</i> .....	104
Tabla 41. <i>Resultados DQO medida y DQO simulada - Validación</i> .....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Ubicación de la empresa EMRAQ-EP</i> .....	5
Figura 2 . <i>Servicios de la EMRAQ-EP</i> .....	6
Figura 3. <i>Construcción de un modelo</i> .....	24
Figura 4. <i>Estados de un modelo para la simulación</i> .....	25
Figura 5. <i>Importancia de la simulación</i> .....	26
Figura 6. <i>Diferencias entre modelos de lodos activados</i> .....	29
Figura 7. <i>Componentes del modelo ASM1</i> .....	32
Figura 8. <i>Procesos del modelo ASM1</i> .....	33
Figura 9. <i>Fracciones de DQO de los lodos activados</i> .....	35
Figura 10. <i>Fraccionamiento de los componentes nitrogenados de los lodos activados</i> .....	36
Figura 11. <i>Parámetros estequiométricos y cinéticos del modelo ASM1</i> .....	38
Figura 12 . <i>Niveles de aplicación del Protocolo de WERF</i> .....	46
Figura 13. <i>Recursos para aplicación del Protocolo de Petersen</i> .....	47
Figura 14. <i>Submodelos de aplicación del Protocolo de Vanrolleghem</i> .....	48
Figura 15. <i>Fases del Protocolo de Langergraber</i> .....	49
Figura 16. <i>Esquema general de la PTAR de la EMRAQ-EP</i> .....	53
Figura 17. <i>Ícono de Filtro en GPS-X</i> .....	54
Figura 18. <i>Ícono de tanques homogenizadores GPS-X</i> .....	56
Figura 19. <i>Biorreactor de Mezcla Completa en el software GPS-X</i> .....	57
Figura 20. <i>Clarificador Secundario en el software GPS-X</i> .....	59
Figura 21. <i>Tanque de Desinfección en el software GPS-X</i> .....	60
Figura 22. <i>Diagrama de Metodología del Trabajo Experimental</i> .....	63

Figura 23. Alcance de la simulación del proyecto.....	64
Figura 24. Comportamiento por horas de pH, SSed, y Temperatura .....	67
Figura 25. Diagrama de Puntos de Muestreo .....	69
Figura 26. Ejemplo de etiqueta utilizada en la rotulación de embaces para muestra simple .....	69
Figura 27. Caracterización con Influent advisor.....	75
Figura 28. Etiquetado de componentes del modelo en el programa GPS-X .....	82
Figura 29. Ícono de simulación en el software GPS-X.....	83
Figura 30. Variables más sensibles .....	88
Figura 31. Variable con sensibilidad crítica .....	89
Figura 32. Variable con sensibilidad nula.....	90



## RESUMEN

La contaminación del agua es una de las problemáticas de mayor magnitud en el medio ambiente. El tratamiento de las aguas residuales, producto de las actividades del ser humano, es fundamental para mantener un equilibrio sano en los ecosistemas.

Para la presente investigación se aplicó el modelo ASM1, en la PTAR de la empresa EMRAQ-EP, con la ayuda del software GPS-X. Se realizó la caracterización física, química y biológica de las aguas residuales generadas por el faenamiento del camal metropolitano de Quito. En base a los parámetros establecidos en el modelo de lodos activados ASM1, se obtuvieron los datos de entrada para generar un modelo cercano a la realidad para efectuar la simulación, logrando la validación de la investigación. A partir de un pre-muestreo, se concluyó realizar dos campañas para la caracterización del influente y determinar las fracciones del modelo, para lo cual se aplicaron protocolos de caracterización.

Las entradas en el software GPS-X se determinaron a partir de los resultados obtenidos en campaña y de los cálculos realizados posteriormente. Se empleó el programa *Influent Advisor* para determinar las condiciones iniciales y modelar el biorreactor.

Las simulaciones se realizaron en estado dinámico, con las fracciones calculadas y calibradas, para estimar el comportamiento de la PTAR. Se calculó  $R^2$  para determinar la validez de los resultados obtenidos.

**Palabras clave:** ASM1, EMRAQ-EP, GPS-X, Caracterización, *Influent Advisor*, PTAR,  $R^2$

## ABSTRACT

Water pollution is one of the biggest problems in the environment. The treatment of wastewater, resulting from human activities, is essential to maintain a healthy balance in ecosystems.

For this research, the ASM1 model was applied in WTP of the EMRAQ-EP, with the help of GPS-X software. The physical, chemical and biological characterization of the wastewater generated by the work of the Metropolitan Camal of Quito was performed. Based on the parameters set in the ASM1 activated sludge model, the input data was obtained to generate a model close to reality to perform the simulation, achieving the validation of the research. Based on pre-sampling, two campaigns were concluded for the characterization of the influent and the model's fractions were determined, for which characterization protocols were applied. The entries in the GPS-X software were determined from the results obtained in the campaign and the calculations made later. The Influent Advisor program was used to determine initial conditions and model the bioreactor.

The simulations were performed in a dynamic state, with the fractions calculated and calibrated, to estimate the behavior of the PTAR.  $R^2$  was calculated to determine the validity of the results obtained.

Keywords: ASM1, EMRAQ-EP, GPS-X, characterization, *Influent Advisor*, WTP,  $R^2$

## **Glosario De Términos**

PTAR: Planta de Tratamiento para Aguas Residuales

ASM: Active Sludge Model

EMRAQ-EP: Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito

TH: Tanque Homogenizador

S: solubles

X: insolubles o inertes

COD: Demanda Química de Oxígeno Total

BOD: Demanda Biológica de Oxígeno

SO: Oxígeno disuelto

TSS: Sólidos Suspendidos Totales

VSS: Sólidos Suspendidos Volátiles

TKN: Nitrógeno Total Kjeldahl

TP: Fósforo Total

SNH: Nitrógeno Amoniacal

SNOI: Nitrito

SNOA: Nitrato

IVSSTOTSS: Proporción SSV/SST

SI: Orgánicos solubles inertes

SS: Substrato soluble rápidamente biodegradable

XI: Sustrato orgánico inerte particulado

XS: Sustrato particulado lentamente biodegradable

XBH: Biomasa activa heterótrofa

XBA: Biomasa activa autótrofa

XII: Materia particulada inerte producto del decaimiento

SNH: Nitrógeno amoniacal libre y ionizado

SND: Nitrógeno orgánico soluble biodegradable

XND: Nitrógeno orgánico particulado biodegradable

XP: Productos inertes

SALK: Alcalinidad

XNB: Nitrógeno en la biomasa

SNI: Nitrógeno orgánico soluble inerte

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde la década de los 90 los problemas ambientales globales están en aumento de manera alarmante lo cual, da como resultado la aceleración del calentamiento global. El crecimiento de la población y el desarrollo económico son los principales causantes del incremento en la demanda del recurso agua y suelo acompañado de una sobreexplotación de los recursos para cubrir las necesidades de la sociedad.

El recurso agua es la fuente vital para todos los procesos biológicos llegando a ser indispensable para sostener la vida, su cuidado y tratamiento es necesario, el cual se logra por medio de plantas de tratamiento para aguas residuales, involucrando a los lodos activos como uno de los más eficientes para caudales con alta carga orgánica.

Una planta de tratamiento de aguas residuales es un conjunto de mecanismos y procesos físicos, biológicos y químicos dirigidos a mejorar la calidad de un efluente, el cual ha sido alterado por su manipulación (Romero, 1999). En el presente trabajo experimental, se estudió una planta de tratamiento de aguas residuales con lodos activados, los que se definen como un tipo de tratamiento secundario, en el que interviene una mezcla de microorganismos y agua residual cargada de materia orgánica en condiciones aerobias, con el fin de disminuir su concentración (Sánchez, 2019).

La Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), del camal metropolitano en el sector de la ecuatoriana, se encarga del tratamiento del efluente proveniente del faenamiento de animales de consumo, el cual se genera en la parte superior del complejo de la empresa.

Uno de los objetivos primordiales del estudio realizado, se trata de la modelación de los procesos de una PTAR, lo cual es una simplificación utilizada para validar los

tratamientos aplicando modelos ASM. Modelos dedicados a describir la degradación de la materia orgánica entre otros parámetros que difieren entre cada modelo, necesarios para la operación de las plantas, estos modelos nos permitirán predecir la calidad del efluente y la producción del lodo en un tiempo real (Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua, 2005).

La simulación permite recrear procesos mediante la modelación de los mismos, reproduce fenómenos de un sistema artificialmente, resaltando la simulación estacionaria y dinámica que se emplearon durante la investigación. Las simulaciones dinámicas logran una mayor exactitud de las predicciones para el diseño, un diagnóstico y proyección de la planta, comparar variantes, sirven para investigación y experimentación de cambios en la operación con el fin de una optimización de operaciones, gastos y tiempos (Hydromantis, 2017).

A pesar de que los modelos ASM han sido ampliamente usados en otros países durante décadas, en Ecuador es difícil encontrar evidencia de su aplicación. Por estas razones, resulta de gran interés comenzar con el estudio y aplicación de modelos y simulaciones para el diseño e investigación de PTAR.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

Aplicar modelos de lodos activos ASM (Active Sludge Model) en el modelado y simulación de una planta de tratamiento de aguas.

### **2.2. Objetivos Específicos**

- Elegir la metodología de modelado y software especializado de simulación.
- Aplicar la metodología de modelado para generar un modelo ASM de una planta de tratamiento de aguas.
- Utilizar software especializado para la simulación del modelo de planta de tratamiento de aguas.
- Validar el modelo a través de los datos obtenidos

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Antecedentes de la Empresa Pública Metropolitana de Rastro de Quito (EMRAQ-EP)

La Empresa Municipal de Rastro del Distrito Metropolitano de Quito (EMRAQ-EP), instaló una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR), para los efluentes de sus instalaciones en la ciudadela “La Ecuatoriana” al sur-occidente de la ciudad de Quito, como se especifica en la Tabla 1, donde convergen varios caudales que tienen alto contenido de materia orgánica contaminante que requieren ser tratados, de tal forma que los efluentes combinados cumplan con las características de calidad de agua tratada, impuesta por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE).

**Tabla 1**

*Datos de ubicación de la EMRAQ-EP*

<b>País: Ecuador</b>	<b>Coordenadas</b>
<b>Ciudad: Distrito Metropolitano de Quito</b>	<b>Zona: 17 M</b>
<b>Parroquia: Turubamba de Monjas</b>	<b>Latitud: 771153.29 m E</b>
<b>Ciudadela: La Ecuatoriana</b>	<b>Longitud: 9964735.03 m S</b>
<b>Calles: Camilo Orejuela S/N y Gral. Ángel Isaac Chiriboga</b>	

*Nota:* La tabla indica la ubicación exacta del Camal Metropolitano de Quito. Elaborado por Artos B., Constante J., 2019



## Figura 1

### Ubicación de la empresa EMRAQ-EP



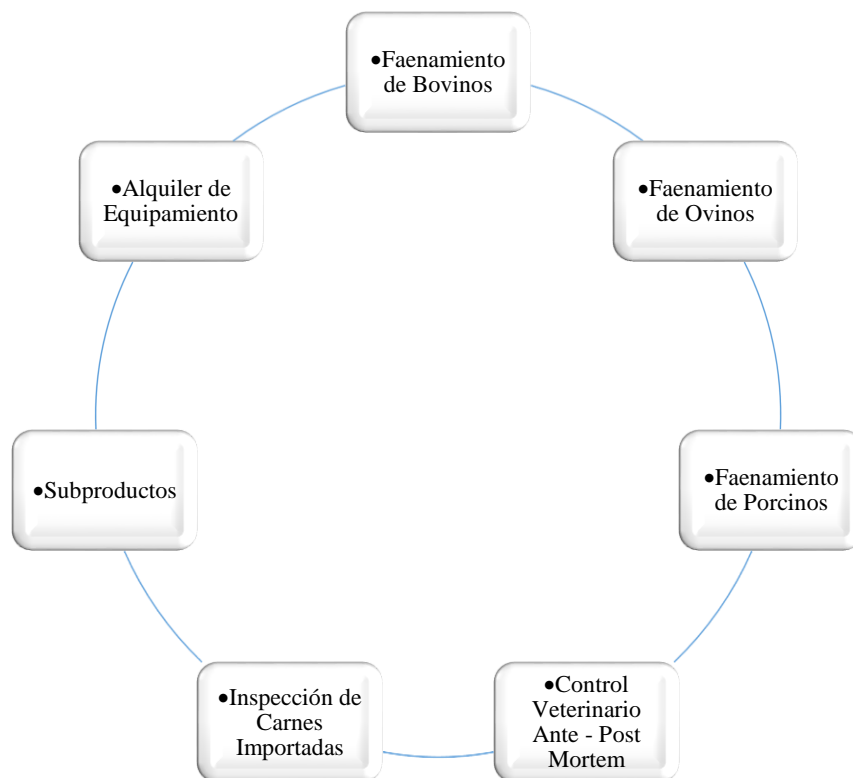
*Nota:* La figura representa la delimitación del área de la empresa EMRAQ-EP. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. (*Google Earth Pro*)

La Empresa Pública Metropolitana de Rastro Quito (EMRAQ-EP), es una entidad encargada del faenamiento de animales de granja para el consumo humano en el Distrito Metropolitano de Quito (Mendoza, 2017).

Además, en la Figura 2 se pueden apreciar las funciones complementarias que la empresa ofrece al usuario cumpliendo con los estándares de calidad y la normativa nacional aplicable bajo la supervisión de profesionales competentes en las diferentes áreas.

**Figura 2**

*Servicios de la EMRAQ-EP*



*Nota:* La figura indica los servicios que ofrece la EMRAQ-EP al usuario, siendo el faenamiento el más representativo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Mendoza, 2017).

### **3.2. Introducción a las Aguas Residuales**

La contaminación del aire y agua son temas ampliamente conocidos en la actualidad, no obstante, el interés por los mismos es imprescindible, se puede decir que antes de la década de los 60 el ciudadano común no tenía ninguna relación con la conservación de los recursos (UNESCO, 2017). Posteriormente, el mismo ser humano a través de los medios de comunicación se ha encargado de difundir la idea errónea de que, el desarrollo económico está ligado al deterioro del medio ambiente, debido a que para conseguir un progreso material se han empleado procesos de gran impacto ambiental. Por otro lado, desde un

punto de vista técnico, la contaminación es un problema de dificultad media-baja y de un costo reducido, si se compara a otros de menor importancia (Ramalho, 2003).

La generación de aguas residuales crece proporcionalmente a la demanda de agua a nivel global. A pesar de que las aguas residuales conforman una gran parte del ciclo hidrológico, se ha subestimado la importancia de la misma, siendo considerada como una carga a ser eliminada e ignorada. Los efectos de estas acciones repercuten directamente en aspectos importantes como la salud, economía, disponibilidad de recursos, ecosistemas entre otros, limitando el desarrollo de las poblaciones (UNESCO, 2017).

Se puede definir a las aguas residuales como aquellas que han sido modificadas por las actividades humanas, generando cambios en sus características originales y consecuentemente afectando su calidad, haciendo necesario un tratamiento previo a su reutilización o vertido. De acuerdo con el Ministerio del ambiente (2017) en el “Libro VI Anexo 1 del Texto Unificado de Legislación Secundario de Medio Ambiente” se establece que las aguas residuales son aquellas cuya calidad original ha sido degradada por usos múltiples como industriales, domésticos, municipales, entre otros, generando una composición variada (MAE, 2017).

### **3.3. Tipos de Aguas Residuales**

De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2017), se puede clasificar a las aguas residuales pueden de acuerdo a su fuente generadora en:

#### ***3.3.1. Aguas Residuales Domésticas***

Son aquellas que se originan en zonas residenciales y comerciales con alta carga orgánica debido a que, su composición típica se encuentra constituida por excreciones

humanas, nutrientes y materia biológica, pudiendo existir también contaminantes como productos farmacéuticos, tensoactivos, entre otros (UNESCO, 2017).

### ***3.3.2. Aguas Residuales Municipales***

Su origen es principalmente doméstico. La variedad de contaminantes es bastante amplia ya que se mezclan con aguas residuales industriales y pluviales en el alcantarillado combinado, puede contener desde metales pesados hasta microorganismos patógenos (UNESCO, 2017).

### ***3.3.3. Aguas Residuales Industriales***

Son el resultado de los diferentes procesos productivos que intervienen en una determinada industria de la cual dependerá el tipo de contaminante que se genere (Ramalho, 2003).

### ***3.3.4. Escorrentías Agrícolas***

Son aquellas que arrastran fertilizantes y pesticidas, constituyendo una de las principales causas de eutrofización en lagos y pantanos (Ramalho, 2003).

## **3.4. Características de las Aguas Residuales**

Las variaciones en un caudal de aguas residuales vertidas pueden predecirse en gran medida, si se toma en cuenta factores específicos que permitan dar una caracterización correcta del tipo de agua residual que va a ser tratada. Entre ellos tenemos:

### ***3.4.1. Acidez***

Se origina a partir de la degradación de la materia orgánica el cual altera el potencial de hidrógeno (pH) al excretar compuestos ácidos o se da como resultado de la descarga de aguas residuales industriales, que contengan compuestos que alteren dichas características (Romero, 1999). En el caso de que la acidez alcance niveles altos, el efecto

corrosivo puede afectar al ecosistema, más específicamente flora y fauna. En determinadas ocasiones, las aguas industriales requieren un tratamiento de neutralización previo al tratamiento biológico.

#### **3.4.2. Alcalinidad**

Puede generarse por compuestos hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos con elementos como calcio magnesio, sodio, potasio o de amonio (Romero, 1999). Se la conoce en sí como una medida de la capacidad del agua para neutralizar ácidos.

#### **3.4.3. Demanda Biológica de Oxígeno**

Se mide en mg O<sub>2</sub>/L, es decir expresa la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para oxidar la materia orgánica del agua en un medio aerobio. Mediante esta variable, se puede determinar la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar la materia orgánica, hablando en términos biológicos, para posteriormente diseñar la unidad de tratamiento y evaluar la eficiencia de la misma.

#### **3.4.4. Demanda Química de Oxígeno**

Generalmente este parámetro es analizado para determinar la concentración de materia orgánica en aguas residuales municipales e industriales con cierta toxicidad para el medio biológico. De acuerdo con Romero (1999), la DQO es una medida que permite identificar la cantidad de oxígeno requerida para oxidar la materia orgánica por métodos químicos. El compuesto oxidante más utilizado es el dicromato de potasio el cual reacciona en medio ácido con temperaturas elevadas.

#### **3.4.5. Materia Orgánica**

La materia orgánica es aquella porción proveniente de la síntesis de compuestos orgánicos. Según Trillo et. al (1995), aproximadamente un 75% de sólidos suspendidos y

un 40% de sólidos filtrables de un agua residual promedio son de naturaleza orgánica, siendo los más abundantes las proteínas con un porcentaje de entre 40-60%, seguido de los hidratos de carbono que representan entre 25-50% y grasas y aceites que constituyen hasta el 10% de la materia orgánica.

#### **3.4.6. Nitrógeno**

El nitrógeno en el tratamiento de aguas residuales por lodos activados, representa un nutriente indispensable para el desarrollo de las bacterias. Sus formas principales son: nitrógeno orgánico, amoniacal, nitritos y nitratos (Ramalho, 2003). La concentración de nitrógeno presente en el agua residual, determinará la viabilidad de implementar un tratamiento biológico, ya que pueden existir deficiencias o excesos del nutriente, haciendo necesaria la adición o remoción del mismo, con el fin mantener un rango óptimo para el crecimiento de los microorganismos.

#### **3.4.7. Oxígeno Disuelto**

La concentración de oxígeno disuelto es un determinante de la vida acuática aerobia. Su deficiencia impide a un cuerpo de agua autopurificarse.

Su rango en aguas dulces se encuentra en 7 mg/L a 35°C y 14,6 mg/L a 0°C, no obstante, de acuerdo con Ramalho (2003), para el tratamiento de aguas residuales con lodos activados la aireación proporcionada debe mantener satisfecha la demanda de la masa microbial dejando a su vez una concentración residual de OD de 2 mg/L.

#### **3.4.8. pH**

El pH indica la concentración de iones de hidrógeno en el agua. Su medida es muy importante en el tratamiento de aguas residuales por lodos activados, debido a que se debe mantener un rango entre 6,5 y 8,5 para que las bacterias puedan consumir la materia

orgánica. Si el pH se encuentra fuera de rango, las condiciones impulsan el crecimiento de microorganismos no deseados como los hongos que se desarrollan con pH menor a 6 e inhiben el crecimiento de las bacterias (Romero, 1999).

### **3.5. Composición de las Aguas Residuales**

La variedad de contaminantes presentes en las aguas residuales, así como sus concentraciones, dependen de la actividad desarrollada a partir de la cual se genera el efluente. Sin embargo, Noyola (2013) menciona que, las aguas residuales municipales son más homogéneas en su composición, por consiguiente, su tratamiento es relativamente fácil. En ciertos casos se puede generar diseños de plantas de tratamiento confiables, sin realizar caracterizaciones profundas del agua vertida.

Según Ramalho (2003), las aguas pueden tener 3 tipos de contaminantes: químicos, físicos, y biológicos. La contaminación química de las aguas puede darse tanto por compuestos químicos orgánicos o inorgánicos, los primeros son aquellos que producen la disminución del oxígeno en el agua por el proceso natural de degradación biológica, mientras que los inorgánicos llegan a tener efectos tóxicos, pudiendo ser más perjudiciales que la contaminación por compuestos orgánicos. Pueden presentar contaminantes físicos, que pueden ser fácilmente perceptibles como, el color, temperatura, turbidez, radiactividad y espuma. Por otro lado, también pueden contener agentes biológicos que muchas veces son patógenos responsables de la transmisión de enfermedades (UNESCO, 2017). Enfatizando en los diferentes tipos de aguas residuales y sus contaminantes es necesario realizar la caracterización de las mismas para proveer un tratamiento óptimo.

A continuación, se observan los constituyentes encontrados en las aguas residuales además de sus límites máximos permisibles para Descargas al Alcantarillado Público

dentro de la legislación ambiental vigente en la República del Ecuador, de donde se tomarán los parámetros a ser analizados después de haber concluido con la campaña de muestreo Tabla 2.

**Tabla 2**

*Límites de Descarga al Sistema de Alcantarillado Público*

<b>Parámetros</b>	<b>Expresado como</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite máximo permisible</b>
<b>Aceites y grasas</b>	Sustancias solubles en hexano	mg/l	<b>100</b>
<b>Alkil mercurio</b>		mg/l	<b>No detectable</b>
<b>Ácidos o bases que puedan causar contaminación, sustancias explosivas o inflamables.</b>		mg/l	<b>Cero</b>
<b>Aluminio</b>	Al	mg/l	<b>5,0</b>
<b>Arsénico total</b>	As	mg/l	<b>0,1</b>
<b>Bario</b>	Ba	mg/l	<b>5,0</b>
<b>Cadmio</b>	Cd	mg/l	<b>0,02</b>
<b>Carbonatos</b>	CO <sub>3</sub>	mg/l	<b>0,1</b>
<b>Caudal máximo</b>		l/s	<b>caudal promedio horario del sistema de alcantarillado</b>
<b>Cianuro total</b>	CN <sup>-</sup>	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Cobalto total</b>	Co	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Cobre</b>	Cu	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Cloroformo</b>	Extracto carbón cloroformo (ECC)	mg/l	<b>0,1</b>
<b>Cloro Activo</b>	Cl	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Cromo Hexavalente</b>	Cr <sup>+6</sup>	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Compuestos fenólicos</b>	Expresado como fenol	mg/l	<b>0,2</b>



<b>Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)</b>	D.B.O <sub>5</sub> .	mg/l	<b>250</b>
<b>Demanda Química de Oxígeno</b>	D.Q.O.	mg/l	<b>500</b>
<b>Dicloroetileno</b>	Dicloroetileno	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Fósforo Total</b>	P	mg/l	<b>15</b>
<b>Hierro total</b>	Fe	mg/l	<b>25,0</b>
<b>Hidrocarburos Totales de Petróleo</b>	TPH	mg/l	<b>20</b>
<b>Manganeso total</b>	Mn	mg/l	<b>10,0</b>
<b>Materia flotante</b>	Visible		<b>Ausencia</b>
<b>Mercurio (total)</b>	Hg	mg/l	<b>0,01</b>
<b>Níquel</b>	Ni	mg/l	<b>2,0</b>
<b>Nitrógeno Total Kjedahl</b>	N	mg/l	<b>40</b>
<b>Plata</b>	Ag	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Plomo</b>	Pb	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Potencial de hidrógeno</b>	pH		<b>5-9</b>
<b>Sólidos Sedimentables</b>		ml/l	<b>20</b>
<b>Sólidos Suspendidos Totales</b>		mg/l	<b>220</b>
<b>Sólidos totales</b>		mg/l	<b>1 600</b>
<b>Selenio</b>	Se	mg/l	<b>0,5</b>
<b>Sulfatos</b>	SO <sup>=</sup> <sub>4</sub>	mg/l	<b>400</b>
<b>Sulfuros</b>	S	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Temperatura</b>	°C		<b>&lt; 40</b>
<b>Tensoactivos</b>	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	<b>2,0</b>
<b>Tricloroetileno</b>	Tricloroetileno	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Tetracloruro de Carbono</b>	Tetracloruro de carbono	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Sulfuro de carbono</b>	Sulfuro de carbono	mg/l	<b>1,0</b>
<b>Compuestos organoclorados (totales)</b>	Concentración de organoclorados totales.	mg/l	<b>0,05</b>

<b>Organofosforados y carbamatos (totales)</b>	Concentración de Organofosforados y carbamatos totales.	mg/l	<b>0,1</b>
<b>Vanadio</b>	V	mg/l	<b>5,0</b>
<b>Zinc</b>	Zn	mg/l	<b>10</b>

*Nota:* La tabla indica los contaminantes de las aguas residuales y sus límites de descarga al alcantarillado público de acuerdo con la normativa nacional aplicable. Fuente: (Ministerio del Ambiente, 2017)

### **3.6. Efectos de las Aguas Residuales**

Las aguas residuales al ser vertidas en el medio ambiente sin un tratamiento previo, son un potencial generador de impacto, tanto en el medio acuático como terrestre. Una vez que las descargas han salido de su fuente, los contaminantes que poseen serán transportados por los cauces naturales o se infiltrarán a través de la corteza terrestre, alcanzando en ocasiones los yacimientos de agua subterránea.

#### **3.6.1. Efectos en la Salud Humana**

La salud pública es uno de los principales factores o elementos para el desarrollo óptimo de una población, como son los sistemas de saneamiento en los hogares, los cuales, son cada vez más sofisticados, sin embargo, el riesgo de enfermedades por la mala gestión permanece. Principalmente en países tercermundistas, las enfermedades relacionadas con el saneamiento de aguas residuales son comunes, debido a que se le ha dado uso en la producción de alimentos, consumo y recreación (UNESCO, 2017).

#### **3.6.2. Efectos Ambientales**

Las aguas residuales sin tratar o que han recibido un tratamiento deficiente, tienen una gran repercusión en los ecosistemas. El exceso de nutrientes propios de las aguas residuales domésticas son un detonante para la eutrofización, destruyendo la biodiversidad endémica debido al crecimiento de algas potencialmente tóxicas. Regiones de África, Asia

y América Latina han sido las más afectadas por la contaminación del agua debido a actividades antrópicas como la agricultura o el crecimiento demográfico (UNESCO, 2017).

### ***3.6.3. Efectos Económicos***

El agua es un recurso fundamental en el desarrollo económico, principalmente en la producción industrial, turismo, pesca, acuicultura entre otras. La dependencia del agua en las actividades productivas es altamente significativa, por lo cual, el deterioro de su calidad afecta directamente a la economía de una comunidad humana. Actividades como la agricultura son las más afectadas, debido a que el riego a los cultivos con agua de mala calidad genera productos contaminados no aptos para el consumo humano, de igual manera, el turismo resulta perjudicado, debido a la pérdida de atractivos naturales o a la generación de factores desfavorables como malos olores y contaminación visual (UNESCO, 2017).

### **3.7. Introducción al Tratamiento de Aguas Residuales**

Con el paso de los años y los avances de la tecnología, la variedad de tratamientos que existentes son cada vez más sofisticados, más eficientes y de menores costos, siendo a su vez específicos para cada tipo de agua residual. El grado de contaminación de las aguas residuales, dependen directamente del proceso para la que fue empleada, por esta razón la variación de contaminantes que presentan es bastante amplia.

Actualmente se aprovechan varias fuentes naturales de agua tanto para el consumo humano como para sus diferentes actividades, entre ellas tenemos las aguas superficiales, aguas subterráneas y aguas meteorológicas. Las más utilizadas debido a su facilidad de acceso son las superficiales que engloban a los océanos, lagos, ríos y embalses. Por otro lado, las aguas subterráneas generalmente muestran una menor turbidez. De acuerdo con

Ramalho (2003), el tipo de agua con un mayor grado de pureza física y química es el agua meteorológica o agua de lluvia.

### 3.8. Contaminantes de las Aguas Residuales

Como se ha mencionado anteriormente, el tipo de contaminantes presentes en las aguas residuales están en función del proceso para el que fueron utilizadas, considerando que el agua es un componente básico para casi toda actividad humana se enumeran los contaminantes más representativos que afectan a este recurso (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Contaminantes de las Aguas Residuales*

<b>Contaminante</b>	<b>Parámetro Típico de Medida</b>	<b>Impacto Ambiental</b>
<b>Materia Orgánica Biodegradable</b>	DBO, DQO	Desoxigenación del agua
<b>Materia Suspendida Patógenos</b>	SST, SSV	Turbiedad en el agua
<b>Amoníaco</b>	NH <sub>4</sub> - N	Alteración en la calidad del agua, restricción de uso y consumo
<b>Fósforo</b>	Ortofosfato	Desoxigenación del agua, toxicidad para organismos acuáticos
<b>Materiales tóxicos</b>	Materiales tóxicos específicos	Proliferación de algas
<b>Sales inorgánicas</b>	SDT	Destrucción de flora y fauna
<b>Energía térmica</b>	Temperatura	Destrucción de la calidad del agua
<b>Iones hidrógeno</b>	pH	Reducción de concentración de saturación de oxígeno en el agua, alteraciones en el desarrollo de organismos acuáticos
		Destrucción de biota acuática

*Nota:* La tabla indica los contaminantes típicos de las aguas residuales y los impactos que generan. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Ramalho, 2003)

### 3.9. Clasificación de los Tratamientos de Aguas Residuales

El tipo de tratamiento para un proyecto en específico, se seleccionará en base a los objetivos de tratamiento planteados previamente, todo acorde con la normativa legal aplicable y grado de tratamiento necesario.

#### 3.9.1. *Tratamiento Primario*

El tratamiento primario emplea métodos físicos principalmente para la remoción de sólidos y preparar a las aguas residuales para pasar a un tratamiento secundario, por esta razón también se le conoce como pretratamiento. Existen varios tipos de operaciones o procesos que forman parte de este tratamiento, entre ellas mencionaremos las empleadas por la empresa RASTRO (Tabla 4).

**Tabla 4**

*Tratamiento primario en la PTAR de la empresa RASTRO*

N/A	Aplicación	Tamaño de partícula removida
<b>Tamizado</b>	Remoción de partículas	>15 mm
<b>Tanque homogenizador 1</b>	Mantiene un caudal constante e iguala sus características	N/A
<b>Dilaceración</b>	Tritura partículas que no se removieron en el tamizado	6 mm
<b>Tanque homogenizador 2</b>	Homogeniza las características del agua residual preparándolas para el proceso biológico	N/A

*Nota:* La tabla indica el tratamiento primario aplicado en la PTAR de la empresa RASTRO. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Torres, 2003)

#### 3.9.2. *Tratamiento Secundario*

Existen varios tipos de tratamientos secundarios en los cuales se incluye el tratamiento con lodos activos y sus variantes. Se basa en la capacidad de los microorganismos para degradar la materia orgánica y en la eliminación de cierto tipo de sólidos.

Los tratamientos secundarios pueden ser aerobios, anaerobios o combinados, dependiendo del nivel de tratamiento que requiere el agua residual. En la PTAR de la empresa RASTRO el tratamiento secundario se basa en un tanque de aireación de mezcla completa donde se encuentran los lodos activados, posterior, se conecta a una cámara de sedimentación conocida como sedimentador secundario o clarificador secundario (Torres, 2005).

Por otro lado, los sistemas anaerobios tratan el agua residual sin la necesidad de proporcionar aireación. En este tipo de tratamiento se aprovechan los gases generados, tales como metano y dióxido de carbono. Los microorganismos encargados de la descomposición de la materia en este caso son bacterias acidogénicas y metanogénicas, las primeras encargadas de fermentar la materia orgánica y las segundas se encargan de transformarla en compuestos gaseosos.

### ***3.9.3. Tratamiento Terciario***

El tratamiento terciario unifica procesos físicos y químicos para higienizar el agua o prepararla para un fin, el cual puede ser el consumo humano, usos industriales, disposición final en el alcantarillado público o un cuerpo natural de agua. Los procedimientos físicos del tratamiento terciario pueden incluir la ósmosis inversa y distintos niveles de filtración, mientras que los procesos químicos pueden ser la desinfección, precipitación química, adsorción entre otras.

### **3.10. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales con Lodos Activados**

Empleado principalmente en aguas domésticas, municipales e industriales, el sistema de lodos activados es uno de los tratamientos más comunes, gracias a su eficiencia, simplicidad y costos. Se basa en el metabolismo de un determinado tipo de

microorganismos que consumen la materia orgánica presente en el agua residual. Esta interacción se produce en un tanque llamado biorreactor, el cual ofrece las condiciones óptimas para el crecimiento y reproducción de los microorganismos bajo condiciones controladas, generando una masa activa conocida como lodo activo.

De acuerdo con Espinosa (2010), el tanque de aireación es un reactor de crecimiento en suspensión donde los microorganismos consumen y oxidan el aporte de donantes orgánicos de electrones generalmente medido como DBO. Aquí, se genera el llamado licor de mezcla, que es la combinación del lodo activado con el agua residual dentro del biorreactor. Se introduce aire con el fin de abastecer de oxígeno al sistema, al mismo tiempo ayuda a homogenizar el caudal y permite a los microorganismos la remoción de la materia orgánica de manera eficiente.

El proceso de tratamiento continúa en un tanque de sedimentación también conocido como clarificador, donde como su nombre lo indica, los sólidos precipitan hacia el fondo del tanque dejando en la parte superior un agua mucho más clara. El lodo que se deposita en el fondo será recirculado hacia el biorreactor mediante bombas, varias veces hasta finalizar su vida útil, para posteriormente realizar una purga.

A continuación, el agua será dirigida a un proceso de desinfección empleando floculación y coagulación para eliminar los sólidos suspendidos restantes. Finalmente, se eliminan los agentes patógenos mediante cloración. En esta etapa final los parámetros del caudal deben cumplir con la normativa aplicable para ser descargado en el sistema de alcantarillado público.

### **3.11. Antecedentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) de la EMRAQ-EP**

La empresa pública EMRAQ-EP posee un departamento de gestión ambiental el cual es el responsable de garantizar que todos sus procesos sean manejados bajo la normativa legal vigente (Mendoza, 2017).

Las aguas residuales generadas en la empresa requieren un tratamiento previo para su descarga al alcantarillado cumpliendo con todas las características de calidad de agua tratada impuestas por las Autoridades locales de Medio Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito (Torres, 2003).

La PTAR fue diseñada y construida en el año 2003 por la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento de Quito (EMAAP), entidad que, durante un periodo de 10 años estuvo a cargo de la operación y mantenimiento de la planta a través de un convenio de cooperación institucional. A partir del 11 de diciembre del 2013 la empresa EMRAQ-EP está a cargo de la PTAR hasta la fecha presente (Mendoza, 2017).

### **3.12. Antecedentes del Modelamiento**

MacCarty y Lawrence (1970) en su libro detallado “Unified Basis for Biological Treatment Design and Operation” desarrollaron uno de los modelos más conocidos y usados para el diseño de una planta de tratamiento para aguas residuales utilizando lodos activos, este modelo tiene esquemas simples que consideran una dinámica estacionaria donde la DBO y DQO total son parámetros de caracterización.

El diseño de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales sufre modificaciones innovadoras tanto teóricas como prácticas, lo cual constituye un nuevo



paradigma entre el enfoque clásico empírico supliendo las necesidades de mecanismos de modelación más precisos (Díaz, 2003).

Estos modelos biológicos con simulación dinámica presentan virtudes de exactitud y predicción de diseño, dejando de lado los métodos mecanísticos antiguos para el diseño de plantas de tratamiento por el amplio rango de error (Díaz, 2003).

Según el libro “Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca” detalla que; un grupo de científicos de renombre supervisados por la IAWQ (International Association of Water Quality) desarrollan modelos con lodos activos, con el fin de que estos puedan evolucionar progresivamente y ser ampliados con el avance de los años y la tecnología (Navía y Fall, 2010).

La IAWQ fomentó la formación de un grupo de estudio internacional para el avance de la modelación dinámica para el tratamiento de aguas residuales, los primeros enfoques fueron hacia los modelos anteriores para diseño de PTAR y resolver sus obstáculos para desarrollarse (Díaz, 2003). Por otro lado, la dificultad de los modelos dinámicos para su representación y limitaciones en la capacidad de las computadoras fueron un impedimento para su divulgación (Díaz, 2003).

La universidad de Cape Town en los años 70 impulsó la modelación dinámica basados en trabajos de universidades en Europa y E.E.U.U, en 1980 se formó el primer grupo de estudio de la IAWQ (Díaz, 2003).

En 1987 por medio de las conclusiones en el informe “Task Group on Mathematical Modelling for Design and Operation of Activated Sludge Processes” se publica el modelo ASM1, el cual describe el comportamiento de la materia orgánica, la nitrificación y desnitrificación con respecto a su degradación en lodos activos (Navía y Fall, 2010). En el

informe consta principalmente un modelo con notación matricial, parámetros, valores preestablecidos, el fraccionamiento de la DQO para diferenciar las aguas y los lodos activos, un código de programación para el desarrollo de softwares en un futuro y la estandarización de los símbolos de las variables (Navía y Fall, 2010).

Existen varios softwares basados en los principios y conceptos del modelo ASM1, estos poseen algunas modificaciones para facilitar su diseño, operación y con fines de investigación (Tabla 5)

**Tabla 5**

*Softwares especializados en modelamiento y simulación de una PTAR*

<b>SIMULADOR</b>	<b>CREADOR</b>	<b>PAÍS ORIGEN</b>
<b>ASIM</b>	EAWAG	Suiza
<b>DESASS</b>	Calagua group – UPV	España
<b>BIOWIN</b>	Envirosim L.d	Canadá
<b>EFOR</b>	DHI.Inc	Dinamarca
<b>GPS-X</b>	Hydromantis Inc.	Canadá
<b>SIMBA</b>	IFAK-System Gmbh	Alemania
<b>STOAT</b>	WRc Group	Reino Unido
<b>WEST</b>	Hemmin N.V	Bélgica
<b>EDAR 1.0</b>	Ceit-Cadagua	España
<b>AQUASIM</b>	EAWAG	Suiza

*Nota:* La tabla indica los softwares más conocidos a nivel mundial para el modelamiento y simulación de una PTAR. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

### **3.13. Introducción al Modelado y Simulación**

#### **3.13.1. Modelado**

Un modelo puede definirse de forma general como la descripción, formulación o ecuación de una serie de procesos que expresan las características fundamentales de un sistema o proceso físico.

Los modelos se formulan mediante un balance de masas tomando en cuenta los procesos de transformación de la materia y la cinética de la reacción (Loaiza, 2007). Se puede categorizar varios tipos de modelos, los cuales pueden ser: físicos, verbales o conceptuales y matemáticos.

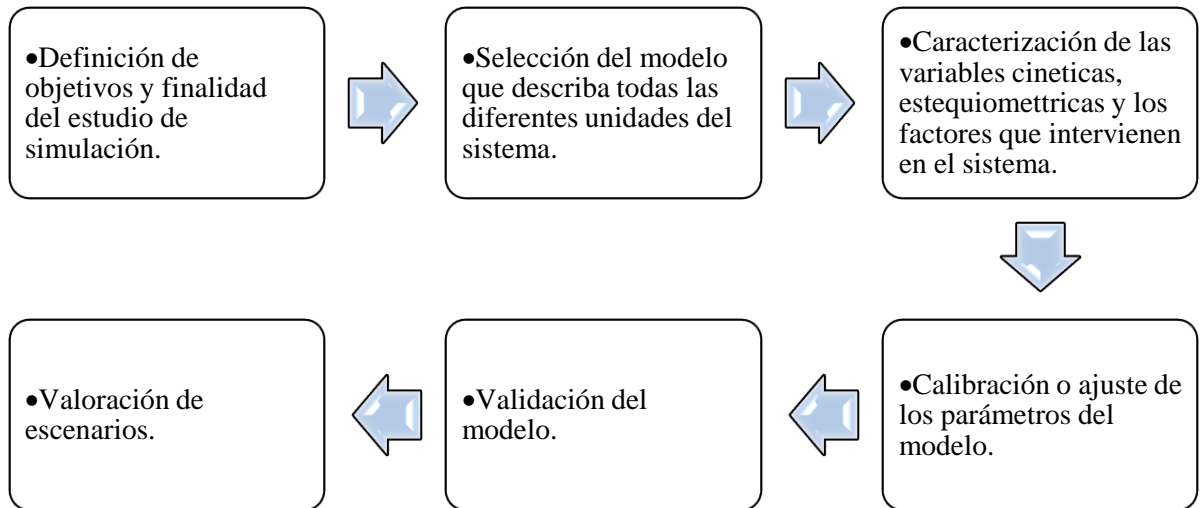
Los modelos físicos son una representación a escala de laboratorio o piloto tangible del sistema que se va a modelar. Los modelos verbales o conceptuales parten de una observación detallada de las características cualitativas del sistema, se representa por medio de esquemas, diagramas simples o de flujo. El modelo matemático describe de forma cuantitativa al sistema de estudio detallando los diferentes procesos y/o reacciones e interacciones estequiométricas y cinéticas (López et. al, 2008).

#### **3.13.2. Construcción de un Modelo**

La construcción del modelo se realiza con el fin de satisfacer los objetivos del estudio, por lo que estos deben ser correctamente definidos. Como se observa en la Figura 3, los modelos deben ser caracterizados, parametrizados y calibrados para finalmente por ser evaluados.

### Figura 3

#### Construcción de un modelo



*Nota:* La figura indica el procedimiento para la construcción exitosa de un modelo en general. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (López et. al, 2008).

En la modelación los factores tiempo y escala son importantes respecto a la duración de los procesos que se generan en el sistema se puede definir en tres grupos los cuales se representan en la Figura 4:

#### Figura 4

*Estados de un modelo para la simulación*



*Nota:* La figura se identifican los estados en los que se puede realizar la simulación de un modelo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (López et. al, 2008).

Para la descripción de las transformaciones de las variables y sus estados se aplican los modelos dinámicos los cuales se encuentran en función del tiempo, mientras que, los modelos estáticos describen transformaciones no significativas conforme transcurren los procesos (López et, al, 2008).

Existen procesos con reacciones tan veloces que pueden ser definidos como un estado estacionario o de equilibrio. No requieren ser descritos dinámicamente, debido a su velocidad, se puede concluir que se encuentran en estado de equilibrio o que el proceso se ha realizado por completo.

Los modelos se relacionan a través de ecuaciones y leyes de la conservación de la materia, las cuales representan procesos individuales describiendo así los cambios de estado en el sistema por medio de variables de estado (DQO, OD, NTK, concentraciones, SS). Para resolver estas variables, las cuales se encuentran compuestas por ecuaciones algebraicas o ecuaciones diferenciales parciales y/o totales, se requiere un software o programa especializado (Loaiza, 2007).

### ***3.13.3. Simulación***

Consiste en diseñar, desarrollar o experimentar un modelo matemático de un sistema o proceso, y comprobar experimentalmente el funcionamiento y comportamiento real del sistema modelado y/o evaluar varias estrategias para su operación u optimización.

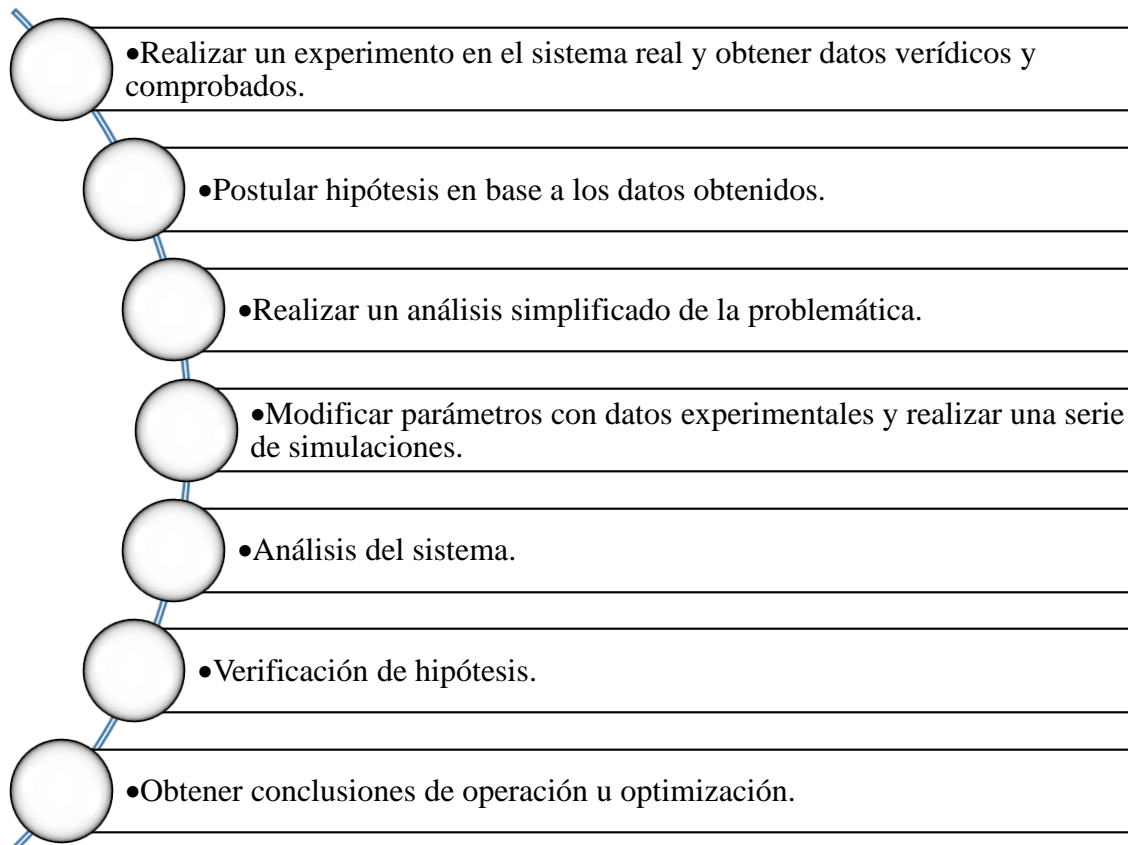
La simulación puede realizarse a escala más pequeña o por medio de un ordenador dependiendo de los recursos económicos, tiempo, dinámica y la complejidad del sistema o modelo (González, 2017).

### ***3.13.4. Importancia de la Simulación***

La simulación nos permite realizar un análisis del comportamiento del sistema real y experimentar con escenarios aleatorios controlados. El sistema típico de los descubrimientos científicos se observa en la Figura 5.

**Figura 5**

*Importancia de la simulación*



*Nota:* La figura demuestra la importancia del modelado y simulación en sistemas generales. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Hydromantis E. S., 2017)

### **3.14. Fundamentos de Modelado y Simulación de una PTAR**

El modelado de una PTAR enfocados en los tanques y reactores se trata de una descripción matemática de los procesos generados en el sistema de estudio.

Los modelos en la PTAR se expresan por medio de balances de materia, la cinética de reacción, la hidrodinámica y el transporte de contaminantes.

Cada proceso del sistema de forma individual está ligado a la ley de conservación de la materia. Se consideran las variables de estado (NTK, DQO, concentraciones de

biomasa), para realizar los balances de masa que describen los cambios del sistema (González, 2017).

Existen programas o softwares especializados para la resolución de modelos en el tratamiento de aguas residuales. Estos modelos están compuestos por un sistema de ecuaciones diferenciales totales o parciales regidas por la ley de la conservación de la materia.

Para la representación e implementación de modelos necesarios en la simulación de una PTAR y lograr su entendimiento se requiere lo siguiente:

- Lista de componentes representados por variables de estado involucradas en los procesos es decir la matriz de concentraciones
- Detalle de los procesos de degradación que afectan a los componentes: coeficientes estequiométricos, expresiones cinéticas, modelos bioquímicos.
- Representación del diagrama de flujo de la PTAR
- Funcionamiento y clasificación de la dispersión y mezcla interna dependiendo del tipo de reactor y sistema.

Un requisito fundamental para usar modelos, es establecer los límites de concentración de contaminantes a la salida de los reactores para poder diseñar y operar una PTAR. (González, 2017).

### **3.15. Selección Modelos de Lodos Activados**

Se han creado varios modelos matemáticos los cuales fueron desarrollados en los años 90.

Como se muestra en la Figura 6, estos modelos describen la transformación y/o degradación biológica en el tratamiento de aguas residuales por medio de los lodos activados.



**Figura 6**

*Diferencias entre modelos de lodos activados*

Modelo	Nitrificación	Desnitrificación	Descomposición Heterotrófica / autótrofica	Hidrólisis	EBPR	PAO Desnitrificantes	Lisis de PAO / PHA	Fermentación	Remoción química de fósforo	Reacciones	Variables de estado	Referencias
UCTOLD	●	●	MR, Cst	AE						8	13	Dold <i>et al.</i> , 1980, 1991
ASM1	●	●	MR, Cst	AE						8	13	Henze <i>et al.</i> , 1987
ASM3	●	●	RE, EA	Cst						12	13	Gujer <i>et al.</i> , 1999
UCTPHO	●	●	MR, Cst	AE	●		Cst	●		19	19	Wentzel, 1988, 1989a,b
ASM2	●	●	MR, Cst	AE	●		Cst	●	●	19	19	Henze <i>et al.</i> , 1995
ASM2d	●	●	MR, Cst	AE	●	●	Cst	●	●	21	19	Henze <i>et al.</i> , 1999
B&D	●	●	MR, Cst	AE	●	●	AE	●		36	19	Barker and Dold, 1997
TUDP	●	●	MR, Cst	AE	●	●	AE	●		21	17	Meijer, 2004
ASM3-bioP	●	●	RE, AE	Cst	●	●	AE			23	17	Rieger <i>et al.</i> , 2001

PAO Desnitrificantes, actividad de los PAO desnitrificantes incluida en el modelo; MR, concepto de muerte y regeneración; AE, dependiente del aceptor de electrones; RE, concepto de respiración endógena; Cst= independiente del aceptor de electrones

*Nota:* En la figura se observan los diferentes modelos de lodos activados y algunas de sus características. Elaborado por: (López et. al. 2008)

La IWA desarrolló los modelos de lodos activados más conocidos y utilizados, denominados: ASM1, ASM2 y ASM3, los cuales son capaces de simular la remoción de materia y la desnitrificación. El modelo ASM1 es el más utilizado a nivel de ingeniería, experimental y científico. El ASM3 fue desarrollado posteriormente para así lograr corregir defectos conceptuales de su predecesor (Loaiza, 2007).

### 3.16. Modelos ASM

El modelo de lodos activados ASM en general se desarrollaron para describir la tasa de consumo de materia orgánica, la producción de lodos y las conversiones de nitrógeno y fósforo dependiendo del modelo aplicado (Henze et. al, 2000).

Estos modelos deben adaptarse y calibrarse con forme esté diseñada la PTAR con especificaciones físicas cinéticas y químicas.

La calibración se entiende como la adaptación de un modelo, el cual puede describir los procesos de tratamiento y obtener información real e hipotética de la PTAR bajo estudio. Con el desarrollo del modelo ASM1 logra obtener un buen ajuste en la producción de lodos con lo cual se evalúan las discrepancias y se ejecutan los reajustes de datos a través de un balance de masas (Rodríguez y Espinoza, 2015).

### ***3.16.1. Modelo ASM1***

El modelo está representado de una forma general y simplificada con la capacidad de predicciones realistas de sistemas que involucra a la oxidación de materia carbonosa, nitrificación y desnitrificación (Jácome y Suárez, 2013). Las variables de estado del modelo ASM1 se observan en la Tabla 6.

**Tabla 6***Variables de estado del modelo ASM1*

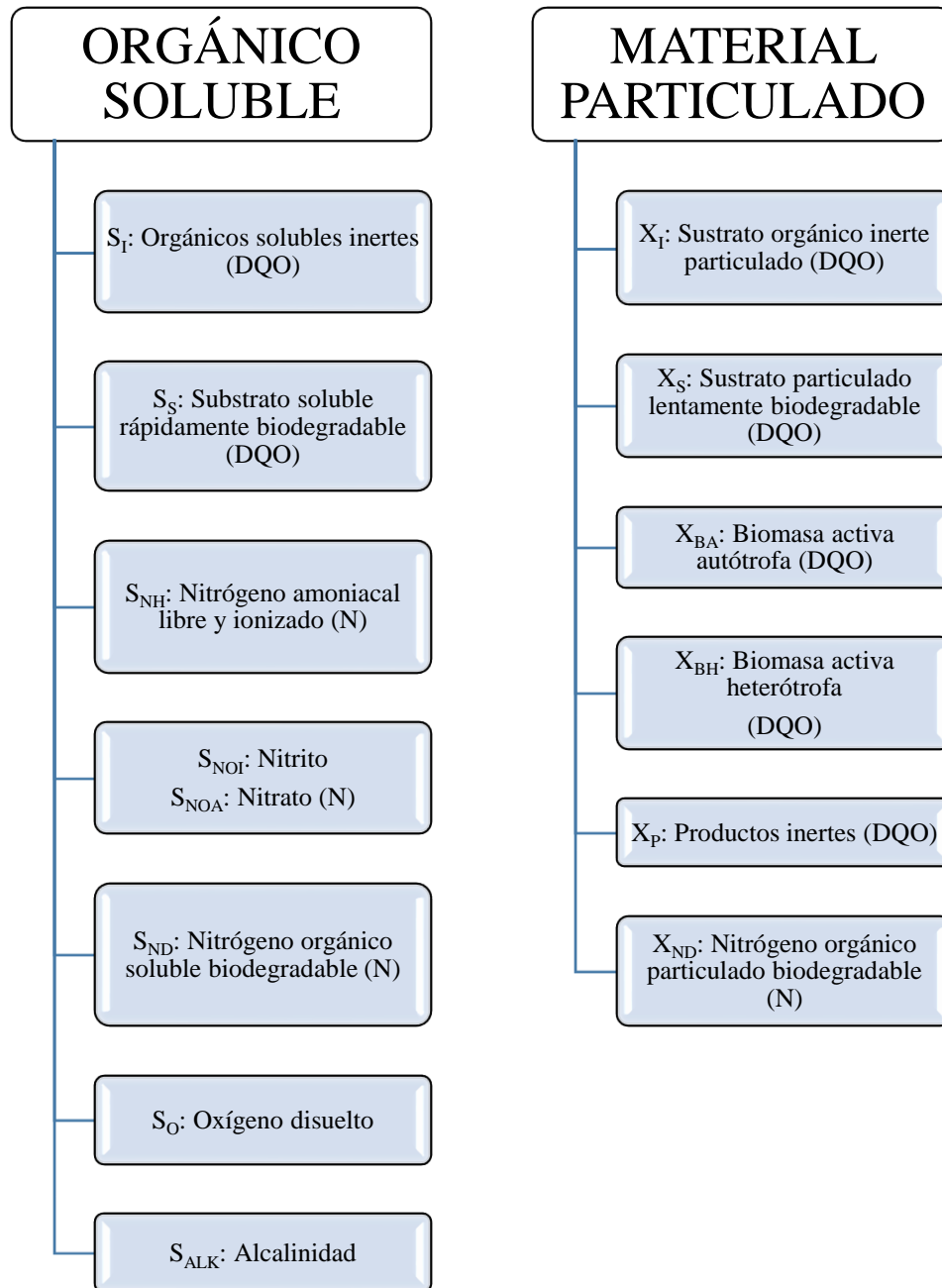
<b>VARIABLES DE ESTADO DEL ASM1</b>		
<b>Si</b>	Orgánicos solubles inertes	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>Ss</b>	Substrato soluble rápidamente biodegradable	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>Xi</b>	Sustrato orgánico inerte particulado	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>Xs</b>	Sustrato particulado lentamente biodegradable	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>X<sub>BH</sub></b>	Biomasa activa heterótrofa	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>X<sub>BA</sub></b>	Biomasa activa autótrofa	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>X<sub>II</sub></b>	Materia particulada inerte producto del decaimiento	g DQO/m <sup>3</sup>
<b>S<sub>O</sub></b>	Oxígeno disuelto	g DQO/m <sup>3(-)</sup>
<b>S<sub>NOI</sub> y S<sub>NOA</sub></b>	Nitritos y nitratos	g N/ m <sup>3</sup>
<b>S<sub>NH</sub></b>	Nitrógeno amoniacal libre y ionizado	g N/ m <sup>3</sup>
<b>S<sub>ND</sub></b>	Nitrógeno orgánico soluble biodegradable	g N/ m <sup>3</sup>
<b>X<sub>ND</sub></b>	Nitrógeno orgánico particulado biodegradable	g N/ m <sup>3</sup>
<b>A<sub>ALK</sub></b>	Alcalinidad	u. molares

*Nota:* La tabla indica las variables de estado del modelo ASM1. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.  
Fuente: (Loaiza, 2007)

El modelo presenta una notación matricial definido por 13 componentes. Se deriva en 7 de materia orgánica soluble y 6 de material particulado, las cuales están representadas en la Figura 7.

**Figura 7**

*Componentes del modelo ASM1*



*Nota:* La figura identifica los componentes orgánicos solubles y el material particulado característico del modelo ASM1. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Espinosa, 2010)

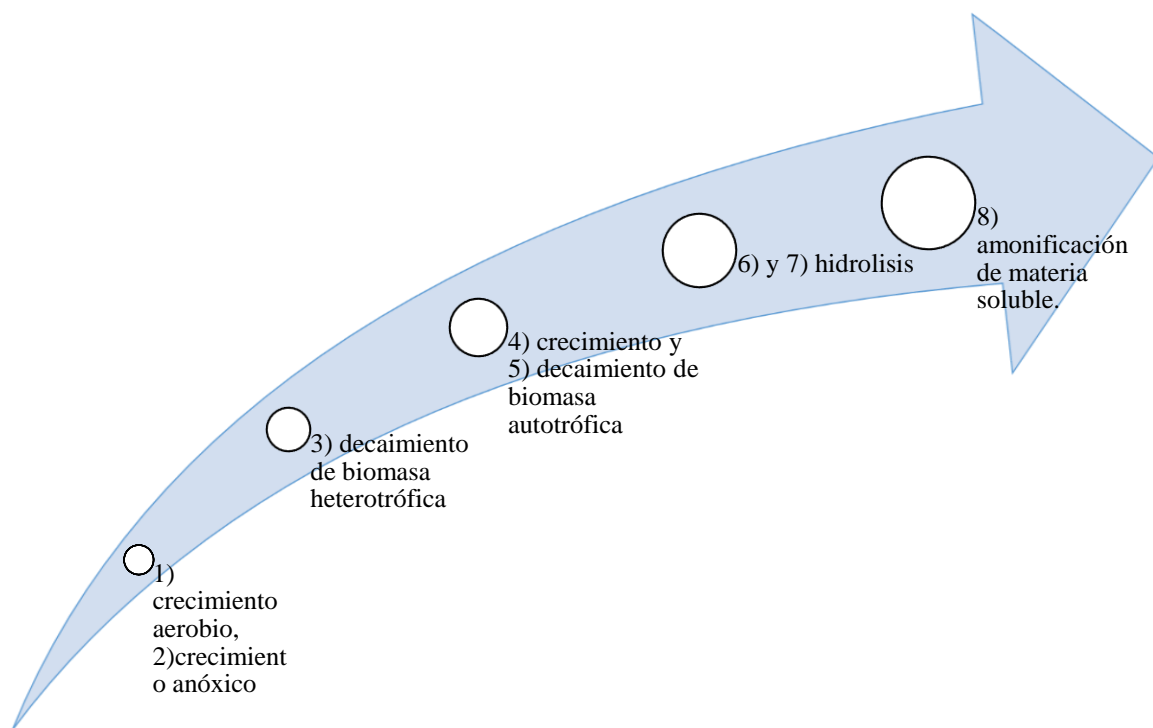
Los primeros 7 componentes están relacionados con la materia orgánica y los lodos medidos el oxígeno y la alcalinidad, los 6 siguientes componentes están relacionados con la DQO y nitrificación contenidos en la materia particulada.

El modelo aplica la DQO como componente ya que por medio de este parámetro se logra realizar los balances de masa. La materia orgánica contenida en las aguas residuales, por medio de la DQO, se divide en biodegradable, no biodegradable y fracción de biomasa (Rodriguez y Espinoza, 2015).

El modelo ASM1 describe 8 procesos los cuales están representados en la Figura 8.

### Figura 8

#### *Procesos del modelo ASM1*



*Nota:* La figura expresa los procesos biológicos característicos del modelo ASM1. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Rodriguez y Espinoza, 2015)

La DQO biodegradable describe el sustrato para el crecimiento de la biomasa heterotrófica, la cual genera la oxidación carbonosa y la desnitrificación.

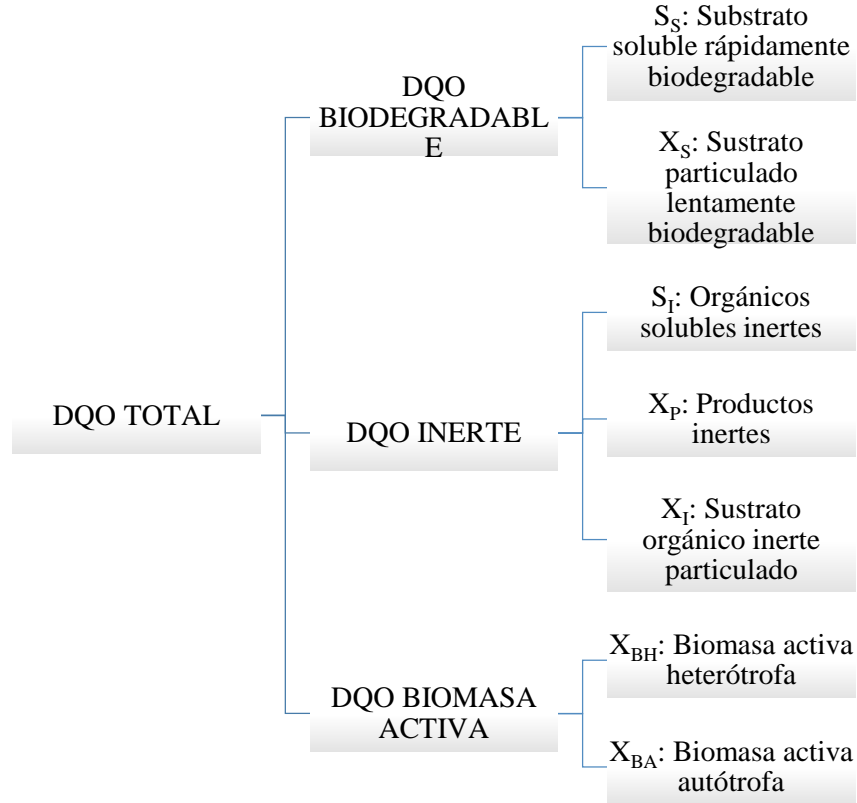
La DQO carbonácea está compuesta por las fracciones biodegradables, no biodegradables y la fracción de biomasa activa como se muestra en la Figura 9.

La fracción biodegradable se divide en una fracción de biodegradación rápida y una de biodegradación lenta ( $S_s$  soluble y  $X_s$  particulada respectivamente).

La fracción no biodegradable está compuesta por la fracción soluble inerte y una fracción particulada inerte ( $S_i$  y  $X_i$  respectivamente), que no son alteradas durante el proceso. Su eliminación es por medio del efluente sedimentado y en la purga de lodos (Loaiza, 2007).

**Figura 9**

*Fracciones de DQO de los lodos activados*

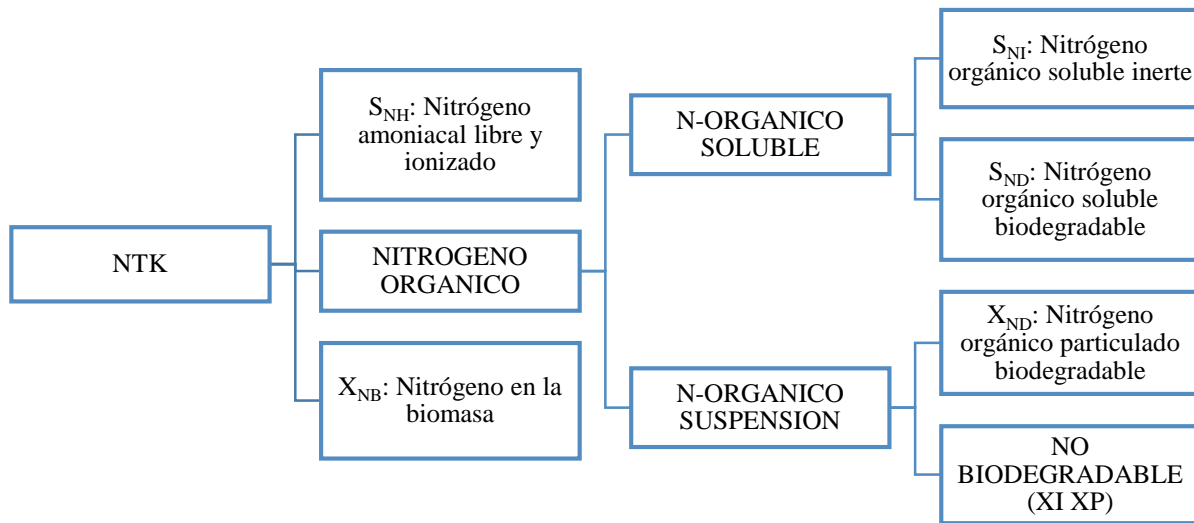


*Nota:* La figura indica las fracciones que componen a la DQO total, siendo la variable de caracterización más utilizada. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Jácome y Suarez, 2013)

El nitrógeno total está conformado por nitratos, nitritos ambos solubles y también por el nitrógeno total Kjendahl, donde los nitritos y nitratos se combinan en un solo componente para facilitar el modelo, por otro lado, el nitrógeno Kjendahl se divide en amoniacal, orgánico y contenido en la biomasa activa, la cual se divide en heterótrofos y autótrofos como se observa en la Figura 10.

**Figura 10**

*Fraccionamiento de los componentes nitrogenados de los lodos activados*



*Nota:* La figura indica las fracciones que componen al Nitrógeno Total Kjeldahl, tomándolo como una variable de caracterización de influente. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Jácome y Suarez, 2013)

### 3.17. Estequiometría y Cinética

En el tratamiento de aguas residuales el balance de masas es primordial en el estudio. Se toma en cuenta la cinética de reacción en los procesos de transformación y la estequiometría, describiendo las relaciones cuantitativas entre los reactivos y la materia orgánica durante el transcurso de una reacción química (Jacome y Suárez, 2013).

#### 3.17.1. Estequiometría

Al definir un sistema se deben considerar los compuestos primordiales en cada proceso ya que aportan en gran cantidad a la masa total del sistema, también es importante representar los balances necesarios para así lograr cumplir con la ley de conservación de la materia.



Algunos parámetros como la DQO, Nitrógeno, fósforo, alcalinidad son claros ejemplos de balances conservacionistas de materia, con la ayuda de formulación de ecuaciones es posible calcular los coeficientes estequiométricos respectivos (López et. al, 2008).

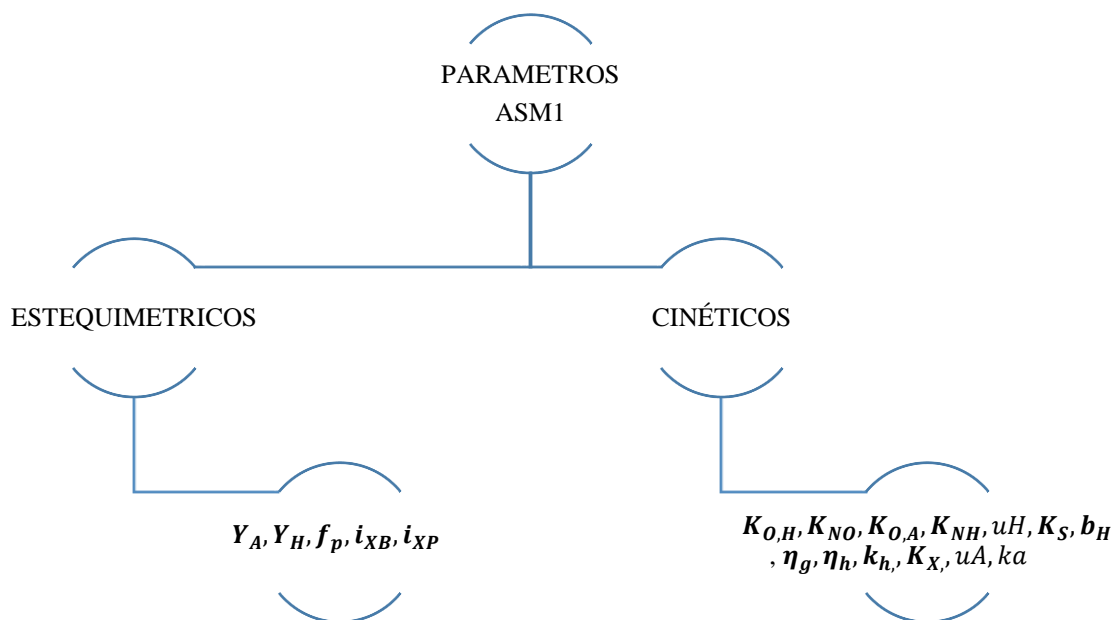
### ***3.17.2. Cinética***

Cada reacción posee una tasa definida por una ecuación designada. En el modelo ASM1 se basan en las tasas de crecimiento, lo cual significa que el coeficiente de la biomasa es igual a 1, generalmente en los modelos ASM se usa una ecuación de saturación estándar con dos parámetros principales que son la tasa máxima y la afinidad o constante de saturación, cuyos valores varían entre 0 y 1 y puede tener una función diferente en el modelo. (López et. al, 2008)

Tanto los parámetros estequiométricos como cinético son importantes para determinar las características del agua residual y del tratamiento que se le proporciona. En la Figura 11 se identifican los parámetros propios de un modelo ASM1 y en la Tabla 7 su nomenclatura.

**Figura 11**

*Parámetros estequiométricos y cinéticos del modelo ASM1*



*Nota:* La figura expresa los parámetros estequiométricos y cinéticos del modelo ASM1, entre los cuales se seleccionarán aquellos que determinarán el comportamiento de la PTAR por medio de protocolos. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (López et. al, 2008)

**Tabla 7**

*Nomenclatura de parámetros del modelo ASM1*

Símbolo	Nombre
$Y_A$	Rendimiento de biomasa autotrófica
$B_A$	Coefficiente de decaimiento para biomasa autotrófica
$f_p$	Fraccionamiento de biomasa particulada
$i_{XB}$	Masa de nitrógeno /masa de DQO en biomasa
$i_{XP}$	Masa de nitrógeno/ masa de DQO en productos de biomasa
$K_{O,H}$	Coefficiente de semi-saturación de oxígeno para biomasa heterotrófica
$K_{NO}$	Coefficiente de semi-saturación de nitrato para biomasa heterotrófica
$K_{O,A}$	Coefficiente de semi-saturación de oxígeno para biomasa autotrófica

$K_{NH}$	Coefficiente de semi-saturación de amonia para biomasa autotrófica
$Y_h$	Rendimiento para biomasa heterotrófica
$\mu H_{max}$	Tasa de crecimiento específica máxima para biomasa heterotrófica
$K_S$	Coefficiente de media saturación para biomasa heterotrófica
$b_H$	Coefficiente de descomposición de la biomasa de heterótrofos
$\eta_g$	Factor de corrección para $u_h$ en condiciones anóxicas
$\eta_h$	Factor de corrección para la hidrólisis en condiciones anóxicas
$k_h$	Tasa de hidrólisis específica máxima
$K_X$	Coefficiente de media saturación para la hidrólisis de forma lenta
$\mu A_{max}$	Tasa de crecimiento específica máxima para biomasa autotrófica
$K_a$	Tasa de amonificación

*Nota:* La tabla indica la nomenclatura de los parámetros cinéticos y estequiométricos del modelo ASM1. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (López et. al, 2008).

### 3.18. Características del Programa GPS-X

La elección y utilización de un software especializado para realizar la simulación de los procesos de una PTAR, es un paso fundamental para obtener resultados reales y fiables, se debe establecer claramente los objetivos y los procesos para el modelado y simulación por medio del diagrama de procesos. De esta manera el usuario puede manipular varias unidades que están relacionadas entre sí.

Permite comprender y predecir el comportamiento de los procesos en la PTAR los cuales están relacionados a las condiciones ambientales, de descarga y la legislación aplicada (Hydromantis S. E., 2017).

Cada programa integra modelos matemáticos desarrollados por la International Water Association (IWA). Un software de simulación facilita al usuario probar diferentes configuraciones y escenarios que desee simular, posee herramientas y tutoriales simples

como complejos, con el fin de lograr diferentes grados de simulación incorporando gráficas y tablas de información de resultados de fácil interpretación.

El programa GPS-X fue desarrollado por la empresa consultora especializada en ingeniería ambiental Hydromantis, Inc. Fundada en Canadá en el año de 1985, su primera versión fue lanzada en 1991, actualmente existen nuevas versiones, demos disponibles en la página web de la empresa.

El programa permite desarrollar modelaciones y simulaciones en estado estacionario y dinámica con presentación en tiempo real de las gráficas de evolución de las variables seleccionadas. Permite generar esquemas de una planta piloto con transformación de unidades y análisis numérico, logra simulaciones de plantas sin límites para dimensionamiento de los tanques, exportar datos directos de office y Matlab, comparación de datos reales y simulados para su interpretación con informes estadísticos y simulaciones de controladores (Hydromantis, 2017).

### **3.19. Influent Advisor**

El programa *Influent Advisor* fue diseñado para facilitar la caracterización de un efluente de agua residual. Permite ingresar las variables medidas o calculadas e identificar sus interacciones mediante un sistema interactivo, en cuya ventana se pueden observar variables de estado y variables compuestas (Hydromantis, 2017).

De acuerdo con el protocolo de la STOWA, el fraccionamiento del substrato como DQO debe realizarse mediante una serie de experimentos tales como filtraciones y mediciones sucesivas de DQO. No obstante, el *Influent Advisor* constituye una alternativa al protocolo mencionado, ya que permite obtener el fraccionamiento de las variables

compuestas tales como DBO, DQO, SST, NTK entre otros (Loaiza, 2007), permitiendo al usuario facilitar el proceso de modelado y ahorrar recursos.

En concordancia con Loaiza (2007), tanto la caracterización mediante el protocolo de la STOWA como la realizada automáticamente por el *Influent Advisor* son válidas, debido a que las diferencias en los resultados son mínimas. El *Influent Advisor* simula la fracción soluble con filtraciones a 0.45  $\mu\text{m}$ , mientras que el protocolo de la STOWA sugiere que las filtraciones deben realizarse a 0.1.

Sin embargo, Vázquez (2007), indica que las filtraciones pueden realizarse con cualquiera de los diámetros de poro mencionados anteriormente ya que la diferencia en la medición de la DQO era apenas del 1%, lo cual corrobora la validez de emplear el *Influent Advisor* como herramienta de caracterización.

### **3.20. Protocolos de Caracterización**

#### **3.20.1. Protocolo de la Stowa**

El protocolo de caracterización de aguas residuales de la STOWA dictamina métodos fisicoquímicos replicables para determinar fracciones solubles y particuladas de las concentraciones de materia orgánica. De acuerdo con, Vázquez (2007), el protocolo se desarrolló para la modelación con ASM1 y ASM2d basándose en la caracterización biológica de la DBO y la caracterización fisicoquímica de la fracción soluble de DQO, con el objetivo de encontrar la fracción biodegradable de la DQO del influente.

El protocolo de la STOWA permite la determinación la DQO rápidamente biodegradable ( $S_s$ ), en comparación con los métodos respirométricos o pruebas biológicas es mucho más fácil y rápido, con variaciones insignificantes.

Según indica Vázquez (2007), la caracterización fisicoquímica puede emplear métodos muy complicados, sin embargo, presentan grandes ventajas. El tiempo de análisis es corto, ya que la prueba dura entre 2 y 3 horas, mide tanto compuestos biodegradables como no biodegradables, mide la carga real de materia orgánica presente en el agua residual aún en presencia de sustancias inhibidoras y adicionalmente es una prueba que no está influenciada por la variabilidad biológica.

Inicialmente el protocolo de la STOWA sugería realizar la filtración con membranas de 0.45  $\mu\text{m}$ , sin embargo, este tipo de filtro permitía el paso de una parte de la fracción particulada, motivo por el cual se estableció que el tamaño de poro de 0.1  $\mu\text{m}$  arroja valores más acertados. En un estudio realizado a 7 plantas de tratamiento por la STOWA, se comparó los resultados de DQO medidos después de utilizar los dos filtros, dando resultados muy similares. Se determinó que el empleo de ambos filtros es válido, debido a que la diferencia es apenas del 1 % (Vázquez, 2007).

En la Tabla 8, se pueden observar las ecuaciones empleadas para determinar las fracciones de la DQO y la Curva de DBO.

**Tabla 8**

*Ecuaciones para fraccionamiento de Substrato*

Nº	Ecuación	Nomenclatura
1	$DQO = S_s + S_i + X_s + X_i$	S <sub>s</sub> = Substrato soluble
2	$DQO = DQO_{inf,sol} + DQO_{inf,part}$	rápidamente biodegradable S <sub>i</sub> = Substrato orgánico soluble
3	$DQO_{inf,sol} = S_s + S_i$	inerte
4	$S_i = DQO_{eff,sol} * 0.9$	X <sub>s</sub> = Substrato particulado
5	$DBOu = \frac{DBO_5}{1 - \exp(-k * t)}$	lentamente biodegradable X <sub>i</sub> = Substrato orgánico
6	$DQO_{bio} = X_s + S_s = \frac{DBO_5}{1 - f_{DBO}}$	particulado inerte DQO <sub>inf,tot</sub> = DQO total
7	$X_s = DQO_{bio} - S_s$	DQO <sub>inf,bio</sub> = DQO biodegradable influente
8	$X_i = DQO_{inf,tot} - S_s - S_i - X_s$	DQO <sub>inf,part</sub> = DQO particulada influente DQO <sub>inf,sol</sub> = DQO soluble influente DQO <sub>eff,sol</sub> = DQO soluble efluente k= Constante cinética (se obtiene con la curva)
<b>Curva de DBO</b>		
9	$DBOt = DBOu * (1 - \exp(-k * t))$	n = N° de puntos
10	$n * a + b * \sum y - \sum y' = 0$	a = - b*L b = - k (base e)
11	$a * \sum y + b * \sum y^2 - \sum y * y' = 0$	L = a/b
12	$y' = \frac{y_{t+1} - y_{t-1}}{2 * \Delta t}$	y = DBO al tiempo t y' = pendiente de DBO vs tiempo

*Nota:* La tabla indica las ecuaciones planteadas por la STOWA para el fraccionamiento de la DQO. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Vázquez, 2007).

### 3.20.1.1. Coeficiente de Rendimiento Heterótrofo, Y<sub>H</sub>

Conforme lo indicado en Henze et. al (2002) el coeficiente de rendimiento heterotrófico Y<sub>H</sub> puede ser calculado por medio de la masa de la materia celular formada durante la remoción del sustrato soluble, mediante sedimentación y filtración a 0.45 um se separa el material particulado y filtrado, el cual está compuesto de materia orgánica soluble.

Se procede a sembrar con biomasa aclimatada en un reactor, después se recolectan alícuotas periódicamente y se determina DQO soluble y DQO total.

El coeficiente de rendimiento heterotrófico  $Y_h$  se determina por las siguientes ecuaciones:

Ecuación para DQO particulada:

$$DQO_{Part} = DQO_{Total} - DQO_{Sol} \quad (1)$$

Ecuación para determinar  $Y_h$ :

$$Y_H = \frac{\Delta DQO_{Part}}{\Delta DQO_{Sol}} \quad (2)$$

### 3.20.1.2. Tasa de Decaimiento Heterótrofo, $b_H$

La tasa de decaimiento describe el proceso de consumo de oxígeno de la biomasa aerobia sin la presencia de sustrato soluble externo, es decir, los microorganismos oxidan su propio tejido celular, por lo que la producción de lodos se reduce al incrementar el tiempo de retención celular (Loaiza, 2007).

Según el método respirométrico para la obtención de  $b_h$ , se realiza un experimento tipo batch con aireación sin alimentación realizando una serie de mediciones de ( $r_{O_2}$ ). De acuerdo con Loaiza (2007), el logaritmo natural de la tasa de respiración vs tiempo, traza una línea recta, cuya inclinación representa ( $-b'_H$ ), para lo cual se aplican las siguientes ecuaciones.

Ecuación para determinar  $r_{O_2}$

$$\ln(r_{O_2}) = \ln(b_H * (1 - f_p) * X_{X_{BO}}) - b_H * t \quad (3)$$

Donde:

$f_p$ = fracción inerte particulada

$X_{BO}$ = concentración inicial de biomasa



A continuación, se determina el coeficiente de decaimiento mediante la ecuación:

Ecuación para determinar  $b_H$ :

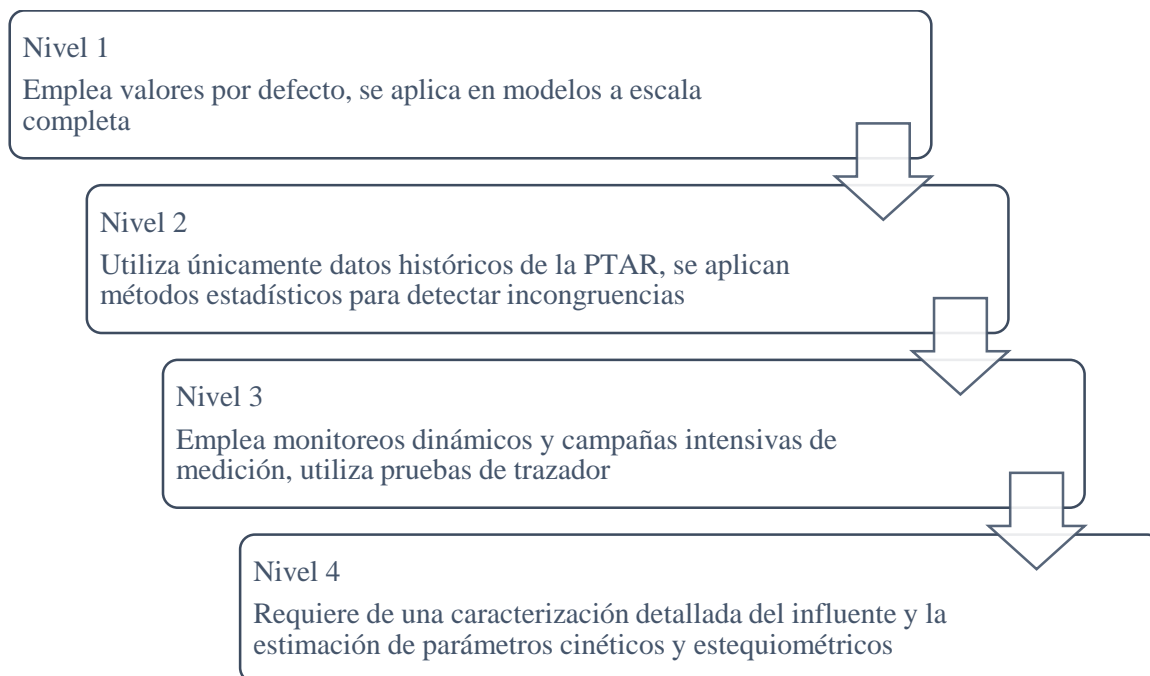
$$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_H(1 - f_p)} \quad (4)$$

### **3.20.2. Protocolo de WERF**

El protocolo de WERF se puede aplicar a diferentes niveles, acorde a los objetivos de la modelación. Se maneja en cuatro etapas, la primera consiste en el análisis de la planta, es decir, la recolección de datos de operación, caracterización de datos de influente y la obtención de datos físicos (Espinosa, 2010). La segunda etapa requiere de datos históricos para realizar el análisis, mientras que, en la tercera y cuarta etapa, se realiza la calibración y validación del modelo respectivamente. En la, se observan los niveles de calibración en los que se puede aplicar este protocolo.

## Figura 12

### Niveles de aplicación del Protocolo de WERF



*Nota:* La figura ilustra cada uno de los diferentes niveles de aplicación del Protocolo de WERF. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Espinosa, 2010)

### 3.21. Conversión de Datos de Campaña en Información Compatible con ASM1

Para la caracterización de aguas residuales y la determinación de parámetros del modelo se necesita la conversión de los datos obtenidos en la campaña de muestreo (Espinosa, 2010). En el presente trabajo de investigación, este juego de parámetros compatibles con el ASM1 se obtuvo por medio de protocolos y la ayuda del programa Influent advisor incluido en el simulador GPS-X detallados a continuación:

- Protocolo de caracterización WERF y HENZE para los valores “por defecto”.
- Protocolo de caracterización de la STOWA para el cálculo de los coeficientes estequiométricos y cinéticos.

- Software “*Influent Advisor*” para la determinación de las fracciones de DQO del sustrato compatibles con ASM.

Los métodos específicos utilizados para la caracterización del influente fueron instaurados por el protocolo STOWA y WERF, estos métodos físicos-químicos utilizan filtraciones para la determinación de fracciones orgánicas donde su diferencia radica en el tamaño de poro utilizado para el fraccionamiento de DQO y Nitrógeno.

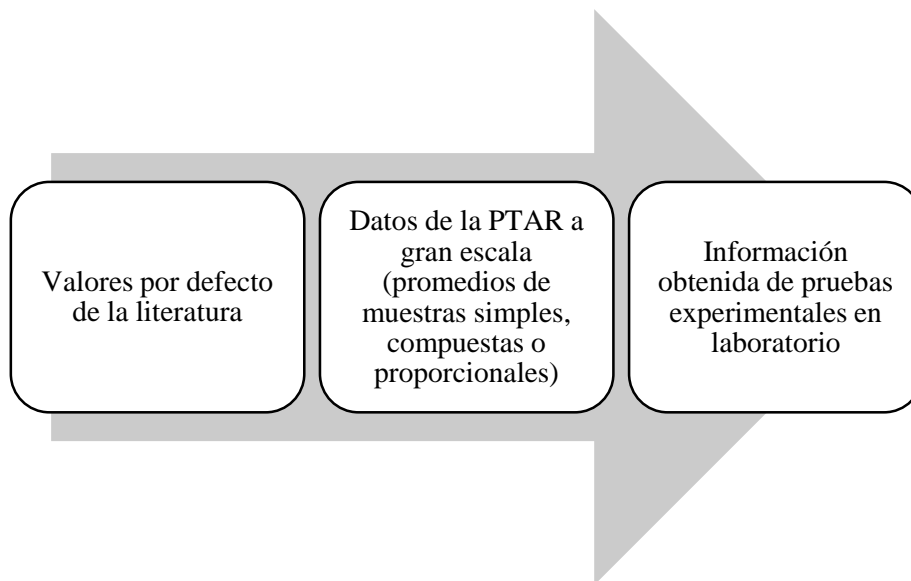
### 3.22. Protocolos de Calibración del Modelo

#### 3.22.1. Protocolo de Petersen

El protocolo de Petersen puede realizarse con los recursos identificados en la Figura 13, para la caracterización biológica del modelo ASM1.

### Figura 13

#### *Recursos para aplicación del Protocolo de Petersen*



*Nota:* La figura ilustra de forma resumida los requerimientos para la aplicación del Protocolo de Petersen. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Espinosa, 2010)

De acuerdo con este protocolo, los parámetros que afectan al comportamiento de la planta son:  $Y_H$ ,  $f_P$ ,  $b_H$ ,  $X_I$ , mismos que pueden determinarse en régimen estacionario. Se puede utilizar antes de la calibración dinámica para identificar las condiciones iniciales de las variables de estado y para obtener las primeras estimaciones (Espinosa, 2010).

### 3.22.2. Protocolo de Vanrolleghem

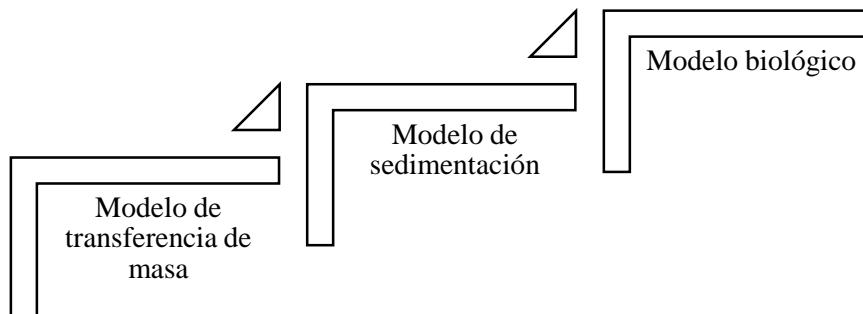
Desarrollado por el grupo BIOMATH, se aplica al modelo completo de PTAR se selecciona de acuerdo a los submodelos indicados en la Figura 14.

Los cuales se calibran individualmente para luego ser incorporados en un solo modelo (Espinosa, 2010).

Los parámetros tales como:  $f_{X_i}$ ,  $b_H$ ,  $Y_H$  o  $X_I$  deben ser calibrados para la realización de un análisis de sensibilidad, debido a que los mismos tienen efecto directo en la producción de lodos.

### Figura 14

*Submodelos de aplicación del Protocolo de Vanrolleghem*



*Nota:* La figura identifica los submodelos con los cuales se aplica el Protocolo de Vanrolleghem. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Espinosa, 2010)

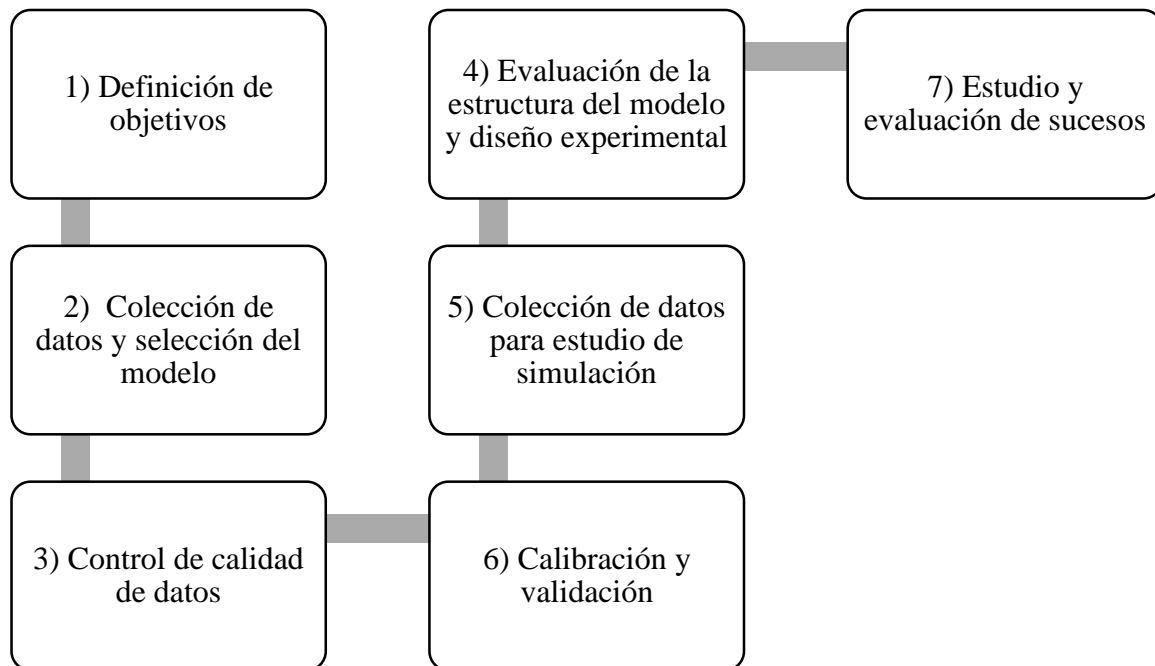
Entre sus beneficios, este protocolo permite la caracterización biológica, hidráulica, de sedimentación y biomasa, además que está bien estructurado. Sin embargo, sigue en etapa de investigación por lo que su aplicabilidad es limitada ya que se requiere especialistas en el tema.

### 3.22.3. Protocolo de Langergraber

De acuerdo con Espinosa (2010), este protocolo fue desarrollado con el fin de facilitar el proceso de simulación, y mejorar la veracidad y calidad de la modelación matemática. En la Figura 15 se enumeran las fases que propone este protocolo.

**Figura 15**

*Fases del Protocolo de Langergraber*



*Nota:* La figura indica el procedimiento a seguir para la creación de un modelo y posteriormente ser calibrado y validado aplicando el Protocolo de Langergraber. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Espinosa, 2010)

Este protocolo propone pruebas de trazador para la modelación del tanque de aireación o en su defecto, realizar un estudio dinámico del fluido por computadora, además exige un

análisis de los lodos en cuanto a su producción y concentraciones de ortofosfato, NH<sub>4</sub> y N-NO<sub>3</sub>.

### **3.23. Parametrización y Calibración del Modelo**

Los parámetros que no alteran de forma significativa las predicciones se podrán optar por los valores “*por defecto*”, por medio de la calibración estacionaria se podrá evaluar la producción de lodo y purga a largo plazo y poder describir la calidad del efluente utilizando valores promedios caracterizados obtenidos en la campaña de muestreo tanto como de la entrada y salida de la PTAR (WERF, 2003).

Para la calibración del modelo ASM1 no se determina un proceso preciso y unánime, esta deficiencia se explica en base al propósito del proyecto, presupuesto, tiempo y la calidad de datos disponibles (Loaiza, 2007).

Según WERF (2003), aclara que existen tres fuentes de datos para llevar a cabo la calibración, a pesar de que no siempre es posible utilizar todas las fuentes de datos ya que estos dependen del presupuesto y el nivel de calibración requerida.

- Datos históricos colectados de la PTAR.
- Datos adicionales complementarios obtenidos en la campaña de muestreo y durante la calibración.
- Datos procedentes de pruebas de laboratorio para el modelo.

Para la calibración se pueden utilizar valores propuestos por el comité científico Henze en 2002, Tabla 9 para correr los programas, en la siguiente tabla de parametrización se pueden apreciar varios coeficientes cinéticos y estequiométricos los cuales el comité científico Henze en 2002, logró identificar coeficientes cuyo valor no altera en forma significativa, donde se llegó a la conclusión que los valores para su aplicación pueden ser

los mismos que están representados en la tabla de valores “*por defecto*” acorde a las condiciones del caso simplificando el proceso solamente a hallar el valor de los demás parámetros, los valores que supuestamente se pueden considerar fijos son:

$$Y_A, f_p, i_{XP}, i_{XB}, K_{OH}, K_{NO}, K_{OA} \text{ y } b_A$$

**Tabla 9**

*Valores promedios y rangos de los parámetros del ASM1 (Henze et. al, 2002)*

Símbolo	Unidades	Rangos de 10° a 20 °C	Valor a 20°C	Fórmula
	Coeficientes estequiométricos			
$Y_A$	g de DQO de células formadas/g N oxidado	0.07 - 0.28	-	
$Y_h$	g de DQO de células formadas/g DQO oxidado	0.46 - 0.69	0.6691	$Y_h = \frac{DQO \text{ particulada}}{DQO \text{ soluble}}$
$f_p$	Adimensional	-	0.08	
$i_{XB}$	g N / g DQO de Biomasa	-	0.086	
$i_{XP}$	g N / g DQO de productos	0.02 - 0.1	0.06	
	Parámetros cinéticos			
$\mu H_{max}$	día <sup>-1</sup>	3.0 - 13.2	6.0	$\mu H_{max} = \left( \frac{Y_h}{1 - Y_h} \right) r_{O_2}$
$K_S$	g $\frac{DQO}{m^3}$	10 - 180	20.0	
$K_{O,H}$	g $\frac{O_2}{m^3}$	0.01 - 0.2	0.20	
$K_{NO}$	g $\frac{N-NO_3}{m^3}$	-	0.50	
$b_H$	día <sup>-1</sup>	0.05 - 1.6	0.6546	$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_h (1 - f_p)}$
$\eta_g$	Adimensional	-	0.8	
$\eta_h$	Adimensional	0.4 - 1	0.4	
$k_h$	g DQO lentamente biodeg./ g DQO	1.0 - 3.0	3.0	

	células. Día			
$K_X$	g DQO lentamente biodeg./ g DQO células	0-01 0.03	-	0.03
$\mu A_{max}$	$día^{-1}$	0.34 – 0.8		0.8
$K_{NH}$	$g \frac{N-NH_3}{m^3}$	-		1.0
$K_{O,A}$	$g \frac{O_2}{m^3}$	-		0.4
$K_a$	$m^3$	-		0.08
$b_A$	$\frac{g DQ. día}{día^{-1}}$	-		0.15

*Nota:* La tabla indica el rango de valores de los parámetros cinéticos y estequiométricos del modelo ASM1 propuesto por Henze et. al (2002). Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Henze et. al, 2002).

### 3.24. Funcionamiento de la PTAR de la EMRAQ-EP

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Empresa Pública Metropolitana de RASTRO Quito, se encarga del tratamiento de aguas residuales industriales, más específicamente aguas residuales provenientes del faenamiento de animales de consumo humano tales como ganado vacuno, porcino, ovinos y aves. El funcionamiento de la planta se da forma permanente, es decir 24 horas diarias durante los 365 días del año, a diferencia del área de faenamiento que trabaja de acuerdo a los requerimientos del usuario, tentativamente los días lunes, miércoles y viernes en horario diurno. La producción de agua residual generada varía dependiendo del tipo de animal faenado, los volúmenes aproximados podemos encontrarlos en la Tabla 10.



**Tabla 10**

*Producción de Aguas Residuales en la PTAR de la EMRAQ-EP*

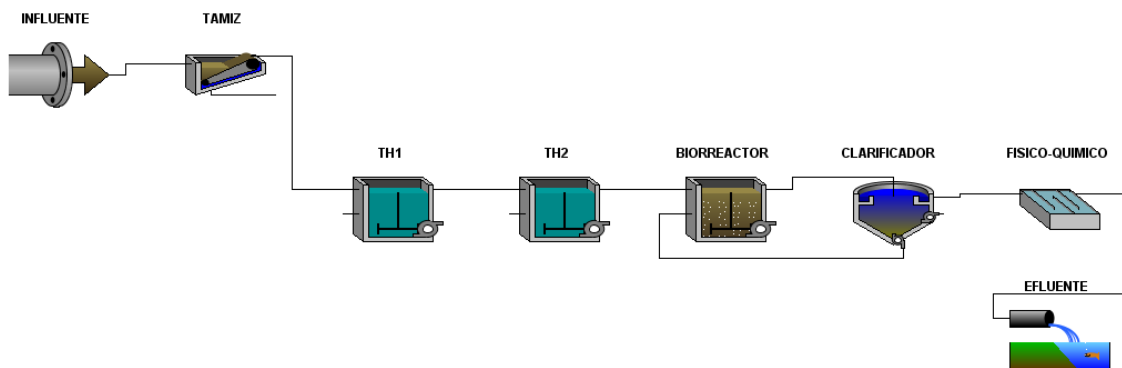
<b>Ganado</b>	<b>Agua Residual Individual (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Cantidad de Animales</b>	<b>Volumen Total de Agua Residual (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Vacuno</b>	0,8	450	360
<b>Ovino</b>	0,2	300	60
<b>Porcino</b>	0,4	300	120
		<b>Total</b>	<b>540</b>

*Nota:* La tabla indica producción de aguas residuales en la PTAR de la EMRAQ-EP, de acuerdo a la cantidad generada por el tipo de animal faenado. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Moscoso, 2020).

Todas las aguas residuales generados en los procesos industriales de la EMRASTRO son tratados en la PTAR de le empresa misma. En la Figura 16 se observa un esquema general de la PTAR de la empresa EMRASTRO con todos los procesos involucrados y equipos principales que la conforman.

**Figura 16**

*Esquema general de la PTAR de la EMRAQ-EP*



*Nota:* En la figura se observa un esquema de la PTAR de la EMRAQ-EP generado en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

### 3.25. Procesos de Tratamiento de la PTAR de la EMRAQ-EP

El proceso de tratamiento se estructura en 5 etapas principales, cribado, homogenización, aireación, clarificación y desinfección. Posterior a las etapas mencionadas, el agua tratada es vertida al sistema de alcantarillado público bajo la normativa nacional aplicable.

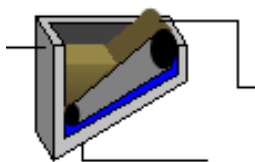
#### 3.1.1 Cribado o Tamizado

La primera etapa de tratamiento de la PTAR consiste en un proceso físico de separación de sólidos mediante un tamiz autolimpiante. Las aguas provienen directamente del área de faenamiento con residuos sólidos animales. El efluente se dirige hacia la criba mediante gravedad con una DBO entre 3500 y 6000 mg/l. En este punto se separan las partículas gruesas para posteriormente ser transportadas hacia el incinerador en la parte alta de la empresa, mediante vagones cargados de forma manual durante una jornada entera de trabajo.

En caso de requerirse la implementación de este tipo de filtro en la creación del modelo en el software GPS-X, en la Figura 17 se identifica el ícono que se debe utilizar.

#### Figura 17

*Ícono de tamiz en GPS-X*



*Nota:* En la figura se observa un esquema de tamiz disponible en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

La función básica del tamiz es separar las partículas sólidas gruesas del agua. Funciona por gravedad mediante el paso del agua a través de cribas o rejillas. Las cribas pueden ser gruesas o finas, las primeras son aquellas cuyas aberturas miden 0,64 cm o más, mientras que las finas miden menos de 0,64 cm (Ramalho, 2003).

### ***3.1.2 Separador de Sólidos Automático***

Una vez concluido el proceso de cribado el agua se dirige hacia un primer tanque homogenizador o TH1 donde se busca amortiguar las variaciones del caudal, haciéndolo más constante en cierta medida. Mediante bombas, el agua del TH1 es transportada hacia los separadores de sólidos automáticos en la parte superior del complejo de la EMRAQ-EP.

El funcionamiento de los separadores automáticos se basa en un transportador de espiral sin fin realizando la separación por gravedad y compresión mecánica. Los sólidos son dirigidos hacia la salida mientras que el flujo de agua continúa su curso mediante gravedad hacia un segundo tanque homogenizador o TH2.

### ***3.1.3 Homogenización***

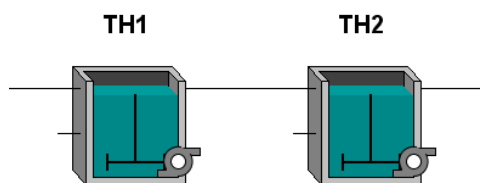
La planta de tratamiento de aguas residuales de la EMRAQ-EP consta de dos tanques de homogenización. El primero TH1, se encarga de amortiguar las variaciones del caudal que ingresa después de haber culminado el proceso de tamizado. Por otro lado, tenemos un segundo tanque el TH2, el cual homogeniza el caudal que entra desde la separación automática para ser transportado hasta el biorreactor y así iniciar el tratamiento secundario, este proceso se realiza para que no exista variaciones fuertes de parámetros fundamentales para el correcto funcionamiento de los lodos activos y se pueda mantener un rango de variación mínimo y controlado.

El primer tanque tiene un volumen de 220 m<sup>3</sup> y consta de un tiempo de retención de 8 horas, la DBO en este punto es de aproximadamente 5500 mg/l. Es importante mencionar que el diseño original de la PTAR está subdimensionado por lo que fue necesaria la implementación del segundo tanque de homogenización aumentando la capacidad total a 600 m<sup>3</sup>.

Como en el caso de la PTAR en estudio los tanques de homogenización se encuentran en serie, en el software GPS-X se pueden representar como en la Figura 18.

### Figura 18

*Ícono de tanques homogenizadores GPS-X*



*Nota:* En la figura se observa un esquema de los tanques homogenizadores disponible en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

El tanque homogenizador consiste básicamente en un embalsamiento o un tanque de volumen adecuado, que normalmente trabaja lleno. En concordancia con, Suárez et. al (2014), la homogenización del caudal de una PTAR radica en la laminación de los picos y valles de contaminación que llegan a la instalación, permitiendo que la alimentación a la siguiente etapa del tratamiento tenga un flujo homogéneo (Suárez et. al, 2014).

#### 3.1.4 Aireación

A continuación se procede a la biodegradación del agua residual y su materia orgánica contenida por medio del tanque de aireación de mezcla completa. De acuerdo con Romero (1999), este es un reactor ideal, en el cual la mezcla es instantánea. Es decir, el

afluente se mezcla completamente con el contenido del reactor en el preciso momento en que este ingresa, por ende, la dispersión de las partículas es infinita. Trabaja en estado estacionario por lo que se considera que la velocidad de reacción es la misma en cualquier punto del tanque.

Debido a su homogeneidad, los contaminantes se encuentran distribuidos uniformemente en todo el volumen del reactor, por lo que, se estima que las concentraciones sean las mismas tanto en la salida como dentro del tanque (Noyola, 2013).

El tratamiento biológico o tratamiento secundario inicia cuando el caudal se ha homogenizado, es decir los parámetros son constantes. Dentro del tanque de aireación el licor de mixto se mantiene los sólidos suspendidos en concentraciones de alrededor de 8000 mg/L, se proporciona aire comprimido por medio de 4 aireadores de alta tasa los cuales se encuentran arriba del biorreactor. Estos aireadores proporcionan aire de burbuja fina obteniendo una mezcla completa para mantener las partículas en suspensión y que la digestión biológica se lleve a cabo correctamente, manteniendo el nivel de oxígeno disuelto en el tanque de aireación por arriba de 2 mg/L (Torres, 2005).

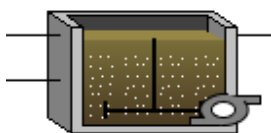
El software GPS-X ofrece al usuario diferentes tipos de biorreactores que van de acuerdo a la PTAR que se quiere modelar. Para un mejor modelamiento se seleccionó el tanque de mezcla completa, cuya representación se observa en la Figura 19 el cual corresponde al tipo de biorreactor más similar utilizado en la EMRAQ-EP.

El biorreactor que presenta la PTAR de la empresa se trata de un reactor de aireación prolongada el cual fue identificado durante la visita técnica, con forme al manual de especificaciones técnicas del programa el tanque convencional de mezcla completa posee características muy similares al reactor mencionado antes el cual podrá ser utilizado

para la creación del modelo, por ende, las diferencias como el tiempo de retención celular, numero de aireadores y su tiempo de funcionamiento entre ambos tanques podría generar un margen de error al momento de la obtención en los resultados de salida afectando el coeficiente estadístico en el momento de la validación, los cuales por medio de la parametrización y calibración se lograra minimizar estas discrepancias.

### **Figura 19**

*Biorreactor de Mezcla Completa en el software GPS-X*



*Nota:* En la figura se observa un esquema de biorreactor de mezcla completa disponible en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

#### **3.1.5 Sedimentación Secundaria**

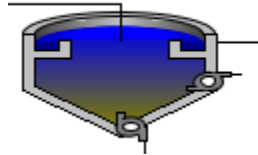
En este punto el porcentaje de tratamiento oscila entre un 80 o 90% dejando el caudal listo para la desinfección.

El sedimentador secundario de la PTAR presenta un manto de lodos que se encarga de atrapar los flóculos pesados, mientras que el agua se dirige hacia la parte superior del tanque (Torres, 2005). Este mecanismo permite que el volumen de lodos aumente hasta el momento de realizar la purga de los mismos. Además, el clarificador provee un sistema de eliminación de grasas y aceites flotantes por medio de un blower, el cual está situado en la parte superior del tanque (Torres, 2005).

Se observa la representación del sedimentador secundario que ofrece el programa GPS-X para trabajos de modelamiento y simulación (Figura 20).

## Figura 20

### Clarificador Secundario en el software GPS-X



*Nota:* En la figura se observa un esquema de sedimentador secundario o clarificador disponible en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

Para poder instalar un sedimentador secundario después de un proceso de lodos activados, la carga superficial debe presentar un caudal promedio de entre 16 y 32 m/d y un caudal pico de 41 – 49 m/d, por otro lado, la carga de sólidos promedio oscila entre 98 y 147 kg/dm<sup>2</sup> con un caudal pico de 245 kg/dm<sup>2</sup>. Estas condiciones corresponden a un sedimentador secundario con una profundidad mínima de 3,7 m y un máximo de 4,6 m de acuerdo con lo sugerido por (Ramalho, 2003).

### 3.1.6 Desinfección

El proceso final previo a la descarga es la desinfección, sin embargo, antes de agregar el agente desinfectante el agua pasa por procesos adicionales. El primero de ellos es la coagulación, cuya función es unir las partículas suspendidas para formar coágulos fáciles de separar por métodos físicos como la filtración o la sedimentación.

El compuesto coagulante y la concentración del mismo se elige de acuerdo a varios factores como el pH, temperatura o el tipo de materia que se quiere eliminar (Torres, 2005). En función a esto, los coagulantes más conocidos son; cloruro férrico, sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, policloruro de aluminio y poli-electrolitos.

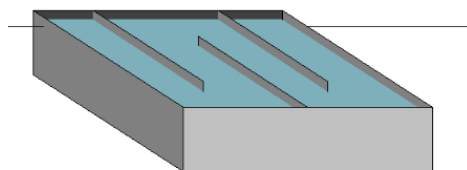
A continuación, se realiza la floculación, que consiste en un proceso físico de coalescencia, es decir, se forman flóculos de mayor tamaño, mediante el contacto de flóculos pequeños por acción de una turbulencia moderada. La agitación durante la floculación no debe ser muy fuerte ya que el efecto puede ser adverso (Torres, 2005).

Una vez que el caudal ha pasado por los procesos mencionados, es filtrado rápidamente con arena silíceo para sistemáticamente agregar los agentes desinfectantes. Su función es eliminar los microorganismos presentes en el agua, permitiendo que el flujo de salida cumpla con la normativa vigente y sea inocua para la salud humana. De acuerdo con Torres (2005); “el hipoclorito de sodio o cloro en estado líquido, es el mejor compuesto para la desinfección” (pag.32).

Se identifica el ícono sugerido por el software GPS-X, para la implementación del tanque de desinfección a un modelo (Figura 21).

### **Figura 21**

Tanque de Desinfección en el software GPS-X



*Nota:* En la figura se observa un esquema de tanque de desinfección disponible en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

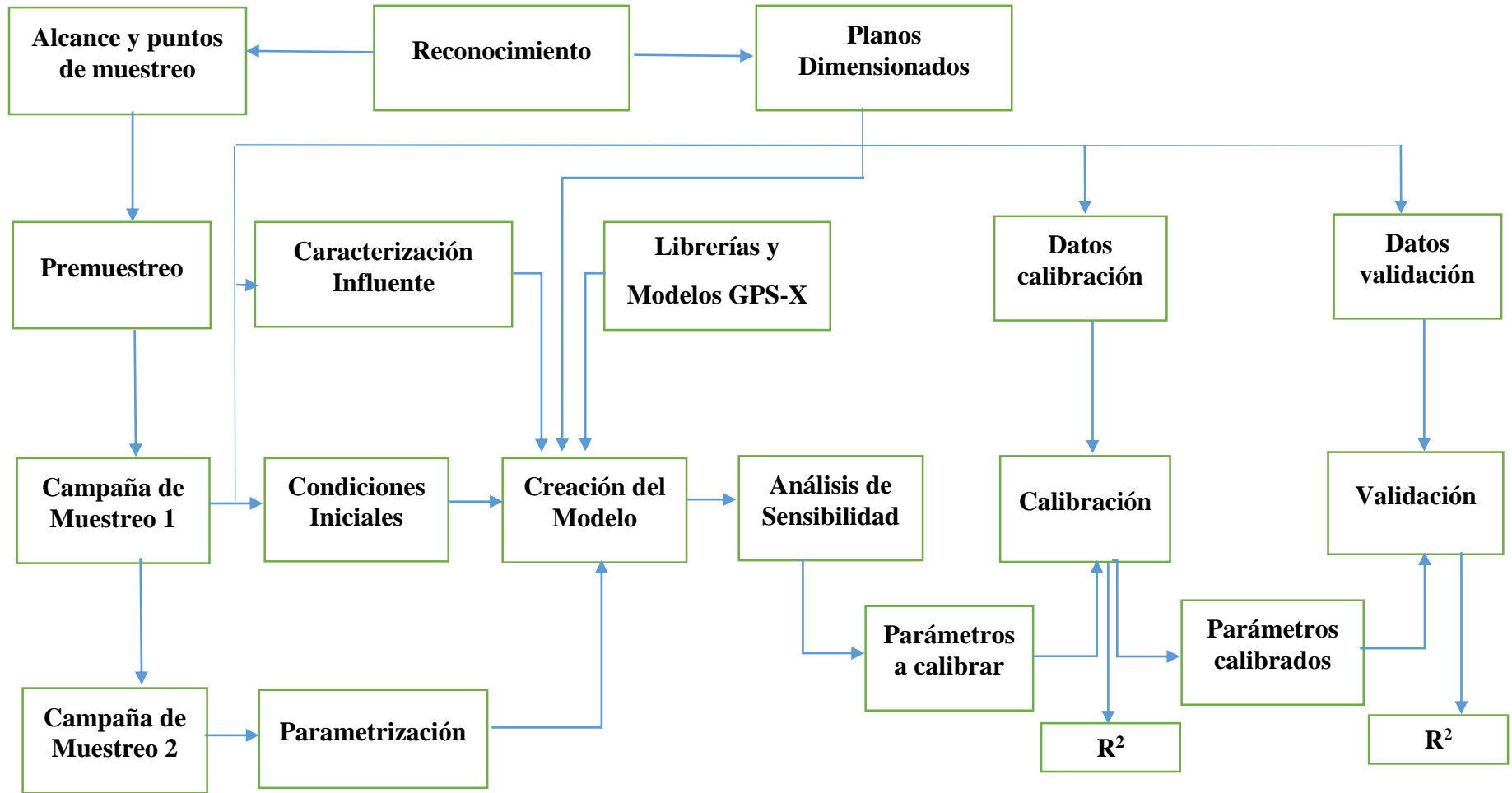


#### 4. MATERIALES Y MÉTODOS

En primer lugar, se realizó un reconocimiento del área donde se observaron los posibles puntos para la toma de muestras. El Premuestreo permitió determinar la variación durante un día de ciertos parámetros fáciles de medir *in-situ*, para posteriormente establecer las campañas de muestreo 1 y 2 las cuales sirvieron para la caracterización del efluente y la parametrización del modelo respectivamente. Una vez obtenidos los datos mencionados, se procede a establecer las condiciones iniciales del modelo cuya librería ha sido seleccionada en base a los datos disponibles (Library: *cnlib* – Influent Model: *tsscod* – Modelo Biológico: *asm1*). Ya determinado el modelo, lo que se busca es llegar a la validación para lo cual se requiere una etapa de calibración tal como se observa en la Figura 22.

**Figura 22**

*Diagrama de Metodología del Trabajo Experimental*



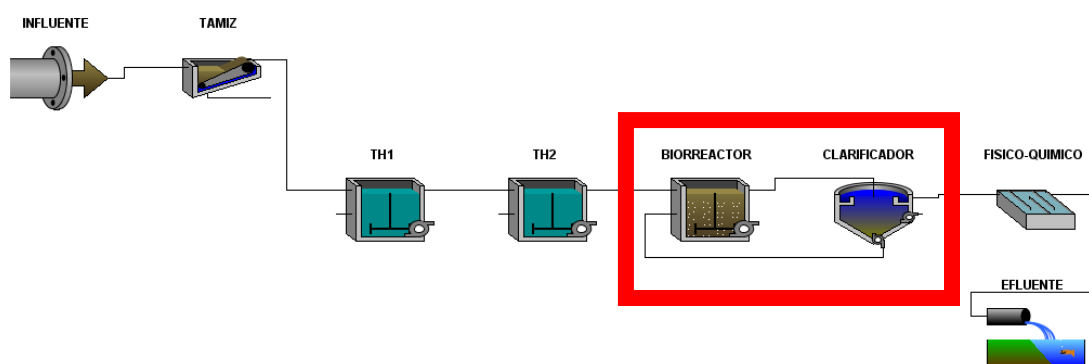
**Elaborado por:** Artos B., Constante J. (2019)

#### 4.1. Reconocimiento del Área de Estudio

El modelo a simular en el presente trabajo va a ser enfocado a los lodos activados de la PTAR de la empresa EM-RASTRO basados en el modelo ASM1, por medio del programa GPS-X se va a realizar una simulación de todo el tratamiento biológico (Figura 23).

**Figura 23**

*Alcance de la simulación del proyecto*



*Nota:* En la figura se observa un esquema de la PTAR del Camal Metropolitano en el software GPS-X. El rectángulo rojo delimita el tratamiento biológico, donde se realizó el estudio. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

El tratamiento por lodos activados se concentra principalmente en la etapa biológica, la cual se desarrolla en el biorreactor y se complementa con el clarificador (Ramalho, 2003). Dentro de los criterios para establecer el alcance de la simulación, se consideró los objetivos del proyecto, los cuales se basan en la aplicación de modelos ASM, permitiendo reducir el estudio a los equipos marcados en la Figura 23, siendo el biorreactor el más influyente ya que aquí es donde se encuentra la masa activa de microorganismos. Por lo que mediante los puntos de muestreo seleccionados se podrá simular desde la salida de agua del tanque homogenizador 2 de la PTAR, la cual pasa inmediatamente al biorreactor o tanque de aireación y fluirá hacia el sedimentador secundario que es donde termina el proceso biológico.

## **4.2. Muestreo**

Las técnicas de muestreo varían dependiendo del tipo de agua que se va a analizar. De acuerdo con Instituto Ecuatoriano de Normalización (2013); tanto el muestreo puntual como el compuesto se pueden aplicar para aguas estancadas y corrientes, siendo recomendable el primero cuando el flujo de agua no es uniforme. El muestreo puntual o simple se recomienda para estudios de polución en un cuerpo de agua o determinar si esta cumple con la calidad requerida para un determinado uso. Por otro lado, las muestras compuestas entregan datos promedios de composición. Antes de mezclar se pueden medir ciertos parámetros de interés para verificar que la variación no sea significativa con las muestras colocadas previamente (INEN, 2013).

### **4.2.1. Premuestreo**

Para establecer una campaña de muestreo confiable, se realizó un muestreo previo durante 12 horas con el fin de determinar un horario aproximado de variación de parámetros.

Como se observa en la Tabla 11, los parámetros analizados fueron pH y temperatura llevados a cabo con un medidor multiparámetro, por otra parte, los sólidos sedimentables fueron cuantificados mediante el uso de un cono Imhoff.

**Tabla 11**

*Resultados de medición de parámetros in-situ en el premuero*

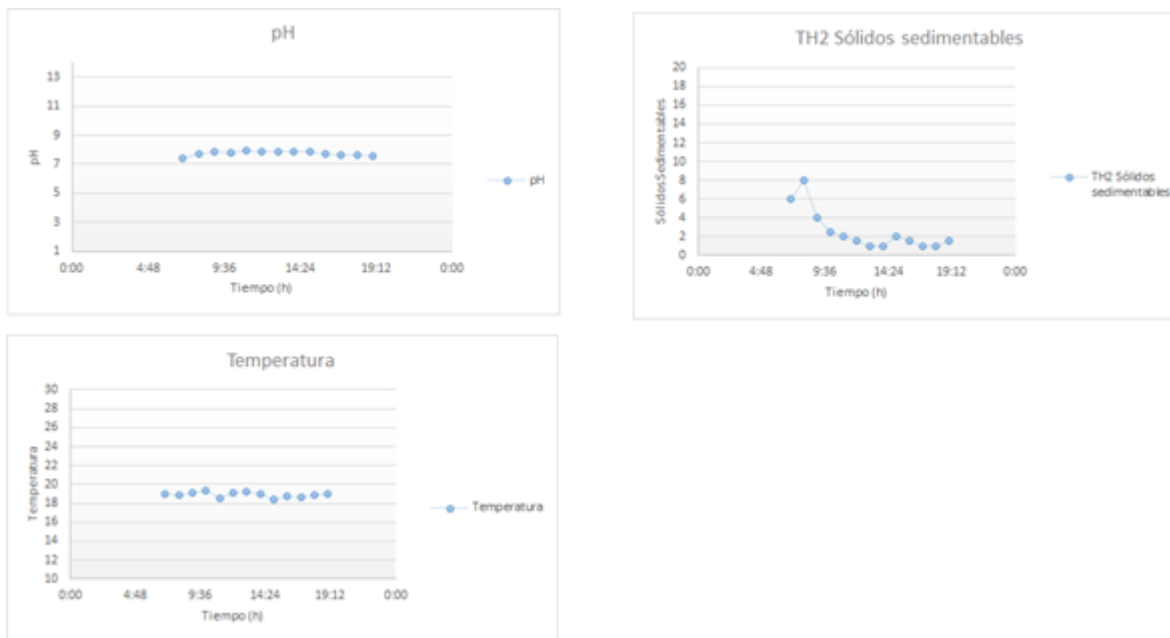
<b>Hora</b>	<b>pH</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>Sólidos sedimentables vol/vol (ml/l)</b>
<b>7:00</b>	7,4	19	6
<b>8:00</b>	7,7	18,9	8
<b>9:00</b>	7,83	19,1	4
<b>10:00</b>	7,8	19,3	2,5
<b>11:00</b>	7,92	18,5	2
<b>12:00</b>	7,85	19,1	1,5
<b>13:00</b>	7,83	19,2	1
<b>14:00</b>	7,84	19	1
<b>15:00</b>	7,83	18,4	2
<b>16:00</b>	7,68	18,8	1,5
<b>17:00</b>	7,64	18,6	1
<b>18:00</b>	7,66	18,9	1
<b>19:00</b>	7,6	19	1,5

*Nota:* La tabla indica los valores medidos para determinar el comportamiento de la PTAR en un período de 12 horas. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

La variación de los parámetros se identifica en la Figura 24, donde se puede apreciar que no existen grandes variaciones en los parámetros durante el día (pH y temperatura). Por otro lado, en las primeras horas de muestreo, existen variaciones en sólidos sedimentables, esto se debe a que las alícuotas fueron tomadas en un día de faenamiento, no obstante, a medida que el día avanza, la curva se va estabilizando.

**Figura 24**

*Comportamiento por horas de pH, SSed, y Temperatura*



*Nota:* En la figura se observa el comportamiento de pH, temperatura y sólidos sedimentables en el transcurso de 12 horas. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (Excel).

#### **4.2.2. Campaña de Muestreo 1**

En concordancia con Instituto de Toxicología de la Defensa (2016); el muestreo compuesto se aplica a todas las aguas residuales y los tiempos de toma de muestra se establecen en función a la frecuencia de cambios esperada.

En base a esto se estableció una campaña de muestreo de 4 días tomando alícuotas de 1 litro cada 6 horas, es decir, se obtuvieron 4 muestras simples las cuales fueron almacenadas en una hielera a 4°C para evitar el desarrollo de bacterias. Posteriormente fueron homogenizadas para obtener un total de 4 muestras compuestas con un volumen de 4 L cada una.

Los materiales y equipos utilizados se indica a continuación en la Tabla 12.

**Tabla 12***Materiales y equipos utilizados en la campaña de muestreo*

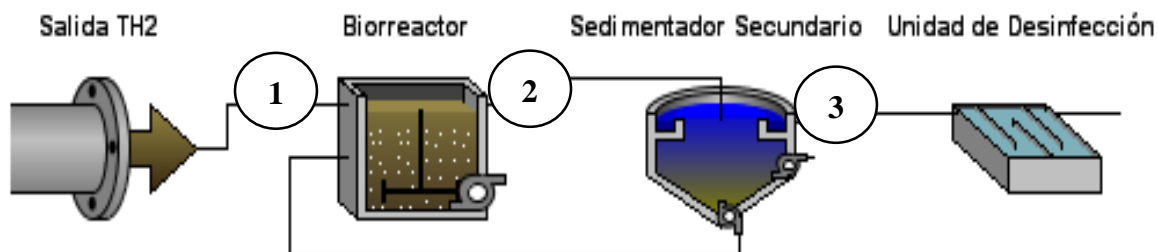
<b>Materiales y equipos</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Hielera</b>	2
<b>Botellas plásticas de 1 L</b>	48
<b>Botellas plásticas de 5 L</b>	12
<b>Recipiente plástico</b>	1
<b>Probeta plástica 500 ml</b>	1
<b>Medidor multiparámetro para pH, temperatura, conductividad y Sólidos Totales Disueltos</b>	1

*Nota:* La tabla indica los materiales y equipos utilizados en la campaña de muestreo 1. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los puntos seleccionados para la recolección de muestras simples, se establecen en la Figura 25, los cuales se determinaron de acuerdo con el alcance de la simulación. Los puntos mencionados nos permiten a su vez realizar la calibración y validación con el software GPS-X. En este caso, el punto 2 puede ser utilizado para la calibración del modelo tomando en cuenta que los datos del punto 1 ya fueron ingresados. Posteriormente con los resultados del punto 3 se puede validar el modelo, verificando a través de la simulación y comparación de datos.

## Figura 25

### Diagrama de Puntos de Muestreo

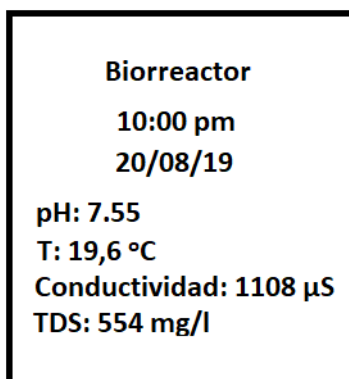


*Nota:* En la figura se establecen los puntos de muestreo seleccionados para la generación del modelo tratamiento biológico de la PTAR. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

La rotulación de los envases se realizó utilizando papel adhesivo y marcador indeleble anotando primero el lugar del punto donde fue tomado, seguido de la hora, la fecha y por último los datos tomados *in-situ* con el multiparámetro, como se muestra en el ejemplo de la Figura 26.

## Figura 26.

### Ejemplo de etiqueta utilizada en la rotulación de embaces para muestra simple



*Nota:* En la figura se observa el tipo de etiqueta utilizado en las muestras simples durante la campaña de muestreo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

La obtención de muestras se realizó en base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2176:2013 “Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Técnicas de Muestreo” y NTE



INEN 2169:2013, “Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y Conservación de Muestras”, las que establecen guías de técnicas de muestreo apropiadas para la caracterización de aguas naturales, contaminadas y residuales. Además, indican técnicas y precauciones generales para el transporte y conservación de muestras de agua.

La toma de muestras en el punto 1 se realizó en la salida de agua del tanque homogenizador 2, lo cual corresponde a una descarga libre. Fundamentándose con lo establecido en la normativa, se procedió a tomar la alícuota con un recipiente plástico, previamente enjuagado en la descarga para medir los parámetros *in-situ* y transferirla a un recipiente de 1 L, el cuál será limpiado, etiquetado y almacenado a 4 °C. Los datos de caudales fueron proporcionados de las mediciones realizadas por el equipo técnico de la empresa EMRAQ-EP.

El punto 2 se encuentra en la salida biorreactor, el cual, al ser de mezcla completa se estima que no habrá variación de parámetros en sus diferentes puntos. De la misma manera que en el punto 1, el envase fue previamente enjuagado en el flujo para tomar la alícuota.

En el punto 3, la toma de muestra se realizó en la salida del clarificador secundario por lo que fue necesario utilizar un extensor para alcanzar el flujo, el procedimiento de llenado de los envases fue similar que en los puntos anteriores.

Los parámetros que se midieron para la caracterización se expresan en la Tabla 13, además de los puntos donde se tomaron las muestras, sus unidades de medida y método de análisis.

**Tabla 13**

*Parámetros establecidos para la campaña de muestreo*

Parámetros/ Puntos	1	2	3	Método de Análisis
	Tanque Homogenizado r 2	Biorreactor	Clarificador Secundario	
Caudal Promedio (m3/s)				Disponible por la PTAR de la empresa EMRAQ-EP
pH				Electrométrico
Temperatura (°C)				Electrométrico
Conductividad (µs)				Electrométrico
Sólidos Totales Disueltos (mg/L)				Electrométrico
Sólidos Suspendidos Totales (mg/L)				MAM-31/APHA 2540 D MODIFICADO DO
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/L)				APHA 2540 E
Sólidos Sedimentables (mg/L)				MAM-28/APHA 2540 F MODIFICADO DO
Demanda Biológica de Oxígeno (mg/L)				MAM-38/APHA 5210 B Modificado
Demanda Química de Oxígeno (mg/L)				MAM-23 A / MERCK 112,28,29,13 2 Modificado
Nitrógeno Total KJENDAHL (mg/L)				Disponible por la PTAR de la empresa EMRAQ-EP

<b>Oxígeno Disuelto (mg/L)</b>	MAM- 22/APHA 4500-O C MODIFICA DO
<b>Nitrito (NO<sub>2</sub>) (mg/L)</b>	COLORIME TRICO
<b>Nitrato (NO<sub>3</sub>) (mg/L)</b>	COLORIME TRICO

*Nota:* La tabla indica los métodos de muestreo aplicados por el laboratorio para el análisis de muestras.  
Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

#### 4.2.3. Campaña de Muestreo 2

Adicionalmente se realizó una tercera toma de muestras con el fin de identificar parámetros necesarios tanto para el fraccionamiento de la DQO como para la determinación de los coeficientes cinéticos y estequiométricos para parametrizar el modelo.

Los materiales utilizados fueron:

- 8 embaces plásticos de 6L
- 3 conos Imhoff
- 1 hielera
- 1 recipiente plástico
- 1 probeta de 500 ml

El muestreo se realizó durante 3 horas tomando un total de 4 muestras simples de 1L cada una en los diferentes puntos, para posteriormente ser homogenizadas. Las alícuotas para el fraccionamiento de la DQO se tomaron en la entrada al biorreactor (influyente) y en la salida (efluente), los resultados y los métodos de análisis empleados por el laboratorio se observan en la Tabla 14

**Tabla 14***Resultados de análisis para el fraccionamiento de la DQO*

<b>Influente</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Método de análisis</b>
<b>DQO</b>	mg/L	7250	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>DQO soluble</b>	mg/L	1327	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>Efluente</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Método de análisis</b>
<b>DQO</b>	mg/L	1100	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>DQO soluble</b>	mg/L	57	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS

*Nota:* La tabla indica los parámetros analizados en la campaña 2 para el cálculo de fracciones de la DQO. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Por otro lado, para el cálculo de los coeficientes, las alícuotas del influente fueron sedimentadas e inoculadas en el licor de mezcla tomado directamente del biorreactor. Los resultados de las alícuotas tomadas se observan en la Tabla 15.

**Tabla 15**

*Resultados de análisis de alícuotas para la determinación de coeficientes cinéticos y estequiométricos*

<b>Inoculación - Alícuota 1</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Método de análisis</b>
<b>DQO</b>	mg/L	2590	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>DQO soluble</b>	mg/L	407	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>Inoculación - Alícuota 2</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Unidad</b>	<b>Resultado</b>	<b>Método de análisis</b>
<b>DQO</b>	mg/L	2860	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS
<b>DQO soluble</b>	mg/L	357	PE-01/SM Ed.23, 2017, 5220 D/ Espectrofotometría VIS

*Nota:* La tabla indica los parámetros medidos a partir de la inoculación para el cálculo de coeficientes estequiométricos y cinéticos. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Las muestras fueron almacenadas en una hielera para ser transportadas inmediatamente al laboratorio certificado donde se especificó el tipo de filtro a utilizar (0.45um) para la determinación de DQO soluble.

### **4.3. Caracterización del Influyente**

El programa GPS-X posee un software en el cual se ingresan los valores de entrada para la caracterización del influente y su calibración inicial.

Para la calibración inicial se debe comprobar que los valores de entrada para el usuario coincidan con los valores compuestos (sin que den valores negativos en todas las celdas) con esto el usuario puede estar seguro que la calibración es correcta, si los datos calculados

no coinciden deben ser ajustados hasta que se logra un aproximado aceptable (Hydromantis, 2017).

La calibración del *influent advisor* se realizó con los valores diarios obtenidos en la entrada del biorreactor, el ajuste para las entradas.

Las casillas subrayadas son los datos promedios de entrada del usuario, los fracciones y coeficientes fueron ajustados para lograr la calibración de los valores compuestos y coincidan con los datos de entrada de la campaña como se puede observar en la Figura 27.

**Figura 27**

*Caracterización con Influent advisor*

User Inputs				State Variables				Composite Variables			
<b>Influent Composition</b>				<b>Inorganic Suspended Solids</b>				<b>Volatile Fraction</b>			
cod	total COD	gCOD/m3	<u>3374.0</u>	xii	inert inorganic suspended solids	g/m3	2180.0	ivt	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	0.103
x	total suspended solids	g/m3	<u>2430.0</u>	<b>Organic Variables</b>				<b>Composite Variables</b>			
tkn	total TKN	gN/m3	<u>160.25</u>	si	soluble inert organic material	gCOD/m3	85.7	x	total suspended solids	g/m3	2430.0
<b>Organic Variables</b>				ss	readily biodegradable substrate	gCOD/m3	2111.1	vss	volatile suspended solids	g/m3	250.0
xba	active autotrophic biomass	gCOD/m3	0.0	xi	particulate inert organic material	gCOD/m3	993.6	xiss	total inorganic suspended solids	g/m3	2180.0
xu	unbiodegradable particulates from cell de...	gCOD/m3	0.0	xs	slowly biodegradable substrate	gCOD/m3	183.6	bod	total carbonaceous BOD5	gO2/m3	1676.1
<b>Dissolved Oxygen</b>				xbh	active heterotrophic biomass	gCOD/m3	0.0	cod	total COD	gCOD/m3	3374.0
so	dissolved oxygen	gO2/m3	<u>0.14</u>	xba	active autotrophic biomass	gCOD/m3	0.0	tkn	total TKN	gN/m3	160.3
<b>Nitrogen Compounds</b>				xu	unbiodegradable particulates from cell de...	gCOD/m3	0.0	<b>Additional Composite Variables</b>			
sno	nitrate and nitrite	gN/m3	<u>850.0</u>	xsto	internal cell storage product	gCOD/m3	0.0	sbod	filtered carbonaceous BOD5	gO2/m3	1542.0
snn	dinitrogen	gN/m3	0.0	<b>Dissolved Oxygen</b>				xbod	particulate carbonaceous BOD5	gO2/m3	134.1
<b>Alkalinity</b>				so	dissolved oxygen	gO2/m3	0.14	sbodu	filtered ultimate carbonaceous BOD	gO2/m3	2111.1
salk	alkalinity	mole/m3	7.0	<b>Nitrogen Compounds</b>				xbodu	particulate ultimate carbonaceous B...	gO2/m3	183.6
<b>Influent Fractions</b>				sno	nitrate and nitrite	gN/m3	850.0	bdodu	total ultimate carbonaceous BOD	gO2/m3	2294.8
icv	XCOD/VSS ratio	gCOD/gVSS	<u>4.708</u>	snn	dinitrogen	gN/m3	0.0	scod	filtered COD	gCOD/m3	2196.8
fbod	BOD5/BODultimate ratio	-	<u>0.7304</u>	<b>Alkalinity</b>				xcod	particulate COD	gCOD/m3	1177.2
<b>TSSCOD Model Coefficients</b>				salk	alkalinity	mole/m3	7.0	stkn	filtered TKN	gN/m3	106.9
frsi	inert fraction of soluble COD	-	<u>0.039</u>	<b>Stoichiometric Ratios</b>				xtkn	particulate TKN	gN/m3	53.4
frxs	substrate fraction of particulate COD	-	<u>0.156</u>	← COD / TKN	gCOD/gN	21.1	tn	total nitrogen	gN/m3	1010.3	
frxbh	heterotrophic fraction of particulate COD	-	0.0	← CODbiodeg / TKN	gCOD/gN	14.3					
fnh	ammonium/TKN ratio	-	0.63	← NH4 / TKN	-	0.63					
fxn	part. org. N/total org. N ratio	-	0.9	← VSS / TSS	gVSS/gTSS	0.103					
ivt	VSS/TSS ratio	gVSS/gTSS	<u>0.1029</u>	← XCOD / VSS	gCOD/gVSS	4.71					
<b>ASM1 Nutrient Fractions</b>				← BOD / COD	gO2/gCOD	0.497					
ixbn	N content of active biomass	gN/gCOD	0.086								
ixun	N content of endogenous/inert mass	gN/gCOD	<u>0.053</u>								

Equation for: No Selection      NO SELECTION

Change selection by:  
 clicking on variable  
 moving over variable

*Nota:* En la figura se identifica la interfaz del *Influent Advisor*. Se ingresan los datos medidos y calculados en la columna izquierda, en la columna central se observan las variables de estado y en la derecha las variables compuestas. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X)

#### 4.3.1. Fraccionamiento de la DQO

Según el protocolo de Asociación Holandesa de Investigación Aplicada al Agua (STOWA) el fraccionamiento de la DQO se lo realiza mediante filtraciones de muestras en el influente y efluente para la caracterización de aguas residuales.

La DQO total en el influente está representada por las siguientes ecuaciones:

Ecuación para DQO total en el influente:

$$DQO_{inf,tot} = S_s + S_i + X_s + X_i \quad (5)$$

La DQO soluble fue medida en el laboratorio mediante filtración a 0,45  $\mu\text{m}$ . Mediante la siguiente ecuación se pudo determinar sus componentes.

Ecuación para DQO soluble del influente:

$$DQO_{inf,sol} = S_s + S_i \quad (6)$$

Para la determinación de la fracción soluble no biodegradable ( $S_i$ ), de acuerdo con Loaiza (2007), se considera que el substrato biodegradable ( $S_s$ ) deja un remanente en DQO  $eff,sol$ , por lo que se considera un factor de (0,9), como se observa en la siguiente ecuación para determinar la fracción soluble no biodegradable:

$$S_i = DQO_{eff,sol} * 0.9 \quad (7)$$

La fracción soluble fácilmente biodegradable ( $S_s$ ) se calcula mediante la diferencia expresada en la ecuación:

$$S_s = DQO_{inf,sol} - S_i \quad (8)$$

Para la obtención de las fracciones  $X_s$  y  $X_i$  se emplean las siguientes ecuaciones.

Ecuación para determinar  $DBO_U$ :

$$DBO_U = \frac{DBO_5}{1 - \exp(-k*t)} \quad (9)$$

Para determinar la DQO biológica se aplica la siguiente ecuación:

$$DQO_{bio} = X_S + S_S = \frac{DBO_U}{1-f_{DBO}} \quad (10)$$

El factor  $f_{DBO}$  relaciona la  $DQO_{bio}$  con la  $DBO_U$  indicando que esta última no representa la totalidad de la fracción biodegradable. El valor adoptado para este factor es de 0.15 siguiendo con las sugerencias de la literatura (Loaiza, 2007).

Ecuación para Sustrato particulado lentamente biodegradable:

$$X_S = DQO_{bio} - S_S \quad (11)$$

Ecuación para Sustrato orgánico inerte particulado:

$$X_i = DQO_{inf,tot} - S_S - S_i - X_S \quad (12)$$

#### **4.3.2. Determinación de $DBO_u$**

Para el cálculo de  $DBO_u$  empleando los valores de  $DBO_5$  se necesita conocer el valor de  $k$  (constante), cuando se desconoce los valores de  $k$  se determinan a partir de una serie de mediciones de  $DBO$ .

El análisis de  $DBO$  en aguas residuales suele ser a  $20^\circ\text{C}$ , estos cálculos dependen de una constante  $k$  la cual posee un valor típico en base  $e$  puede ser igual a  $0.23 \text{ días}^{-1}$  donde la constante varía dependiendo del agua residual (Metcalf y Eddy, 1995).

La absorción de oxígeno varía en el tiempo y los diferentes valores que posee  $k$ , la cual es posible determinar a diferentes temperaturas lo cual se emplea la siguiente ecuación derivada de la relación de Van't Hoff Arrhenius (Metcalf y Eddy, 1995):

$$k_t = k_{20} \theta^{(T-20)} \quad (13)$$



Donde se ha llegado a determinar que los valores varían entre 1.135 cuando la temperatura se encuentra de 4 a 20 °C y 1.056 a la temperatura de 20 a 30 °C (Metcalf & Eddy, 1995).

Cálculo de  $DBO_U$  (Para determinar la DQO biológica se aplica la siguiente ecuación: )

$$DBO_U = \frac{DBO_5}{1 - e^{(-kt)}} \quad (9)$$

Los resultados obtenidos del cálculo de  $DBO_U$  se expresan en la Tabla 16.

**Tabla 16**

*Cálculo de  $DBO_U$*

	DIA 1			DIA 2			DIA 3			DIA 4		
	E	B	S	E	B	S	E	B	S	E	B	S
<b>DBO 5</b>	1676	1657	292	955	550	28	1501	1696	32	1138	3508	69
<b>DBOU</b>	2294,76	2376,62	418,22	1396,28	863,49	43,23	2125,89	2418,90	46,52	1657,12	5265,30	103,78
<b>Temperatur</b>	22,4	20,7	20,75	20,03	19	19,23	21,15	20,9	20,23	20,17	19,63	19,6
<b>Θ</b>	1,056	1,056	1,056	1,056	1,135	1,135	1,056	1,056	1,056	1,056	1,135	1,135
<b>K (dia^-1)</b>	0,2621	0,2389	0,2396	0,2304	0,2026	0,2086	0,2449	0,2416	0,2329	0,2321	0,2195	0,2186

*Nota:* La tabla indica los resultados obtenidos a partir del cálculo de  $DBO_U$ . Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Donde, E equivale a los datos de la entrada, B equivale a los datos del biorreactor y S equivale a los datos del Clarificador Secundario

Se calculan los promedios para cada proceso para determinar la relación DBO5/DBOU

**Tabla 17**

*Promedio de la relación DBO5/DBOU*

<b>PROMEDIO E</b>	<b>PROMEDIO B</b>	<b>PROMEDIO C</b>
<b>0,70</b>	0,675388542	0,674658488

*Nota:* La tabla indica los valores promedio del cálculo de DBOu, los cuales servirán para el cálculo de fracciones. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Donde, E equivale a los datos de la entrada, B equivale a los datos del biorreactor y S equivale a los datos del Clarificador Secundario.

#### **4.3.3. Modelación de la PTAR**

Se seleccionan los diferentes procesos que se van a simular en el programa con respecto a los datos adquiridos en la PTAR, en este caso vamos a representar la parte biológica de la planta de Tratamientos de la empresa RASTRO.

Se cargan los datos para cada proceso, en formato Excel con su respectivo nombre críptico con el fin de que el programa reconozca los parámetros correctamente, para lograr una calibración con mayor profundidad y predecir el comportamiento de la PTAR.

En la caracterización del influente se utilizó los datos de entrada en el software *Influent advisor*, después se procedió a seleccionar los parámetros medidos en la campaña de muestreo (DQO, SST, TKN, OD, DBO5/DBOU, etc.) y los cálculos previos realizados para la calibración de cada proceso de la PTAR.

Para obtener las primeras estimaciones, se simula desde el día cero, cuyos resultados expresan los valores medidos en el día uno de la campaña, ya que son tomados como condiciones iniciales. Consecuentemente al realizar la simulación en el día uno, los resultados de influente plasman las mediciones del segundo día de campaña.

#### **3.1.6.1 Selección de Modelo de Influyente**

Para la entrada de datos del modelo se seleccionó el waster influent, el cual abarcara los datos tomados en la entrada del Biorreactor, en el influente residual de entrada se selecciona el modelo *tsscod* con la librería *cnlib* (carbono, nitrógeno).

El programa GPS-X posee varios modelos para el influente disponibles, los cuales dependen de la biblioteca seleccionada, el modelo biológico sirve para relacionar las variables de estado con las variables compuestas, el modelo *tsscod* puede ser aplicado con éxito si el influente se caracteriza usando DQO y sólidos suspendidos como los componentes principales. Al seleccionar este modelo las entradas del usuario serán DQO TOTAL, sólidos suspendidos totales y TKN (Hydromantis, 2017).

#### **3.1.6.2 Modelo de Biorreactor**

En la sección “Suspended Growth Processes” se escogió el modelo de tanque “Completely Mixed-Tank” el cual corresponde al biorreactor de la PTAR, este tanque también es recomendado en la página del programa para simular tratamiento biológico (Hydromantis, 2019).

Se escogió el modelo ASM1 el cual cumple con las expectativas del trabajo y fue escogido anteriormente como modelo biológico en el influente, sin embargo, el modelo mantis no es compatible con la librería seleccionada.

En el programa GPS-X para el biorreactor se puede ingresar valores físicos, operacionales, estequiométricos y cinéticos.

Para las condiciones iniciales del biorreactor se tomaron en cuenta los datos del día 1 en el punto 2 del muestreo, los cuales fueron ingresados al programa *Influent Advisor* para la obtención de las variables de estado requeridas en el GPS-X.

### **3.1.6.3 Modelo de Clarificador Secundario**

En la sección “Secondary Clarifiers” se optó por implementar el clarificador con las mismas características físicas de la PTAR en forma cónica, se seleccionó el modelo “*Empiric*” el cual es el más simple para realizar la calibración hidráulica.

En el programa GPS-X para modelar el clarificador secundario se puede ingresar valores físicos y operacionales. El modelo de clarificador secundario seleccionado, no permite el ingreso de condiciones iniciales por cual no requiere calibración.

### **3.1.6.4 Selección de Herramienta de Descarga**

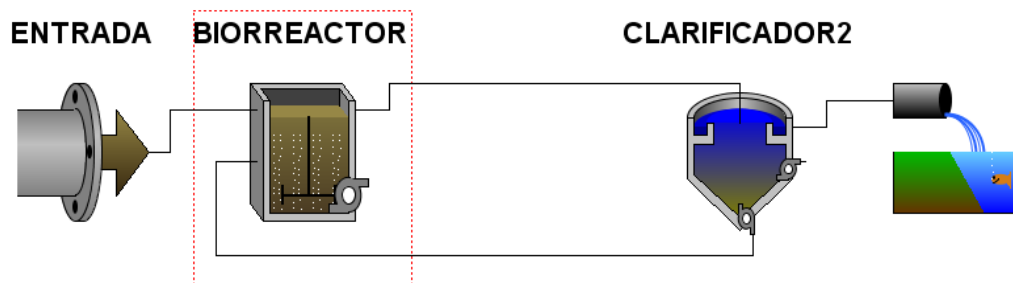
Para la descarga de la PTAR se escoge la sección “*tools*” el ícono de “*wastewater outfall*” y así obtener los datos de salida, el modelo seleccionado ya está “*por defecto*”.

Luego se procede a realizar las conexiones correspondientes para la modelación.

Para identificar cada proceso y sus datos obtenidos se etiqueta cada ícono como también sus entradas y salidas Figura 28.

## Figura 28

*Etiquetado de componentes del modelo en el programa GPS-X*



*Nota:* En la figura se etiquetan los componentes del modelo seleccionados en el software GPS-X. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

Después de tener el esquema de la PTAR en el GPS-X se configura las propiedades de la misma y se despliega una pantalla para ingresar datos promedios.

Los promedios utilizados para la PTAR de la empresa RASTRO se obtuvieron de la campaña de muestreo y del manual de la empresa detallados en la Tabla 18.

### Tabla 18

*Condiciones ambientales en la PTAR*

<b>Temperatura del Líquido</b>	<b>20.32 °C</b>
<b>Temperatura del aire</b>	15 °C
<b>Elevación sobre el nivel del mar</b>	2850 m
<b>Presión barométrica al nivel del mar</b>	1 atm

*Nota:* La tabla indica las condiciones ambientales con las que trabaja la PTAR, los valores indicados se ingresan en la creación del modelo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

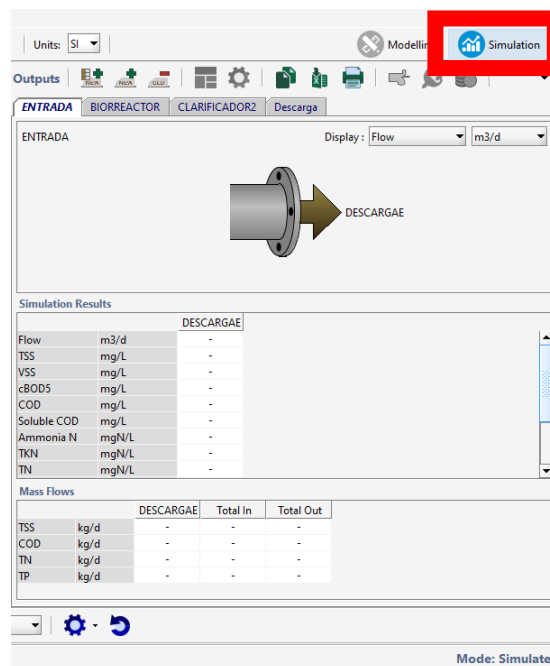
En la pestaña simulación “*setup*” se puede seleccionar la fecha de la cual deseamos que inicie la simulación.

#### 4.3.4. Simulación

A continuación, se procede a realizar la simulación en el programa, el ícono se encuentra ubicado en la parte superior derecha, donde se espera que se construya el modelo, Figura 29.

**Figura 29**

*Ícono de simulación en el software GPS-X*



*Nota:* En la figura se marca el ícono de simulación del software GPS-X, el cual debe estar marcado para la creación de escenarios, análisis de sensibilidad, y optimización de parámetros, entre otros procedimientos. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

A continuación, se procede a crear una pestaña de cada proceso la cual nos servirá para ingresar los datos y obtener una simulación dinámica.

#### 4.3.5. Creación de Escenario

Para ingresar los datos obtenidos de la campaña de muestreo se debe crear un escenario propio el cual, permitirá realizar la simulación. Esto se hace para la

caracterización del influente, calibración hidráulica, cinética y estequiométrica y dimensionamiento de la PTAR.

Se abrirá una ventana donde se observa un escenario pre-establecido por el programa llamado “*Default*”. El cual tiene valores por defecto, se designa un nombre al nuevo escenario y se da clic en aceptar. Se selecciona el nuevo escenario creado para empezar a ingresar los datos correspondientes del modelo.

#### **4.4. Parametrización**

##### **4.4.1. Determinación de $Y_H$**

Para la determinación del coeficiente estequiométrico se utilizó el fraccionamiento de DQO obtenida del programa *influent advisor*, se tomó en cuenta sólo los datos de la entrada y el biorreactor. Los datos de salida para el fraccionamiento de DQO son muy bajos los cuales resultan valores negativos lo cual se vuelven despreciables para el cálculo de los coeficientes estequiométricos.

El coeficiente se calculó con la siguiente ecuación:

$$Y_H = \frac{\Delta DQO_{Part}}{\Delta DQO_{Sol}} \quad (2)$$

En la siguiente Tabla 19, se encuentran los datos para el cálculo de  $Y_H$  con la ecuación anterior.

**Tabla 19**

*Valores calculados para Yh*

<b>Valores de DQO (mg/L) para la determinación de Yh</b>		
<b>PARAMETRO</b>	<b>MUESTRAS COMPUESTAS</b>	
	<b>PRIMERA MUESTRA</b>	<b>SEGUNDA MUESTRA</b>
<b>DQO TOTAL</b>	2590	2860
<b>DQO SOL</b>	407	357
<b>DQO PART</b>	2183	2503
<b>Δ DQO SOL</b>	50	
<b>Δ DQO PART</b>	320	
<b>Yh</b>	6.4	

*Nota:* La tabla indica el valor calculado del coeficiente de rendimiento heterótrofo (Yh) mediante la aplicación del protocolo de la STOWA. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Donde, E equivale a los datos de la entrada y B equivale a los datos del biorreactor

Aplicando la ecuación antes mencionada se obtuvo los siguientes resultados para Yh.

#### **4.4.2. Determinación de Bh**

Para la determinación del coeficiente estequiométrico se utilizó la siguiente ecuación:

$$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_H * (1 - f_p)} \quad (4)$$

Los parámetros estequiométricos necesarios son  $Y_H$  y  $f_p$  conforme al ASM1 se van a considerar los siguientes valores  $Y_H = 6.4$  determinado en la campaña  $f_p = 0.08$  según lo mencionado por Henze, (2002) y para la pendiente  $b'_H$  se tomará en cuenta los valores citados en la literatura por Solfrank, (1988) donde  $b'_H = 0.21 \text{ d}^{-1}$  y Sozen, (1998) donde  $b'_H = 0.2 \text{ d}^{-1}$  se utilizará un valor promedio.



Aplicando la Ecuación 4 se obtuvo los siguientes resultados para  $b_H$

$$b_H = 0.0412$$

Donde:  $Y_H = 6.4$

$$f_p = 0.08$$

$$b'_H = 0.205$$

#### 4.4.3. Entradas Físicas y Operacionales

Entrada programa GPS-X requiere de una serie de dimensionamientos de la PTAR.

Para establecer el caudal de entrada, se ingresa en los datos de flujo en el influente (Tabla 20).

**Tabla 20**

*Flujo de entrada al biorreactor*

Parámetro	Entrada	Unidades
Caudal de Entrada	10	L/s

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (López et. al, 2008).

Los datos físicos del biorreactor se extrajeron del manual de operación de la planta y de los planos levantados por Torres (2003) (Tabla 21).

**Tabla 21**

*Datos físicos y operacionales del biorreactor*

Físico	Parámetro	Dato	Unidades
	Maximun Volumen	300	m <sup>3</sup>
	Tank Depth	3.5	m
Operacional	Aeration Method	Mechanical Surface Aeration	-
	Specify Oxygen Transfer	Entering Mechanical Power	-
	Aeration Power	10	hp

*Nota:* La tabla se expresan los datos físicos y operacionales de entrada en el programa para el biorreactor. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los parámetros físicos del clarificador se establecieron con ayuda de los planos levantados por Torres (2003). Cuyos datos empleados para el modelo se observan en la Tabla 22.

**Tabla 22**

*Datos físicos y operacionales del sedimentador secundario*

<b>Físico</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Dato</b>	<b>Unidades</b>
	Surface Area	81.99	m <sup>2</sup>
	Depth	3.5	M
<b>Operacional</b>	Specify Solids Removal	DEFAULT	-
	Pumped Flow	DEFAULT	-
	Removal Efficiency	DEFAULT	Hp

*Nota:* La tabla indica los parámetros físicos y operacionales de entrada en el programa para modelar el sedimentador secundario. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

#### **4.5. Análisis de Sensibilidad**

El análisis de sensibilidad permite identificar la correlación entre las variables de estudio y los parámetros como coeficientes cinéticos y estequiométricos además de las fracciones aplicadas para la generación de un modelo confiable.

Este proceso se efectúa con la finalidad de validar los resultados del modelo simulado, y establecer los parámetros que se deben ajustar durante la calibración, además ayuda a identificar el mayor impacto de cada parámetro, en la respuesta del modelo.

El programa GPS-X posee un análisis de sensibilidad en estado estacionario, en fase dinámica y en tiempo de análisis de sensibilidad dinámica (Hydromantis, 2017).

##### **Parámetros más sensibles**

Después de realizar el análisis de sensibilidad a cada variable de entrada tanto del influente como del biorreactor se determinó las siguientes variables como las más sensibles

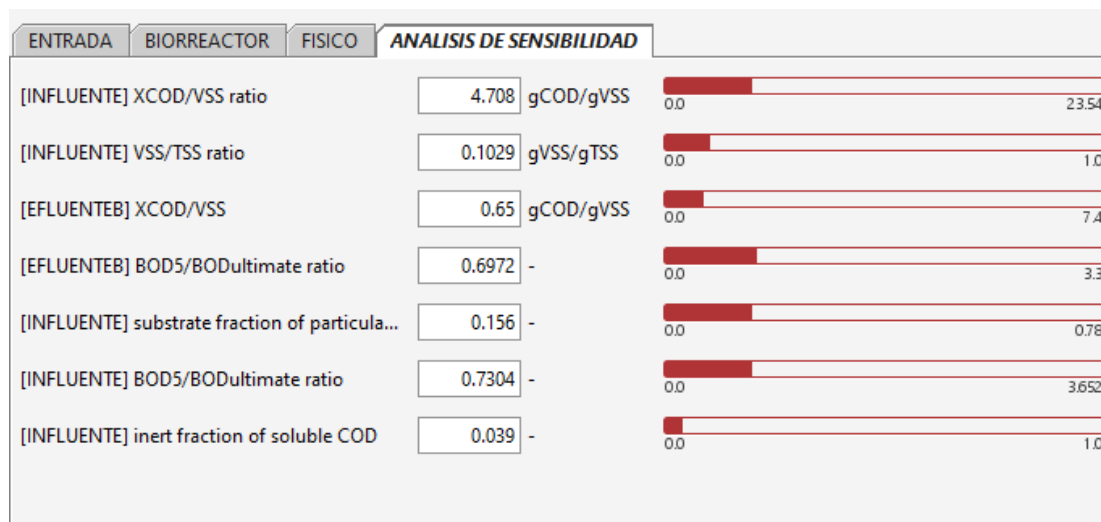
(Figura 30), ya que afectan al comportamiento del modelo produciendo variaciones en los resultados de salida.

Las variables analizadas presentaron dos tipos de sensibilidad crítica y nula, esto se puede apreciar en las gráficas generadas por el programa durante el análisis.

El análisis de sensibilidad se realiza en base a las variables de salida de interés del estudio, donde podemos apreciar que la sensibilidad crítica produce variaciones significativas en los resultados de salida, mientras que la sensibilidad nula no altera al modelo ni sus pronósticos finales.

### Figura 30

#### Variables más sensibles



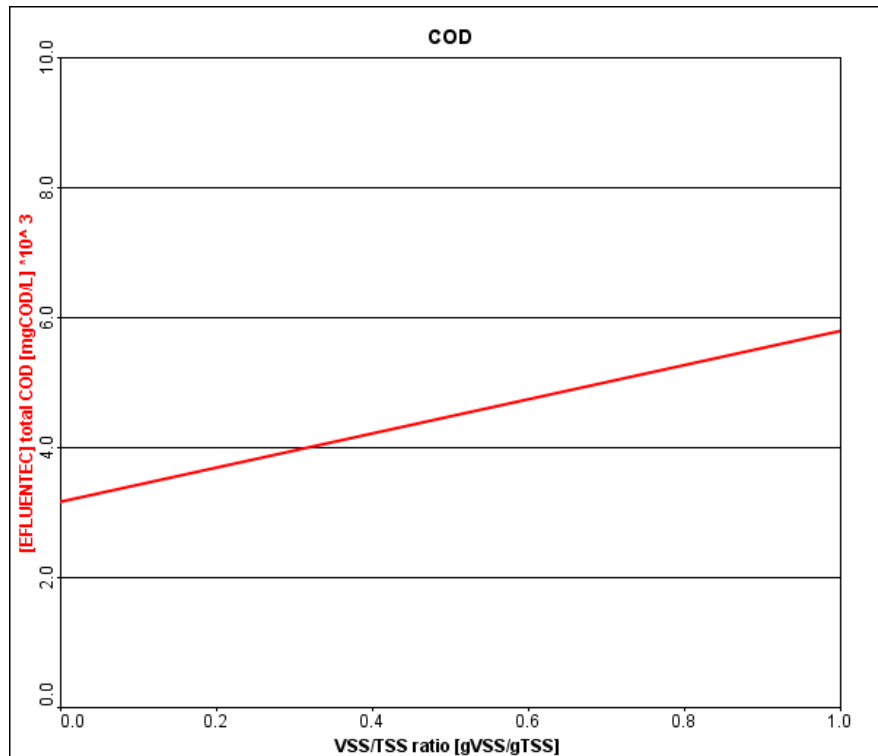
*Nota:* En la figura identifican las variables que presentaron una sensibilidad después de realizar el análisis. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

La Figura 31 representa el análisis de sensibilidad realizado en la descarga de la DQO total con respecto a la variable de la fracción VSS/TSS, donde se aprecia que la pendiente varía conforme aumenta la concentración, lo cual nos indica que existe una

dependencia en el comportamiento, afectando a los resultados del modelo. Se evidencia una sensibilidad crítica entre ambas variables de estudio.

### Figura 31

*Variable con sensibilidad crítica*

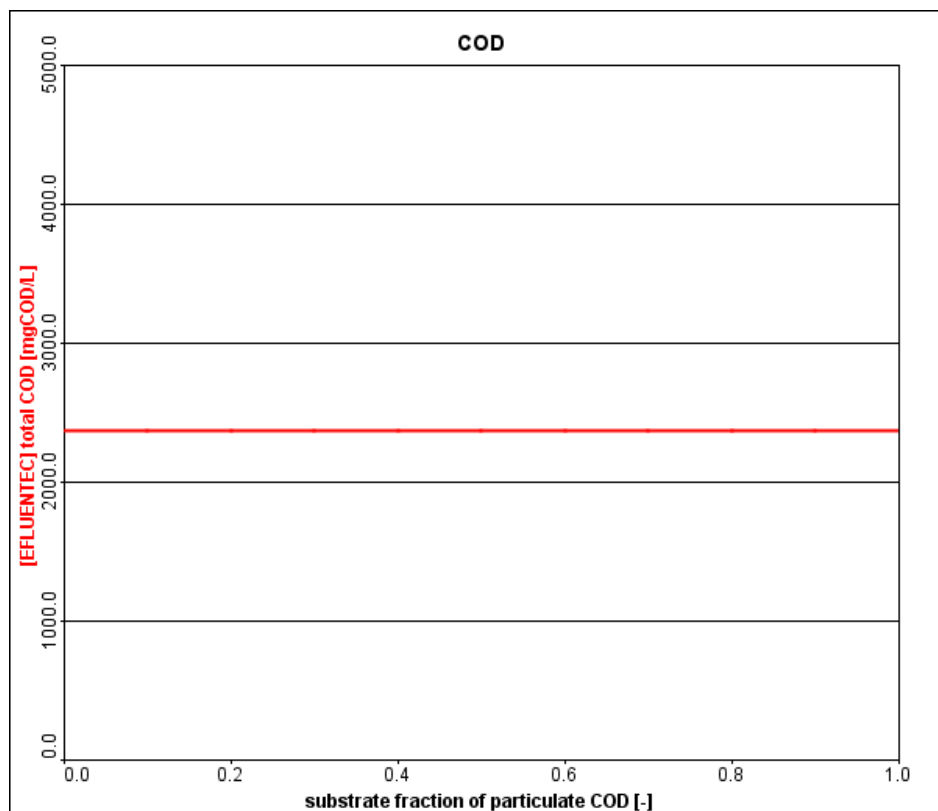


*Nota:* La pendiente expresada por la línea roja, indica que la variable es sensible. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

La Figura 32 representa el análisis de sensibilidad realizado en la descarga de la DQO total con respecto a la variable fracción particulada del sustrato DQO, donde se puede apreciar que la pendiente se mantiene constante conforme aumenta la concentración de la variable, lo cual nos indica que no afecta a los resultados del modelo. Se evidencia una sensibilidad nula entre ambas variables analizadas.

**Figura 32**

*Variable con sensibilidad nula*



*Nota:* La línea roja paralela al eje x, indica que la variable no es sensible al parámetro analizado. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019 (GPS-X).

#### **4.6. Calibración del modelo con el software GPS-X**

El software GPS-X permite la optimización de parámetros más sensibles obtenidos con el análisis de sensibilidad, donde mediante una serie de simulaciones busca el valor auto-calibrado de cada uno de ellos para así estimar un mejor ajuste de bondad del modelo y lograr aproximar o coincidir las curvas de la simulación con los datos reales de la PTAR bajo estudio.

De acuerdo con (Hydromantis, 2017), la calibración de un modelo también se conoce como estimación de parámetros, proceso que se realiza mediante el ajuste de los mismos, con el fin de reducir al mínimo las variaciones entre valores medidos y simulados.

La calibración puede realizarse de forma manual, no obstante, el software cuenta con una serie de herramientas que automatizan el proceso, facilitando el trabajo al usuario. De acuerdo con Hydromantis (2017), el sistema se basa en un algoritmo de optimización multiparámetro dinámico no lineal, donde los parámetros seleccionados para la auto-calibración varía su concentración con respecto a las variables de interés del estudio para así lograr tener una curva de la simulación más cercana a los datos reales ingresados en el software. Por ende, las simulaciones se detienen cuando el programa ha determinado los valores óptimos los cuales pueden iguales, próximos o muy diferentes a los valores medidos en el trabajo experimental.

El DPE (dynamic parameter estimator) del programa GPS-X se encarga de variar las concentraciones de los parámetros más sensibles, realizando iteraciones y variaciones bajo un rango que le usuario puede definir conforme las necesidades del modelo para así lograr obtener una simulación más cercana a los datos reales medidos

Una vez que se ha creado el diseño, se añaden gráficos de las variables de salida, cuyos datos se obtuvieron en la campaña de muestreo. En este caso se cuenta con datos de DBO5, DQO, NTK, SST, SSV, OD, NO2 y NO3, entre ellos se elegirán los más relevantes.

Los resultados de las simulaciones sin calibración pueden resultar o no favorables, por lo que a través del software se optimizaron las fracciones que influyen en las variables de salida (Tabla 23).

**Tabla 23***Fracciones calibradas de influente y biorreactor*

PARAMETRO	VALOR CALCULADO	AJUSTADO	VARIABLE SENSIBLE	OBSERVACION
INFLUENTE				
<b>XCOD/VSS RATIO</b>	4.708	2.8056498	DQO, SSV, SST, DBO	OPTIMIZADO
<b>VSS/TSS RATIO</b>	0.1029	0.51801524	DQO, SSV, SST	OPTIMIZADO
<b>FRXS</b>	0.156	1.20	SSV, SST	OPTIMIZADO
BIORREACTOR				
<b>XCOD/VSS</b>	0.65	4.99	SSV, SST	OPTIMIZADO

*Nota:* La tabla se identifican las fracciones calibradas de influente y biorreactor, además de las variables sensibles. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

#### 4.7. Coeficiente de Determinación $R^2$

Se define como el porcentaje de variación de la variable de respuesta explicando su relación con una o más variables predichas, refleja la bondad de ajuste de un modelo estudiando la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables explicativas o llamadas independientes.

El coeficiente estadísticamente está representado en un intervalo entre 0 y 1 lo cual significa que mientras más cercano de 1 se ubique el resultado mejor será el ajuste o calibración de un modelo respecto a la variable de estudio.

Este coeficiente indica la calidad de una función o modelo para replicar los resultados de una hipótesis y/o experimento o predecir futuros resultados (Fernández, 2011).

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los resultados presentados a continuación fueron obtenidos a partir de las campañas de muestreo detalladas en la metodología, como también de las simulaciones realizadas en el programa GPS-X.

### **5.1. Resultados de la Campaña de Muestreo 1**

Los datos obtenidos a partir de la campaña de muestreo en la PTAR de la empresa RASTRO durante la tercera semana de agosto del 2019 donde se indica en la Tabla 24 la caracterización de las aguas residuales con cuatro valores por parámetro en cada uno de los puntos establecidos. Los datos serán ingresados al programa para la creación del modelo, la calibración y validación del mismo.



**Tabla 24**

*Resultados de la medición de parámetros*

Parámetros/ Puntos	DIA 1			DIA2			DIA3			DIA4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>pH</b>	7,24	7,3	7,28	7,38	7,47	7,51	7,16	7,35	7,47	7,43	7,51	7,64
<b>Temperatura (°C)</b>	22,4	20,7	20,75	20,03	19	19,23	21,15	20,9	20,23	20,17	19,63	19,6
<b>Conductividad (S/m)</b>	1721,50	1258	1341,5	1349,67	876,33	890	1719	1368	1330,67	1279	1166,67	1128,67
<b>SST (mg/L)</b>	2430	5710	930	1760	5500	600	2780	7170	840	1890	6500	760
<b>SSV (mg/L)</b>	250	3110	190	40	2090	80	140	2030	20	310	5250	70
<b>DBO5 (mg/L)</b>	1676	1657	292	955	550	28	1501	1696	32	1138	3508	69
<b>DBOu (mg/L)</b>	2294,76	2376,62	418,22	1396,28	863,49	43,23	2125,89	2418,90	46,52	1657,12	5265,30	103,78
<b>DQO (mg/L)</b>	3374	6673	1148	2910	3829	135	2864	4610	106	2288	11265	436
<b>OD (mg/L)</b>	0,14	0,6	0,94	0,68	2,05	3,25	1,36	1,1	2,84	1,23	2,09	3,99
<b>NO2 (mg/L)</b>	60	200	300	70	900	300	140	1000	2500	150	100	600
<b>NO3 (mg/L)</b>	790	323	115	710	132	40,8	800	290	108	680	326	121
<b>Datos Históricos</b>												
<b>NTK (mg/L)</b>	160,25	321	94,5	198,25		33,63	277,75		64,07	212,08	321	64

*Nota:* La tabla expresa los resultados de los parámetros analizados en la campaña 1, el primer punto (1) corresponde al influente, el segundo (2) a la salida del biorreactor y el tercero (3) a la salida del clarificador. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

## 5.2. Dimensiones de los Equipos

Para obtener los datos reales de las dimensiones de los equipos, se procedió a gestionar en la Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento EPMAPS, la cual proporcionó los planos de la PTAR.

En la Tabla 25 se identifican las especificaciones técnicas del biorreactor, además de los equipos y accesorios complementarios para mantener las condiciones de tratamiento en niveles óptimos.

**Tabla 25**

*Especificaciones Técnicas del Biorreactor*

<b>Especificaciones Técnicas Biorreactor</b>	
<b>Tipo</b>	Aireación
<b>Volumen</b>	300 m <sup>3</sup>
<b>Largo</b>	17m
<b>Ancho</b>	6m
<b>Alto</b>	3.5m
<b>Nivel de Agua</b>	3.35m
<b>Tiempo de Residencia en Caudal Pico</b>	15 h
<b>Tiempo de Adaptación de Lodos</b>	10 Días
<b>Caudal Pico</b>	480 m <sup>3</sup> /día
<b>Todas las tuberías son de PVC de alta presión</b>	
<b>Equipo</b>	
<b>Aireadores</b>	2.5 HP Cantidad 4
<b>Accesorios</b>	
<b>Válvulas Mariposa</b>	Ø3" Cantidad: 1

<b>Válvulas Check</b>	Ø3"
	Cantidad: 1
<b>Válvulas Apertura rápida</b>	Ø3"
	Cantidad: 1
<b>Codos</b>	Ø3"
	Cantidad: 2

*Nota:* La tabla indica los componentes del biorreactor y sus especificaciones técnicas, de donde se extraen valores para la creación del modelo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Torres, 2003).

El sedimentador secundario constituye la etapa de tratamiento siguiente al biorreactor, por lo cual se incluyó para la creación del modelo y la simulación. En la Tabla 26 se observan sus especificaciones técnicas, equipos y accesorios complementarios para un correcto funcionamiento.

**Tabla 26**

*Especificaciones Técnicas del Sedimentador Secundario*

<b>Especificaciones Técnicas Sedimentador Secundario</b>	
<b>Tipo</b>	Circular
<b>Ingreso de Agua</b>	Central
<b>Diámetro Superior</b>	Ø7.3m
<b>Diámetro Inferior</b>	Ø0.40m
<b>Alto</b>	3.5m
<b>Nivel de Agua</b>	3.3m
<b>Carga Máxima (h pico)</b>	9.77 kg/m <sup>3</sup> h
<b>Todas las tuberías son de PVC de alta presión</b>	
<b>Equipo</b>	
<b>Blower (B)</b>	2.5 HP
	125 CFM

	Cantidad: 2
<b>Accesorios</b>	
<b>Válvulas de Apertura Rápida</b>	Ø3"
	Cantidad: 1
<b>Válvulas de Paso</b>	Ø2"
	Cantidad: 3
<b>Conectores de 3/4" a 2"</b>	Cantidad: 3
<b>Skimer</b>	Cantidad: 3
<b>Codos a 90</b>	Ø2"
	Cantidad: 9
<b>Codos a 90</b>	Ø3/4"
	Cantidad: 6

*Nota:* La tabla indica los componentes del Sedimentador Secundario y sus especificaciones técnicas, de donde se extraen valores para la creación del modelo. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019. Fuente: (Torres, 2003).

### 5.3. Fraccionamiento de la DQO

De acuerdo con lo descrito en la metodología, la DQO total y soluble fue medida en un laboratorio certificado, especificando que la filtración debe realizarse membrana de 0.45 µm de diámetro de poro. Los datos obtenidos se pueden observar en la Tabla 27.

**Tabla 27**

DQO total y soluble de Influyente y Efluente

	<b>Influente</b>	<b>Efluente</b>
<b>DQO Total (mg/L)</b>	7250	1100
<b>DQO Soluble (mg/L)</b>	1327	57
<b>DQO Particulada (mg/L)</b>	5923	1043

*Nota:* La tabla indica los valores de la DQO a través de los cuales se calcularon las fracciones aplicando el protocolo de la STOWA. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Se realizó el cálculo de la DBObio mediante la DBO y DBOu, para determinar de la fracción particulada lentamente biodegradable (Xs), los resultados se observan en la Tabla 28.

**Tabla 28**

*Cálculo de DBOu y DBObio*

<b>Día</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Promedio</b>
<b>DBO5 (mg/L)</b>	1676	955	1501	1138	1317,50
<b>DBOu (mg/L)</b>	2294,76	1396,28	2125,89	1657,12	1868,51
<b>Temperatura</b>	22,4	20,03	21,15	20,17	20,94
<b>Θ</b>	1,056	1,056	1,056	1,056	1,06
<b>K (dia<sup>-1</sup>)</b>	0,262	0,230	0,245	0,232	0,242
<b>DQObio (mg/L)</b>	2699,72	1642,69	2501,05	1949,55	2198,25

*Nota:* La tabla indica los valores de DBOu y DBObio los cuales se necesitan para el fraccionamiento de la DQO. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Siguiendo con el protocolo de la STOWA se calcularon las fracciones de la DQO. Los resultados se observan en la Tabla 29.

**Tabla 29**

*Resultados Fraccionamiento de la DQO*

<b>Fraccionamiento de la DQO</b>		
<b>Fracción soluble no biodegradable (Si)</b>		51.3 mg/L
<b>Fracción soluble fácilmente biodegradable (Ss)</b>		1275.7 mg/L
<b>Fracción particulada lentamente biodegradable (Xs)</b>		922.55 mg/L
<b>Fracción particulada no biodegradable (Xi)</b>		5000.45 mg/L

*Nota:* La tabla indica los resultados del fraccionamiento de la DQO, después de hacerse aplicado el protocolo de la STOWA. Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

## 5.4. Software GPS-X

### 5.4.1. Resultados de Simulación del Proceso Actual

Una vez caracterizado el influente, parametrizado el biorreactor e ingresado las condiciones iniciales, se realizó la simulación, con lo cual se determinó el coeficiente de determinación o de correlación múltiple ( $R^2$ ). El resultado de  $R^2$  obtenido a partir de SST medidos y simulados fue de 0.346 (Tabla 30).

**Tabla 30**

*Resultados de parametrización SST medidos y SST simulados*

PARÁMETRO	SST MEDIDA	SST SIMULADA	$R^2$
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	5710	10310	0.34642017
<b>DIA 2</b>	5500	18750	
<b>DIA 3</b>	7170	22580	
<b>DIA 4</b>	6500	30050	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

El resultado de  $R^2$  obtenido a partir de SSV medidos y simulados se observa en la Tabla 31, obteniendo un valor de 0.306.

**Tabla 31***Resultados de SST medidos y SSV simulados*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>SSV MEDIDA</b>	<b>SSV SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	3110	7713	0.30558835
<b>DIA 2</b>	2090	10930	
<b>DIA 3</b>	2030	12180	
<b>DIA 4</b>	5250	15170	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

El resultado obtenido de R<sup>2</sup> de DBO medida y simulada fue un valor de 0.007 como se observa en la Tabla32.

**Tabla 32***Resultados de DBO medida y DBO simulada*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DBO MEDIDA</b>	<b>DBO SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	1657	1657	0.0070526
<b>DIA 2</b>	550	2266	
<b>DIA 3</b>	1696	2285	
<b>DIA 4</b>	3508	2141	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

El resultado obtenido de DQO medida y simulada es un valor R<sup>2</sup> de 0.171 como se observan en la Tabla 33.

**Tabla 33***Resultados DQO medida y DQO simulada*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DQO MEDIDA</b>	<b>DQO SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	6673	6673	0.17146245
<b>DIA 2</b>	3829	9333	
<b>DIA 3</b>	4610	10040	
<b>DIA 4</b>	11265	11460	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados obtenidos de R<sup>2</sup> de las simulaciones con el modelo parametrizado expresaron valores poco favorables, indicando que requiere de calibración.

**5.4.2. Resultados de Calibración**

Los resultados obtenidos de R<sup>2</sup> mediante calibración de SST medidos y simulados fue de 0.315 como se observa en la Tabla 34.

**Tabla 34***Resultados SST medidos y SST simulados - Calibrados*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>SST MEDIDA</b>	<b>SST SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	5710	3604	0.31489035
<b>DIA 2</b>	5500	3450	
<b>DIA 3</b>	7170	2765	
<b>DIA 4</b>	6500	3876	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.



Los resultados de  $R^2$  obtenidos mediante la calibración de SSV medidos y simulados fue de 0.568 como se observa en la Tabla 35.

**Tabla 35**

*Resultados SSV medidos y SSV simulados - Calibrados*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>SSV MEDIDA</b>	<b>SSV SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	3110	1004	0.568159
<b>DIA 2</b>	2090	1270	
<b>DIA 3</b>	2030	1131	
<b>DIA 4</b>	5250	1627	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados de  $R^2$  obtenidos mediante la calibración de DQO medidos y simulados fue de 0.183 como se observa en la Tabla 36.

**Tabla 36**

*Resultados DBO medida y DBO simulada - Calibrados*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DBO MEDIDA</b>	<b>DBO SIMULADA</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	1657	1657	0.18254034
<b>DIA 2</b>	550	4423	
<b>DIA 3</b>	1696	4168	
<b>DIA 4</b>	3508	5665	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados de  $R^2$  obtenidos mediante la calibración de DQO medidos y simulados fue de 0.183 como se observa en la Tabla 37.

**Tabla 37**

*Resultados DQO medida y DQO simulada - Calibrados*

<b>PARÁMETRO</b>	<b>DQO MEDIDA</b>	<b>DQO SIMULADA</b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>DIA</b>			
<b>DIA 1</b>	6673	6673	0.92138874
<b>DIA 2</b>	3829	6344	
<b>DIA 3</b>	4610	5992	
<b>DIA 4</b>	11265	7789	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados que expresan un valor favorable fueron de DQO y SSV, por lo cual se espera que la validación sea óptima en estas dos variables.

#### **5.4.3. Resultados de Validación**

Los resultados obtenidos mediante la validación de SST medidos y simulados, indicaron un valor de  $R^2$  de 0.017 como se observa en la Tabla 38.

**Tabla 38***Resultados SST medidos y SST simulados- Validación*

<i>PARÁMETRO</i>	<i>SST MEDIDA</i>	<i>SST SIMULADA</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>DIA</i>			
<i>DIA 1</i>	930	283.3	0.01747962
<i>DIA 2</i>	600	271.2	
<i>DIA 3</i>	840	217.3	
<i>DIA 4</i>	760	304.7	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados obtenidos mediante la validación de SSV medidos y simulados, indicaron un valor de  $R^2$  de 0.715 como se observa en la Tabla 39.

**Tabla 39***Resultados SSV medido y SSV simulado - Validación*

<i>PARÁMETRO</i>	<i>SSV MEDIDA</i>	<i>SSV SIMULADA</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>DIA</i>			
<i>DIA 1</i>	190	134.7	0.71531459
<i>DIA 2</i>	80	99.82	
<i>DIA 3</i>	20	88.9	
<i>DIA 4</i>	70	122.6	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados obtenidos mediante la validación de DBO medidos y simulados, indicaron un valor de  $R^2$  de 0.939 como se observa en la Tabla 40.

**Tabla 40***Resultados DBO medida y DBO simulada - Validación*

<i>PARÁMETRO</i>	<i>DBO MEDIDA</i>	<i>DBO SIMULADA</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>DIA</i>			
<i>DIA 1</i>	292	1155	0.3952076
<i>DIA 2</i>	28	347.6	
<i>DIA 3</i>	32	539	
<i>DIA 4</i>	69	445.3	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los resultados obtenidos mediante la validación de DQO medidos y simulados, indicaron un valor de  $R^2$  de 0.862 como se observa en la Tabla 41.

**Tabla 41***Resultados DQO medida y DQO simulada - Validación*

<i>PARÁMETRO</i>	<i>DQO MEDIDA</i>	<i>DQO SIMULADA</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>DIA</i>			
<i>DIA 1</i>	1148	2053	0.8619
<i>DIA 2</i>	135	498.6	
<i>DIA 3</i>	106	786.4	
<i>DIA 4</i>	436	612.2	

Elaborado por: Artos B., Constante J., 2019.

Los valores  $R^2$  fueron de 0.8619 para la DQO medida vs DQO simulada,  $R^2$  de 0.7153 para los SSV medido vs SSV simulada,  $R^2$  de 0.3952 para la DBO medida vs DBO simulada y  $R^2$  de 0.0175 para SST medido y SST simulado, lo cual nos arroja un valor promedio de  $R^2$  igual a 0.4975.

## 5.5 Discusión

En el estudio realizado por Espinoza (2010) denominado “Modelación y simulación del proceso de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales Dulces Nombres de Monterrey”, realizado en la Universidad Autónoma del Estado de México, utilizaron el programa programa GPS-X debido a que es un programa completo que indica todos los procesos de una PTAR de una manera comprensible y detallada. Durante la presente investigación, se utilizó el programa GPS-X el cual resultó ser una herramienta de fácil acceso que detalla los procesos que son necesarios para comprender el comportamiento de una PTAR.

A partir de los resultados obtenidos, se estableció que las variables más significativas del modelo son la DQO (demanda química de oxígeno), SSV (sólidos suspendidos volátiles), DBO (demanda biológica de oxígeno) y SST (sólidos suspendidos totales), previo a un análisis de determinación con  $R^2$ , el cual permite identificar el grado de bondad de ajuste de un modelo para su validación.

Si bien es cierto existen variables explicativas que describen el comportamiento del modelo en estudio tales como DBO y SST, hay otras variables que se ajustan más a la investigación realizada entre ellas están la DQO y SSV. Un ejemplo claro de esto, es el estudio Delnavaz et. al (2016) denominado “Application of Mathematical Models and Fuzzy Regression Analysis to Determine the Microbial Growth Kinetic Coefficients and

Predicting Quality of Treated Wastewater”, en la universidad de Kharazmi de Irán, el cual describe el análisis de los valores de coeficientes cinéticos en el modelo ASM1 y la determinación y predicción en la calidad de salida del efluente de la planta implementando modelos matemáticos y regresiones fuzzy, donde se reporta un  $R^2$  para la DQO de 0.538 y un  $R^2$  para los SSV de 0.958, donde se llega a la conclusión que los valores de DQO y SSV con un  $R^2$  de 0.8619 y 0.7153 respectivamente, pueden predecirse con un valor de error aceptable.

Como se detalla en el estudio realizado por Wang et. al (2017) en su trabajo denominado “Statistical monitoring and dynamic simulation of a wastewater treatment plant: A combined approach to achieve model predictive control”, publicado en la Universidad de Noruega, describe un análisis de componentes principales para la predicción de la DQO y P por medio de variables significativas, donde se reporta un  $R^2$  para la DQO de 0.798 y un  $R^2$  para SSV de 0.711, estableciendo que el modelo puede ser empleado para un enfoque viable y un aprovechamiento económico para superar las restricciones de monitoreo y modelamiento que limita el control predictivo de modelos en las aguas residuales en una planta de tratamiento, de esta manera los resultados obtenidos para DQO y SSV durante el estudio realizado fue  $R^2$  de 0.8619 y de 0.9395 respectivamente, los cuales detallan que el modelo puede ser aplicable para la PTAR de la empresa RASTRO.

Durante el presente estudio las posibles aplicaciones es la implementación de nuevas tecnologías innovadoras como son los softwares especializados en la simulación de tratamientos de aguas residuales con el fin de impulsar la investigación en el diseño y la optimización de una PTAR, puesto que el modelamiento y simulación nos permite conocer

los límites máximos y mínimos de carga de los contaminantes y garantizar el cumplimiento de la normativa de calidad ambiental vigente.

Otra posible aplicación para esta investigación es la realización de un análisis económico enfocado en el costo-beneficios en base a las diferentes formas y tecnologías existentes para la descontaminación de aguas residuales, siendo una alternativa viable el reemplazo de las plantas piloto.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

Se realizó un reconocimiento de la PTAR de la empresa RASTRO, posterior, se llevó a cabo 2 campañas de muestreo para la caracterización, parametrización y determinación de condiciones iniciales del modelo ASM1, las cuales sirvieron para su calibración y validación tomando en cuenta librerías; carbono, nitrógeno (*cnlib*) y modelos de influente (*tsscod*), de biorreactor (*ASM1*) y de clarificador (*empiric*) que se encuentran en el software GPS-X.

Se concluyó utilizar el software GPS-X, el cual es un programa especializado para realizar procesos de modelación y simulación de una PTAR para generar esquemas de una planta piloto con transformación de unidades y análisis numérico, siendo una herramienta útil, puesto a que contiene un programa alterno denominado *Influent Advisor*, que permite realizar el fraccionamiento y estimación de variables.

Se emplearon parámetros propios del modelo ASM1, específicamente el rendimiento heterotrófico (*yH*) y la tasa de descomposición de la biomasa (*bH*), los cuales pudieron determinar el comportamiento biológico de la PTAR.

Se optimizaron las fracciones del influente y del biorreactor para la calibración del modelo, utilizando el programa GPS-X para la obtención de resultados más cercanos a la realidad, constatando que la calibración empleada fue óptima utilizando datos medidos de las variables del biorreactor.

La validación se llevó a cabo comparando los datos medidos en el clarificador, SST, SSV, DBO y DQO, con los datos simulados en el programa GPS-X después de la calibración, con lo que se determinó que la calibración fue exitosa.



La variable más confiable para su validación fue la DQO que expresó un  $R^2$  de 0.9214 en calibración y de 0,8619 en validación, siendo el valor más aceptable de los parámetros medidos.

## **6.2 Recomendaciones**

Se recomienda familiarizarse con el software que se va a utilizar antes de definir una campaña de muestreo, ya que se podrán identificar de mejor manera las variables requeridas en la interfaz para la creación del modelo.

Establecer una campaña de muestreo más extensa, para obtener una mayor cantidad de datos, ya que pueden existir valores atípicos que serán identificados con facilidad en una muestra más grande. Consecuentemente se podrá determinar de mejor manera el comportamiento de la PTAR y se creará un modelo más confiable.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Trillo Montsoriu, J., Trillo Fox, I., Tchobanoglous, G., Burton, F., y Cajigas, A. (1995). *Ingeniería de aguas residuales*. McGraw-Hill.
- Damayantia, A., y Ujanga, Z. (2010). *Respirometric analysis of activated sludge models from palm oil mill effluent* [Archivo PDF]. <https://core.ac.uk/download/pdf/159180061.pdf>
- Diaz, C. (2003). *Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos activados* [Archivo PDF]. [http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo\\_22.pdf](http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/ripda/pdfs/Capitulo_22.pdf)
- Espinosa Rodríguez, M. (2010) *Modelación y simulación del proceso de lodos activados de la planta de tratamiento de aguas residuales “Dulces Nombres de Monterrey*. [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma San Luis de Potosí]. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/80335>
- Garzón, P. (01 de octubre de 2015). *Estudio de la Generación de Gas Metano a Partir del Agua Residual. Avances en Ciencias e Ingenierías*. <http://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/274/275>
- Gonzales, A. (2017). *Modelado y simulación de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) empleando el software GPS-X* [Archivo PDF]. <http://ciep.ing.uaslp.mx/tesis/tesisPDF/233201813958.pdf>
- Henze, M., Gujer, W., & Mino, T. (2000). *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3* [Archivo PDF]. [https://www.researchgate.net/publication/289927816\\_Activated\\_Sludge\\_Models\\_ASM1\\_ASM2\\_ASM2D\\_ASM3/link/0deec53823ec3d82c3000000/download](https://www.researchgate.net/publication/289927816_Activated_Sludge_Models_ASM1_ASM2_ASM2D_ASM3/link/0deec53823ec3d82c3000000/download)

- Hydromantis. (2017). *Water and Wastewater Treatment. Videos - Recorded Webinars* [Entrada en un blog]. Recuperado 6 octubre de 2019 de <https://www.hydromantis.com/GPSX-video.html#Tutorial>
- Hydromantis. (2017). *GPS-X Guía Tutorial. Guía paso a paso para aprender y familiarizarse con GPS-X*. Hydromantis Ambiental Software Solutions, Inc.
- INDITEX. (2014). *Procesos de regulación - homogenización. Ficha Técnica de Etapas de Procesos de Plantas de Tratamientos de Aguas Residuales* [Archivo PDF]. <https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Procesos+de+regulaci%C3%B3n-homogenizaci%C3%B3n.pdf/47d7e07a-42fb-769b-b131-912050e0412c>
- Instituto de Toxicología de la Defensa. (2016). *Protocolo de toma de muestras de agua residual* [Archivo PDF]. [https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/PROTOCOLO\\_DE\\_TOMA\\_DE\\_MUESTRAS\\_DE\\_AGUA\\_RESIDUAL\\_ver\\_2.pdf](https://www.defensa.gob.es/itoxdef/Galerias/documentacion/protocolos/ficheros/PROTOCOLO_DE_TOMA_DE_MUESTRAS_DE_AGUA_RESIDUAL_ver_2.pdf)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana Agua. Calidad de Agua. Muestreo. Técnicas de Muestreo. NTE INEN 2176* [Archivo PDF]. <http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-INEN-2176-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-T%C3%89CNICAS-DE-MUESTREO.pdf>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2013). *Norma Técnica Ecuatoriana Agua. Calidad de Agua. Muestreo. Manejo y Conservación de Muestras. NTE INEN 2169* [Archivo PDF]. [111](http://www.trabajo.gob.ec/wp-content/uploads/2012/10/NTE-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

INEN-2169-AGUA.-CALIDAD-DEL-AGUA.-MUESTREO.-MANEJO-Y-  
CONSERVACION-DE-MUESTRAS.pdf

Jacome, A., y Suarez, J. (2013). *Modelación dinámica de fangos activos: ASM1 – IWA* [Archivo PDF].

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjcmNeSoLHnAhWkrFkKHx1CYgQFjAAegQIARAB&url=ftp%3A%2F%2Fceres.udc.es%2Fmaster\\_en\\_ingenieria\\_del\\_agua%2Fmaster%2520antiguo\\_antes%2520del%25202012%2FSegundo\\_Curso%2FProgramas\\_Comeciales\\_en\\_Ingenieria\\_Hidraulica\\_y\\_Sanitaria%2Fajacome-aquasim%2FTema\\_ASM1.pdf&usg=AOvVaw2Cl\\_EuP4vnKcNHBbEUdTX0](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjcmNeSoLHnAhWkrFkKHx1CYgQFjAAegQIARAB&url=ftp%3A%2F%2Fceres.udc.es%2Fmaster_en_ingenieria_del_agua%2Fmaster%2520antiguo_antes%2520del%25202012%2FSegundo_Curso%2FProgramas_Comeciales_en_Ingenieria_Hidraulica_y_Sanitaria%2Fajacome-aquasim%2FTema_ASM1.pdf&usg=AOvVaw2Cl_EuP4vnKcNHBbEUdTX0)

Loaiza, J. (2007). *Modelación del proceso de lodos activados en la planta de tratamiento de aguas residuales noreste, del área metropolitana de Monterrey, NL* [Archivo PDF]. <http://hdl.handle.net/20.500.11799/94531>

Lopez, C., Mendez, G., y Garcia, H. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, Modelacion y Diseño (1st ed.)*. Cambridge.

Metcalf, & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización* (3rd ed.). George Tchobanoglous.

Mendoza, M. (2017). *Informe de Gestión Anual*. EMRASQ-EP.

Ministerio del Ambiente. (2017). *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua. Libro VI Anexo 1 del Texto Unificado de Legislación Secundaria* [Archivo PDF]. <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

Navía, L., y Fall, C. (2010). *Modelación del proceso de lodos activados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Noreste, Apodaca, N.L. Redalyc*.

- Noyola, A. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales* [Archivo PDF].  
<https://www.aguasresiduales.info/revista/libros/seleccion-de-tecnologias-para-el-tratamiento-de-aguas-residuales-municipales>
- Ramalho, R. (2003). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Editorial Reverté, S.A.
- Rodriguez, A. (2015). *Optimización de la producción de lodos en un sistema de lodos activados a través de la calibración del modelo ASMI* [Archivo PDF].  
<http://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v16n1/v16n1a9.pdf>
- Romero, J. (1999). *Tratamiento de Aguas Residuales - Teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Sanchez, J., Mejía, A., y Amorocho, C. (2015). Software de ingeniería especializado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual: revisión. *Revista Ingeniería y Región*, pp. 57-71.
- Sollfrank, U., & Gujer, W. (1991). *Characterisation of domestic wastewater for mathematical modelling of the activated sludge process* (23rd ed.). IWA PUBLISHING.
- Sozen, S., Ubay Cokgor, E., & Henze, M. (1998). *Respirometric analysis of activated sludge behaviour-II. Heterotrophic growth under aerobic and anoxic conditions* *Water* [Archivo PDF].  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135497002108>
- Torres, A. (2003). *Manual de Procesos, Operación y Mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del camal metropolitano de Quito*. EMRASQ-EP.

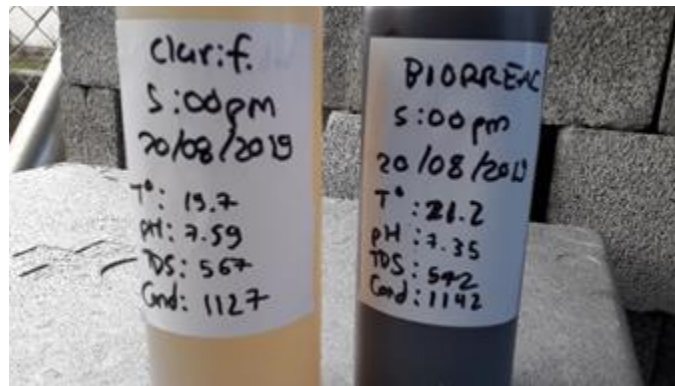
- UNESCO. (2017). *Informe Mundial de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado* [Archivo PDF]. [http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4\\_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/\\$FILE/1\\_\\_15.247647s.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/9A13A8A4E16D102F05258175006A9AD1/$FILE/1__15.247647s.pdf)
- Vargas, A. B. (2014). *Ingeniero Ambiental. Aspectos fisicoquímicos de la calidad del agua* [Archivo PDF]. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/diez.pdf>
- Vázquez, G. (2007). *Aplicación del Protocolo de la STOWA para la determinación de las fracciones de DQO del modelo ASMI en Aguas Residuales Municipales de la Ciudad de Toluca* [Tesis de Maestría, Universidad Autónoma del Estado de México]. [http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/94528/0\\_Tesis\\_ASM\\_G\\_Vasquez\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/94528/0_Tesis_ASM_G_Vasquez_.pdf?sequence=1&isAllowed=y)



Anexo 2. Ingreso de aguas de faenamiento a la PTAR



Anexo 3. Muestras simples para almacenar



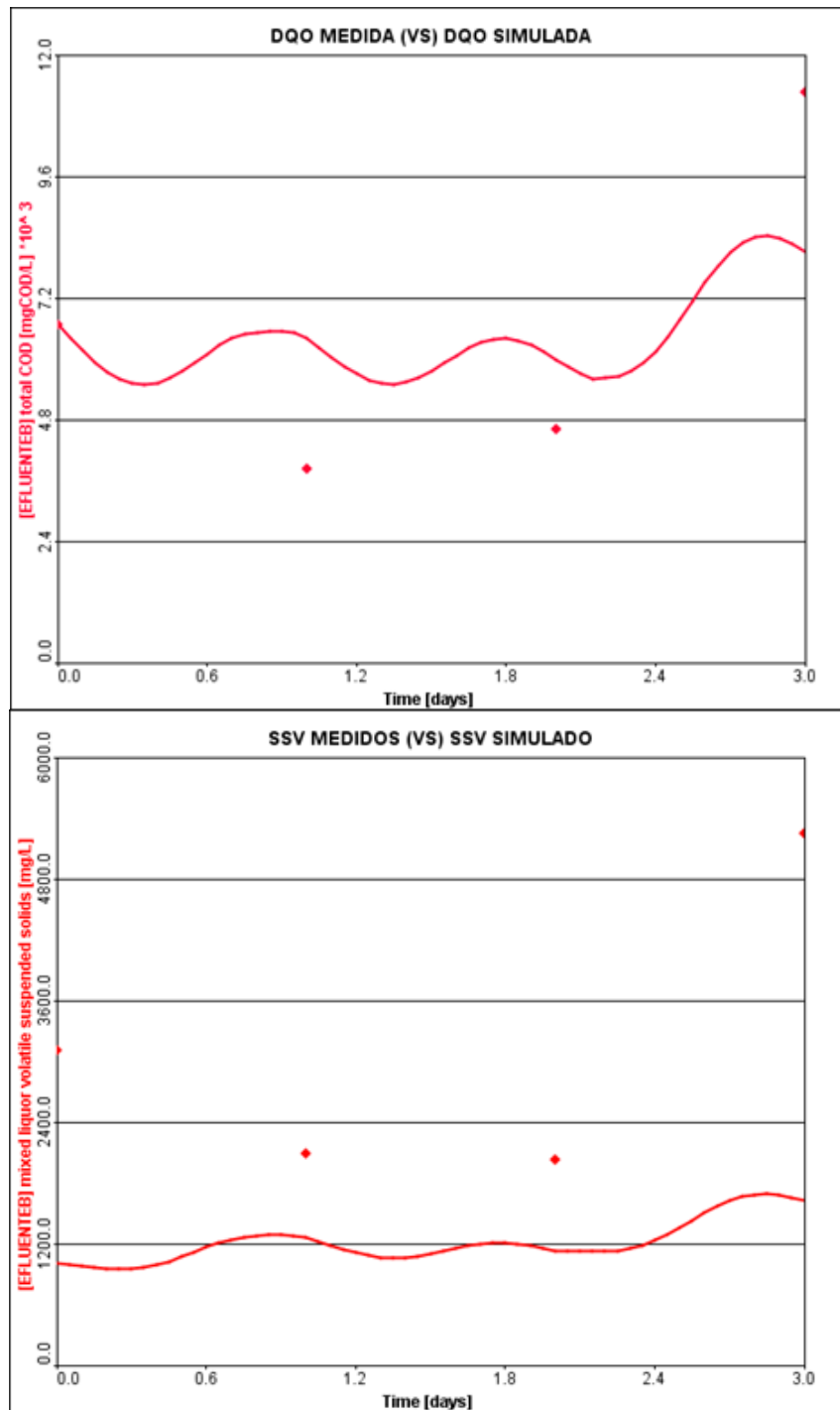
Anexo 4. Materiales y equipos para medición de parámetros *in-situ*







Anexo 5. Comportamiento de la curva a partir de la simulación realizada - calibrada



Anexo 6. Comportamiento de la curva a partir de la simulación realizada - validación

