UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA VIDA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TEMA

DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE LATACUNGA MEDIANTE EL SOFTWARE LYNX AMS1

AUTORA

KASANDRA LISETH VILLARROEL QUIJANO

DIRECTOR DEL PROYECTO/TRABAJO

ING. PEDRO PEÑAFIEL. M.SC

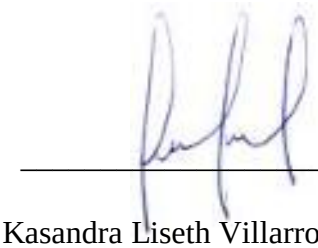
PASTAZA – ECUADOR

2020

DECLARATORIA DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Quién suscribe Kasandra Liseth Villarroel Quijano con C.I. 050371509-6, hace constar que es autora del Proyecto de Investigación titulado: **DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE LATACUNGA MEDIANTE EL SOFTWARE LYNX AMS1**, el cual constituye una elaboración personal realizada únicamente con la dirección del Tutor de dicho trabajo, Ing. Pedro Andrés Peñafiel Arcos. M.Sc. En tal sentido, manifiesto la originalidad de la conceptualización del trabajo como interpretación de datos y elaboración de conclusiones dejando establecido que aquellos aportes intelectuales de otros autores se han referenciado debidamente en el texto de dicho trabajo.

En el cantón Pastaza, a los 22 días del mes de septiembre del 2020.



Kasandra Liseth Villarroel Quijano

CI: 050371509-6

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: **Diseño de una estación depuradora de aguas residuales en la ciudad de Latacunga mediante el software LYNX AMS1.**



Msc. Billy Coronel E.

Presidente del Tribunal

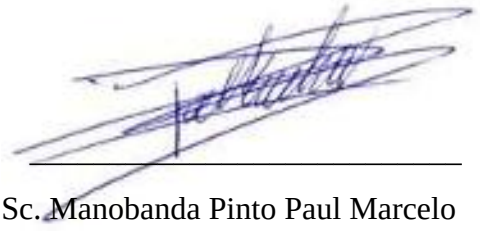
CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR EL TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El tribunal de sustentación del proyecto de investigación y desarrollo aprueba el proyecto de Investigación titulado: **Diseño de una estación depuradora de aguas residuales en la ciudad de Latacunga mediante el software LYNX AMS1.**



M.Sc. Cuichan Paucar Santiago

Miembro del Tribunal



M.Sc. Manobanda Pinto Paul Marcelo

Miembro del Tribunal

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA

SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND

Oficio No. 285-SAU-UEA-2020

Puyo, 22 de septiembre de 2020

Por medio del presente **CERTIFICO** que:

El proyecto de investigación correspondiente a la egresada VILLARROEL QUIJANO KASANDRA LISETH con C.I. 0503715096, con el Tema: **"DISEÑO DE UNA ESTACIÓN DEPURADORA DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD DE LATACUNGA MEDIANTE EL SOFTWARE LYNX AMS1.",** de la carrera, Ingeniería Ambiental. Director del proyecto Ing. Peñafiel Arcos Pedro Andrés, M.Sc., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 1%, Informe generado con fecha 22 de septiembre de 2020 por parte del director conforme archivo adjunto.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes

Atentamente,



Ing. Italo Marcelo Lara Pilco M.Sc.

ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND – UEA - .

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento se dirige principalmente a quién ha forjado mi camino y me ha dirigido por el sendero correcto, a DIOS, el que en todo momento ha estado, está y estará siempre conmigo ayudándome a aprender de mis errores y a no cometerlos otra vez. Eres quien guía el destino de mi vida.

Han pasado muchos años desde que nací. Desde ese momento e incluso antes que eso, ya estabas buscando maneras de ofrecerme lo mejor. Has trabajado duro, y sin importar si llegaras cansada del trabajo, siempre tenías una sonrisa que brindarme. Las ayudas que me has brindado han formado bases de gran importancia, ahora soy consciente de eso.

Tus esfuerzos son impresionantes y tu amor es invaluable. Junto con mi madre me has educado, me has proporcionado todo y cada cosa que he necesitado, tus enseñanzas las aplico cada día, de verdad que tengo mucho por agradecerte, sin duda esto es la mejor herencia que pude recibir.

Mi princesa hermosa eres una de las personas más importantes de mi vida, mi pequeño amorcito, gracias por ser mi motorcito para seguir adelante, solo quiero ser una buena hermana y ejemplo para ti. Te doy las gracias por siempre darme la fuerza para seguir adelante, por tu amor y ese cariño tan sincero, mi Melita formas parte importante en todo este trayecto.

Gracias a la Universidad Estatal Amazónica que fue el lugar donde me he formado como profesional, también gracias a cada uno de mis maestros quienes compartieron conmigo sus conocimientos, en especial a mi querida maestra Margarita Jara, quien se convirtió en una amiga muy especial. A mi tutor el ingeniero Pedro Peñafiel quien me acompañó y guio mi trabajo, gracias por su tiempo y paciencia.

DEDICATORIA

Mi tesis está dedicada con todo mi amor y cariño.

A ti mi amado DIOS, que me diste la oportunidad de vivir, de regalarme una familia maravillosa y por estar a mi lado en cada uno de mis pasos, gracias padre amado por cada una de tus bendiciones que derramas sobre mí, de aquí en adelante tenemos nuevos caminos por recorrer juntos y te pido que siempre sigas a mi lado.

Con cariño a mis amados padres quienes me dieron la vida y han estado a mi lado en todo momento. A mi padre Camilo, gracias por apoyarme incondicionalmente, por tu amor, consejos y sobre todo el esfuerzo que has hecho para darme la oportunidad de estudiar. A mi mejor amiga, mi amada madre Flerida, gracias por estar conmigo en los momentos buenos, pero sobre todo en los malos, sin duda este gran logro está dedicado a ti por ser mi ejemplo a seguir, es gracioso recordar 5 años atrás como iniciamos esta etapa juntas y cada semestre superado era una gran felicidad y ahora por fin lo conseguimos, te amo con toda mi alma y pues ahora nos toca recorrer otro camino juntas.

A mis abuelitos quienes estuvieron para darme un consejo, una alegría y pues Dios me ha dado la oportunidad de tenerlos aun aquí conmigo, sin embargo, mi querido abuelito Julio tuviste que partir, pero gracias por apoyarme aquel día que necesitaba viajar a Puyo y solo tú y yo sabemos lo que hiciste por mí, para mí eso fue el acto de amor más tierno.

Sinceramente DIOS me has dado personas increíbles, a mi querido Jorge gracias por llegar a mi vida en el momento que más lo necesitaba sin duda usted fue mi regalito de Dios, la persona que compartió conmigo la mayor parte de mi carrera, quien estaba ahí cuando sentía que el mundo se venía de cabeza usted era quien con un abrazo hacía mi mundo mejor, usted fue la persona que hizo que los días lejos de casa no sean tan malos, gracias por apoyarme a seguir adelante.

RESUMEN

El crecimiento acelerado de los núcleos urbanos, la sensibilización y concienciación de la sociedad hacia la calidad ambiental, han puesto de manifiesto la necesidad de desarrollar e implementar tecnologías enfocadas a prevenir, mitigar, corregir y compensar los graves problemas de contaminación hídrica. El estudio tiene como objetivo general diseñar una Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas para la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi-Ecuador, mediante el Software LYNX ASM1. La revisión bibliográfica proporcionó datos para estimar: población actual, caracterización de aguas, determinación del caudal de dotación, caudal de diseño, estos sirvieron como dato de partida para para el diseño de la EDAR y la simulación de tres alternativas en el software LYNX ASM1. El caudal de diseño es de 57591,3 m^3/día, con un aporte industrial de 9931,68 m^3/día, el pretratamiento se compone de un pozo de gruesos y un desarenador aireado. Los resultados de la simulación indican que las alternativas cumplen con los límites de vertido en un cuerpo de agua dulce. La alternativa 3 esquema A_2O con un volumen 8531 m^3 y una secuencia de zonas anaerobia con 20%, anóxica 30% y aerobia 50% es la mejor opción del análisis realizado.

Palabras clave: Contaminación hídrica, Tratamiento de aguas residuales, Zona anaerobia, anóxica, Esquemas.

ABSTRACT

The urban – core accelerated growth, sensitivity and environmental awareness of society towards the environmental quality, have shown the need of development and implementation of technologies focused on prevent, ease, correct and compensate the problems induced by the water pollution. The research general objective is to design a treatment plant for sewage water for Latacunga urban – core, in Cotopaxi – Ecuador, using LYNX ASM1 Software. Bibliographic resources have delivered information to estimate: the existing population, water characteristics, location flow and flow design. This data was used to design EDAR and the simulation of three alternatives for the software LYNX ASM1. The flow design counts with 57591,3 m3/day, with an industrial support of 9931,68 m^3/day, pretreatment process is based on a water well and an air desander. The outcome of simulation shows that the alternatives meet the spill limits of water. The outline for the alternative number 3 A_2O with 8531 m3 and sequence of 20% anaerobic, 30% anoxic, and 50% aerobic is the best test option.

Keywords: Water pollution, Sewage treatment, Anerobic zone, Anoxic, Schemes.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 14
1. INTRODUCCIÓN 14
1.1 Planteamiento del problema 15
1.2 . Objetivos 16
1.2.1. Objetivo General: 16
1.2.2. Objetivos Específicos: 16
1.2.3. Justificación 16
CAPÍTULO 2 18
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA 18
2.1. Cálculo de proyección de la población 18
2.1.1. Método Geométrico 18
2.1.2. Método Aritmético 19
2.2. Aguas residuales 20
2.2.1. $DBO5$(Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/L) 20
2.2.2. DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/L) 21
2.2.3. Sólidos totales (ST) 21
2.2.4. Sólidos en suspensión totales (SST) 21
2.2.5. Sólidos en suspensión volátiles (SSV) 21
2.2.6. pH (potencial de hidrógeno) 21
2.2.7. Nitrógeno (NT, ppm) 22
2.2.8. Nitrógeno Kjeldahl (NKT) 22
2.2.9. Fósforo (PT, ppm) 22
2.2.10. Temperatura 23
2.3. Cantidad De Un Agua Residual Urbana 23
2.4. Pretratamiento 23
2.4.1. Pozo De Gruesos 23
2.4.2 Desarenador 27
2.4.3. Rejas 31
2.5. Introducción Al Tratamiento Biológico De Aguas Residuales 31
2.5.1. Volumen del Reactor 32
2.5.2. Procesos De Eliminación Biológica De Materia Orgánica 33
2.5.3. Fangos Activados 33

2.6. Paquetes de Simulación 42
2.6.1. Eliminación De Materia Orgánica 42
2.6.2. Modelo Conceptual Del ASM1 42
2.6.3. Lynx ASM1 45
2.7. Normativa ambiental de descargas 45
CAPÍTULO 3 47
3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 47
3.1 Localización 47
3.2 Tipo O Diseño De La Investigación 47
3.3 Métodos de la Investigación 47
3.3.1. Metodología para el primer objetivo 48
3.3.2. Metodología para el segundo objetivo 48
3.3.3. Metodología para el tercer objetivo 49
CAPÍTULO 4 ..... **50**
4. RESULTADOS 50
4.1. Resultado Objetivo 1. Establecer mediante revisión bibliográfica el caudal y la carga contaminante de las aguas residuales generadas en la ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi Ecuador. 50
4.1.1. Proyección poblacional 50
4.1.2. Cálculo de caudal 53
4.1.3. Caracterización de agua residual 57
4.2 Resultado Objetivo 2. Proyectar 3 Alternativas de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales urbanas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador. 59
4.2.1. Pretratamiento 59
4.2.2. Valores cinéticos y estequiométricos 63
4.2.3. Alternativa 1 63
4.2.4. Alternativa 2 70
4.2.5. Alternativa 3 76
4.3. Resultado objetivo 3. Seleccionar la mejor alternativa de las configuraciones propuestas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador. 81
4.4. Conclusiones 83
4.5. Recomendaciones 83

4.6. Referencias 85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Matriz del modelo matemático ASM1 43
Tabla 2 Componentes del modelo matemático ASM1 43
Tabla 3 Ecuaciones cinéticas modelo matematico ASM1 44
Tabla 4 Límites de descarga a un cuerpo dulce 46
Tabla 5 Proyecciones de INEC 50
Tabla 6 Proyección de crecimiento mediante los métodos Aritmético y Geométrico en base a las proyecciones del INEC 52
Tabla 7 Caudal de tratamiento de las plantas 54
Tabla 8 Composición típica de aguas residuales 57
Tabla 9 Composición típica de aguas residuales municipales con aportes de efluentes industriales 58
Tabla 10 Muestreos de aguas residuales 58
Tabla 11 Valores de concentración usados en el software LYNX 59
Tabla 12 Parámetros de valores cinéticos y estequiométricos 63
Tabla 13 Condiciones iniciales de simulación Ludzack-Ettinger modificado 65
Tabla 14 Valores propuestos en la simulación 65
Tabla 15 Valores para la optimización 69
Tabla 16 Condiciones iniciales de simulación Bardenpho 72
Tabla 17 Valores de configuración propuestos 72
Tabla 18 Simulaciones a diferente volumen de reactor 75
Tabla 19 Condiciones iniciales de simulación A2O 77
Tabla 20 Valores propuestos para las simulaciones 78
Tabla 21 Valores propuestos para la optimización 81
Tabla 22 Resumen de volumen y % Aerobio de las alternativas 82
Tabla 23 Comparativo cumplimiento normativo ambiental 82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema simple de una EDAR dividida en las dos líneas de tratamiento. 34
Figura 2. Transformaciones del nitrógeno en los procesos del tratamiento biológico. 34
Figura 3. Configuración Bardenpho. 38
Figura 4. Configuración Anammox (posdesnitrificación). 38
Figura 5. Configuración Phoredox. 40
Figura 6. Configuración Ludzack-Ettinger Modificado. 41
Figura 7. Configuración A2O. 42
Figura 8. Comparación entre métodos. 53
Figura 9. Esquema de Ludzack-Ettinger modificado. 64
Figura 10. Nitrito y Nitrato en Zona Anoxica esquema de Ludzack-Ettinger modificado. . 66
Figura 11.Bacterias Heterótrofas en zona Anoxica esquema Ludzack-Ettinger modificado. 67
Figure 12.Nitrógeno amoniacal Zona Aerobia Ludzack-Ettinger modificado. 68
Figura 13.Bacterias Autótrofas zona aerobia Ludzack-Ettinger modificado. 68
Figura 14.Resultado de optimización. 70
Figura 15.Esquema de proceso Bardenpho. 71
Figure 16.Presencia de nitratos en las zonas de tratamiento Bardenpho. 74
Figure 17.Presencia amonio en las zonas de tratamiento Bardenpho. 75
Figure 18. Esquema de proceso A2O. 77
Figure 19.Presencia de nitratos en las zonas de tratamiento A2O. 79
Figure 20. Presencia de Nitrógeno amoniacal en la Zona 3 - A2O. 80
Figure 21. Bacterias Autótrofas en la zona 3 aerobia A2O. 80

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

A inicio del siglo XIX, comenzó a ser notorio el problema de la contaminación ambiental a nivel global debido a falta de gestión de desechos como de aguas residuales siendo su eliminación de forma directa al medio natural, lo que conlleva a una grave alteración de los ecosistemas (Barcelo & Lopez de Alda, 2010). El rápido desarrollo social e industrial ha aumentado en cifras alarmantes el cambio climático y la deforestación que sufre el planeta a causa las descargas contaminantes a cuerpos hídricos por varias actividades (Bolong et al., 2009).

El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y el sostenimiento del ambiente, que, como resultado del uso inadecuado que se ha hecho de ella como medio de eliminación, ha sufrido un preocupante deterioro (Barcelo & Lopez de Alda, 2010); actividades antropogénicas como la agricultura, ganadería, floricultura, desechos industriales, entre otras, han ocasionado alteración de la calidad de la misma, dando lugar a distintas formas de contaminación una de ellas la eutrofización la cual se produce por el aporte excesivo de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo, provocando el crecimiento descontrolado de algas y otras plantas ocasionando efectos severos en los causes receptores, como la disminución del oxígeno presente en el agua lo que altera completamente el ecosistema.

La contaminación del recurso hídrico conlleva a una seria amenaza para la salud humana, la OMS menciona que, aproximadamente 2 millones de personas mueren cada año entre niños y adultos jóvenes, a causa de enfermedades diarreicas asociadas al consumo de agua o alimentos contaminados, ocasionando así gastroenteritis o hepatitis; estos virus están presentes en las aguas residuales urbanas (Bofill Mas et al., 2005).

1.1 Planteamiento del problema

El río Cutuchi es uno de los principales afluentes que atraviesa la ciudad de Latacunga, mismo que con el paso del tiempo y el crecimiento de la urbe sus aguas se volvieron turbias y con mal olor, por esta razón, los habitantes se han visto en la necesidad de solicitar al Consejo Municipal de Latacunga que solucionara la problemática del Cutuchi y de otros ríos de la urbe, puesto a que, emanan olores nauseabundos y dan un espectáculo deplorable de la ciudad. Según, estudios del Ministerio del Ambiente (MAE), los contaminantes son industrias, las aguas servidas de la ciudad, incluso los camales municipales. Las fábricas tienen un porcentaje del 20% en la contaminación, de acuerdo a los análisis anuales que hace el MAE, pero la fuente principal de la contaminación son las descargas desde los hogares de Latacunga en un 80%, es decir las aguas servidas que van directo al río, por esta razón se ha solicitado que las autoridades tomen las medidas correctivas para un adecuado tratamiento de las aguas residuales (Alvarez Lorena, 2013).

En relación a la problemática expuesta, se hace referencia como punto clave de este estudio a la capital de la provincia de Cotopaxi, misma que no dispone de ningún tratamiento para sus aguas residuales, las cuales son vertidas directamente en los ríos, diariamente más de 40.000 m3 son descargadas en el río Cutuchi, mientras que el río Pumacunchi recibe las descargas del Centro de Rehabilitación Social, provocando así serios problemas de contaminación del agua. En el caso del afluente Cutuchi, este se ve afectado por las descargas industriales de actividades como: industrias metalúrgicas, curtiembres, talleres de ensamblaje, aglomerados, envasadoras de bebidas, plantas de procesamiento de carnes y embutidos, y floricultoras (Osorio, 2019).

La falta de tratamiento de las aguas residuales urbanas de la Cuidad de Latacunga es un foco permanente de contaminación ambiental, por lo que en el presente trabajo se establece el diseño de una estación depuradora de aguas residuales urbanas para las aguas residuales urbanas generadas en la ciudad de Latacunga.

1.2 . Objetivos

1.2.1. Objetivo General:

- Diseñar una Estación Depuradora de Aguas Residuales Urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador, mediante el Software LYNX ASM1.

1.2.2. Objetivos Específicos:

- Establecer mediante revisión bibliográfica el caudal y la carga contaminante de las aguas residuales generadas en la ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi Ecuador.

- Proyectar 3 Alternativas de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales urbanas para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi Ecuador.

- Seleccionar la mejor alternativa de las configuraciones propuestas para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador.

1.2.3. Justificación

La UNESCO apoya el desarrollo sostenible como un medio para asegurar las necesidades de las generaciones del presente sin comprometer generaciones futuras, para esto ha propuesto 17 objetivos globales y trabaja enfáticamente en el logro de los mismos (UNESCO, 2019). El objetivo 6 hace referencia a "Agua limpia y saneamiento" sabiendo que a nivel mundial la mala calidad de agua, la escasez de recursos hídricos y el saneamiento inadecuado han provocado un efecto negativo en la seguridad alimentaria de muchos países, influyendo así, en las opciones de subsistencia y oportunidades de educación hacia las familias más pobres, por esta situación, el objetivo ya antes mencionado busca garantizar agua libre de impurezas y accesible para todos, considerando que el planeta dispone de suficiente agua dulce(PNUD, 2010).

El presente trabajo está dirigido en apoyar a este objetivo de saneamiento, a través del aporte de datos para el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales urbanas generadas en la ciudad de Latacunga. Para el diseño se usará el software LYNX ASM1, el mismo que permitirá explorar y analizar varias configuraciones de tratamiento para el dimensionamiento de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR), obteniendo resultados

importantes como son los distintos volúmenes, características de reactores, recirculaciones, decantación, espesamiento y deshidratación de fangos, además del comportamiento biológico que asegure el funcionamiento correcto de la EDAR, con el propósito de que las aguas eliminadas a los causes sean asimiladas por los mismos.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Cálculo de proyección de la población

Para determinar una población a futuro puede ser mediante fórmulas matemáticas, suponiendo que dicha población tiene un comportamiento histórico relativamente regular, lo cual suele suceder cuando no están muy afectadas por fluctuaciones debidas a la migración. Los métodos para la estimación de poblaciones a futuro son varios, sin embargo, ninguno de ellos es 100% exacto, pues esto se debe a varios factores como el nivel socio económico de la población, el clima, la migración entre otros. Las ecuaciones matemáticas más usadas para estas proyecciones se describen a continuación:

2.1.1. Método Geométrico

Un crecimiento de la población en forma geométrica supone que la población crece a una tasa constante, lo que significa que aumenta proporcionalmente lo mismo en cada periodo de tiempo, pero en número absoluto, las personas aumentan en forma creciente. Si la población está disminuyendo, lo hará también a una tasa constante, pero el número absoluto irá disminuyendo, por tales razones esta función fue ampliamente utilizada a lo largo de mucho tiempo y por varios autores (Granados, 1987).

Matemáticamente el crecimiento exponencial *R* se expresa en la siguiente ecuación:

$$R = \left(\frac{Pob_2}{Pob_1}\right)^{\left(\frac{1}{(T_2 - T_1)}\right)^{-1}} \qquad (Ec.\,1)$$

$R = Tasa\ de\ Crecimiento$

$Pob_2 = A\tilde{n}o\ final\ de\ censo$

$Pob_1 = A\tilde{n}o\ inicial\ de\ censo$

$T_2 = Población\ final\ de\ censo$

$T_1 = Población\ inicial\ de\ censo$

A continuación, se detalla la ecuación en el método geométrico para estimar la proyección de incremento anual Y_c

$$Y_c = P_o \times (1 + R)^T \qquad (Ec. 2)$$

$\gamma_c = Incremento\ anual\ de\ la\ población$

$P_0 = Población\ en\ el\ momento\ o$

$R = Tasa\ de\ Crecimiento$

$\mathcal{T} = Periodo\ Transcurrido\ (t - 0)$

2.1.2. Método Aritmético

El crecimiento aritmético supone que en cada período la población aumenta o disminuye en el mismo número de personas, esta técnica matemática puede dar buenos resultados si la proyección es a corto o mediano plazo ya que si bien es cierto este procedimiento asume que el crecimiento futuro será en términos absolutos el mismo que en el pasado, esto implícitamente quiere decir que la población estaría creciendo a una tasa decreciente.

Según algunos autores esta técnica no debe ser muy utilizada debido a que es muy difícil encontrar una población que presente estas características y sólo justifica que se utilice en el caso de disponer únicamente de dos puntos en el tiempo (Granados, 1987).

Matemáticamente el crecimiento lineal K_a se expresa en la siguiente ecuación:

$$k_a = \frac{Pob_2 - Pob_1}{T_2 - T_1} \qquad (Ec. 3)$$

Donde:

$K_a = Tasa\ de\ Crecimiento$

$Pob_2 = Año\ final\ de\ censo$

$Pob_1 = Año\ inicial\ de\ censo$

$T_2 = Población\ final\ de\ censo$

$T_1 = Población\ inicial\ de\ censo$

En el método aritmético el incremento poblacional anual Y_c se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_c = P_o + (k_a . \mathcal{T}) \qquad (Ec. 4)$$

$\gamma_c = Incremento\ anual\ de\ la\ población$

$P_0 = Población\ en\ el\ momento\ o$

$k_a = Tasa\ de\ Crecimiento$

$\mathcal{T} = Periodo\ Transcurrido\ (t - 0)$

2.2. Aguas residuales

La mayoría de las actividades humanas que utilizan agua generan aguas residuales. A medida que crece la demanda global de agua, el volumen de aguas residuales generadas y su nivel de contaminación se encuentran en constante aumento en todo el mundo (Bokova & Ryder, 2017). Las aguas residuales de origen urbano, están constituidas por aguas domesticas mismas que proceden de las heces y orina humanas, del aseo personal, de la cocina y la limpieza de la casa, las cuales suelen contener gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes, y grasas. Por otro lado, dentro del contexto urbano están las aguas industriales que proceden de los procesos realizados en fábricas y establecimientos industriales las cuales contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos y grasas, entre otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales (García & Pérez, 2015).

2.2.1. $DBO5$(Demanda Bioquímica de Oxígeno, mg/L)

La Demanda Bioquímica de Oxígeno, DBO, es la cantidad de oxígeno necesaria para descomponer la materia orgánica presente mediante acción de los microorganismos aerobios presentes en el agua, mientras que la DBO5, mide el oxígeno consumido por los microorganismos en cinco días (Instruments, 1905).

2.2.2. DQO (Demanda Química de Oxígeno, mg/L)

Corresponde al volumen de oxigeno requerido para oxidar la fracción orgánica de una muestra susceptible de oxidación al dicromato o permanganato, en medio acido (Ramalho, 1996). Determina la cantidad de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica en una muestra de agua, bajo condiciones específicas de agente oxidante, temperatura y tiempo (C. Rodriguez et al., 2007).

2.2.3. Sólidos totales (ST)

Se definen como la materia que permanece como residuo después de la evaporación y secado a 103 - 105 °C. El valor de los sólidos totales incluye materias disueltas (sólidos disueltos totales: porción que pasa a través del filtro) y no disuelto (sólidos suspendidos totales: porción de sólidos totales retenidos por un filtro) (C. Rodriguez et al., 2007).

2.2.4. Sólidos en suspensión totales (SST)

Se encuentran constituidos por sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos coloidales, cuyo tamaño de partícula no pase del filtro estándar de fibra de vidrio (1,5 µm) (Toasa, 2012)

2.2.5. Sólidos en suspensión volátiles (SSV)

Son aquellos sólidos suspendidos que se volatilizan en la calcinación a 550 °C ± 50 °C. Se corresponden con los sólidos que volatilizan (desaparecen por combustión) a esa temperatura (Norma Mexicana, 2015).

2.2.6. pH (potencial de hidrógeno)

Es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua y se define como la concentración de iones de hidrógeno en el agua. La escala del pH es logarítmica con valores de 0 a 14. Un incremento de una unidad en la escala logarítmica, equivale a una disminución diez veces mayor en la concentración de iones de hidrógeno, es decir, con una disminución del pH, el agua se hace más ácida y con un aumento de pH el agua se hace más básica (Contreras & Rojas, 2014).

2.2.7. Nitrógeno (NT, ppm)

El nitrógeno está formado por multitud de compuestos de carácter oxidado y reducido que pueden ser generados de manera directa en procesos naturales y antrópicos, o indirectamente en reacciones secundarias en la atmósfera (Cape et al., 2011). El nitrógeno es un componente estructural integral de proteínas y ácidos nucleicos que se encuentran en todas las células vivas, aunque es un componente esencial para la vida, los organismos solo pueden utilizar este elemento en sus formas reactivas; se transporta fácilmente entre el aire, el agua y el suelo y puede tener efectos nocivos en todos los niveles tróficos de un ecosistema (Holmes et al., 2019).

Debido a la gran complejidad de la fracción orgánica del N, no resulta fácil establecer los efectos que puede causar tanto en la salud humana como en el medio natural, si este no es eliminado previamente a su vertido (Izquieta Rojano & Elustondo, 2017).

2.2.8. Nitrógeno Kjeldahl (NKT)

El método Kjeldahl es un indicador que determina el Nitrógeno en estado tri negativo; es la suma del Nitrógeno Orgánico y el Nitrógeno Amoniacal presentes en una muestra de agua (Rodríguez et al., 2007). Es un parámetro importante en estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) ya que mide el nitrógeno capaz de ser nitrificado a nitritos y nitratos y, posteriormente y en su caso, desnitrificado a nitrógeno gaseoso. No incluye, por tanto, los nitratos ni los nitritos (Nitrógeno total Kjeldahl, 2020).

2.2.9. Fósforo (PT, ppm)

El Fósforo es un elemento esencial para la vida como un factor clave limitador de nutrientes, sin embargo, contribuye junto con el Nitrógeno a la eutrofización de lagos y otros cuerpos de agua (IDEAM, 2011). Actualmente se considera como uno de los nutrientes que controlan el crecimiento de algas, el fósforo se encuentra en aguas naturales y residuales casi exclusivamente como fosfatos, los cuales se clasifican en orto fosfatos, fosfatos condensados (piro-, meta-, y otros polis fosfatos) y fosfatos orgánicos (Suarez et al., 2007). Tiene su origen natural en la erosión de las rocas y la degradación de la materia orgánica (Wetzel, 2001).

2.2.10. Temperatura

La temperatura tiene un efecto significativo en la tasa de crecimiento de los microorganismos, aquellos microrganismos que operan en un intervalo de temperatura más alta tienen una mayor tasa máxima de crecimiento que los que operan en un intervalo inferior. Con la aplicación de la modelación matemática de los procesos biológicos, el rol de los coeficientes de temperatura adquiere mayor importancia. La depuración biológica se desarrolla de forma adecuada entre los límites de 12°C y 38°C (López et al., 2001).

2.3. Cantidad De Un Agua Residual Urbana

La cantidad de aguas residuales que se genera en una aglomeración urbana está en proporción directa con el consumo de agua de abastecimiento, y este consumo viene relacionado con el grado de desarrollo económico y social, puesto que un mayor desarrollo trae consigo un mayor y más diverso uso del agua en las actividades humanas (Ortega de Miguel et al., 2008).

2.4. Pretratamiento

El pretratamiento, no logra reducir la carga contaminante de los vertidos, es por ello que aunque no se lo considera un tratamiento, si desempeña un papel importante en el tratamiento de aguas residuales dentro de la EDAR, ya que su función es eliminar elementos de un tamaño considerado que pueden causar decadencias en la eficiencia del tratamiento, pues su objetivo principal es proteger los equipos, partes y unidades de la planta depuradora de daños que pueden resultar funestos para el funcionamiento de la planta y del sistema de evacuación y transporte de aguas residuales, en general (Lozano, 2012).

2.4.1. Pozo De Gruesos

Se diseña especialmente para aguas residuales urbanas en donde se espera el arrastre de una gran cantidad de arenas y sólidos de gran tamaño que viajan por el alcantarillado (Chamorro, 2014). El pozo de gruesos es un sistema formado por dos equipos en serie: una cuchara y un puente grúa (Lozano, 2012).

Definición de parámetros

A continuación, se comentan los parámetros utilizados en el cálculo, se han dividido en dos grupos:

Parámetros de partida

Caudal de diseño: Caudal adoptado como base para el cálculo de los diferentes procesos (m^3/h).

Caudal máximo: Caudal máximo que es capaz de tratar la planta (m^3/h).

Tiempo medio de residencia a caudal de diseño: Tiempo medio que permanecerá el agua residual en la balsa cuando el caudal tratado coincide con el caudal de diseño.

Rango usual: 1 a 4

Velocidad ascensional a caudal de diseño: Velocidad media a la que asciende el agua por una superficie igual a la de la balsa cuando el caudal tratado coincide con el caudal de diseño.

Rango usual: 0.5 a 3

Relación longitud/anchura del pozo: Resulta de dividir la longitud de la balsa entre la anchura de la balsa.

Rango usual: 1 a 3

Metros cúbicos de arena y residuos por cada 1000m^3 de agua residual a caudal de diseño: Metros cúbicos de arena y residuos que se recogerán en el pozo de gruesos por cada 1000m^3 de agua residual que atraviesa el pozo de gruesos cuando el caudal tratado coincide con el caudal de diseño.

Rango usual: 0.1 a 1

Metros cúbicos de arena y residuos por cada 1000m^3 de agua residual con tormenta: Metros cúbicos de arena y residuos que se recogerán en el pozo de gruesos por cada 1000m^3 de agua residual que atraviesa el pozo de gruesos cuando hay tormenta.

Parámetros en el resultado de cálculo

Volumen útil: Volumen útil del pozo de gruesos sin considerar resguardo (distancia desde la lámina de agua a la coronación del muro) ni tolva de almacenamiento de arena situada en el fondo del pozo.

Profundidad útil: No se considera la altura de resguardo un de la tolva de arena.

Tiempo medio de residencia a caudal máximo: Tiempo medio que permanecerá el agua residual en la balsa cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo.

Velocidad ascensional a caudal máximo: Velocidad media a la que asciende el agua por una superficie igual a la de la balsa cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo.

Producción normal de arena y residuos secos: Metros cúbicos de arena y residuos que se recogerán por hora cuando el caudal tratado coincida con el caudal de diseño.

Producción máxima de arena y residuos secos con tormenta: Metros cúbicos de arena y residuos que recogen por hora cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo y se produzca un aporte de agua en los colectores provenientes de escorrentía superficial del agua de lluvia. Esta circunstancia suele incrementar sustancialmente la cantidad de arena y residuos durante un periodo corto.

Fórmulas:

Volumen útil (m^3):

$$Tiempo\ medio\ de\ resistencia\ a\ caudal\ de\ diseño(min) \times \left(\frac{caudal\ de\ diseño(m^3)}{60}\right) \quad (Ec.5)$$

Superficie (m^2):

$$\frac{\left(\frac{Caudal\ de\ diseño(m^3)}{60}\right)}{Velocidad\ ascensional\ caudal\ de\ diseño\left(\frac{m^3}{m^2 \times min}\right)} \quad (Ec.6)$$

Profundidad útil (m):

$$\frac{Volumen\ util\ (m^3)}{Superficie\ (m^2)} \qquad (Ec.7)$$

Longitud (m):

$$\left(Relacion\ longitud/anchura\ de\ pozo \times superficie(m^2)\right)^{0,5} \qquad (Ec.8)$$

Anchura (m):

$$\frac{Superficie(m^2)}{Longitud(m)} \qquad (Ec.9)$$

Tiempo medio de residencia a caudal máximo (min):

$$\left(\frac{Volumen\ util(m^3)}{Caudal\ maximo(m^3\ /\ h\ /)}\right) \times 60 \qquad (Ec.10)$$

Velocidad ascensional a caudal máximo (m^3/m^2. min):

$$\frac{\left(\frac{Caudal\ maximo\ (m^3)}{Superficie(m^2)}\right)}{60min} \qquad (Ec.11)$$

Producción normal de arena y residuos secos (m^3/día):

$$\left(\frac{Caudal\ de\ diseño \times m^3\ de\ arena\ y\ residuo\ por\ 1000m^3\ de\ AR}{100}\right) \times 24 \qquad (Ec.12)$$

Producción normal de arena y residuos secos con tormenta (m^3/ h):

$$\left(\frac{Caudal\ Max\ (m^3) \times m^3\ de\ arena\ y\ residuo\ por\ 1000m^3\ de\ AR\ tormenta}{1000}\right) \qquad (Ec.13)$$

2.4.2 Desarenador

Es un tanque construido con el fin de generar condiciones adecuadas para lograr la sedimentación de partículas en suspensión por efecto de la gravedad, es un tratamiento primario y debe ser construido lo más cerca posible a la bocatoma (Castro Cardenas et al., 2019). El objetivo es separar los elementos en suspensión (arenas, arcillas, limos…) de granulometría superior a 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentaciones, para proteger las bombas y otros aparatos de la abrasión y para evitar problemas en las siguientes fases del tratamiento (Cruz, 2014).

Parámetros de partida

Caudal de diseño: Caudal adoptado como base para el cálculo.

Caudal máximo: caudal máximo que puede entrar al tratamiento.

Velocidad ascensional a caudal de diseño: velocidad media a la que asciende el agua por una superficie igual a la de la base cuando el caudal tratado coincide con el caudal de diseño.

Rango usual: 10 a 30

Velocidad de paso a caudal de diseño: velocidad media a la que circularía el agua por una superficie igual a la sección transversal del desarenador cuando el caudal tratado coincida con el caudal de diseño.

Rango usual: 50 a 100

Tiempo medio de resistencia a caudal de diseño: tiempo medio que permanecerá el agua residual en la balsa.

Rango usual: 15 a 20

Metros cúbicos de aire por metro cuadrado de superficie y hora: metros cúbicos por hora que es necesario alimentar a los difusores de los desarenadores por cada metro cuadrado de superficie de los mismos.

Rango usual: 4 a 10
Valor recomendado = 8

Metros cúbicos de arena por 1000 m^3 de agua residual a caudal de diseño: metros cúbicos de arena y residuos que se recogen en el desarenador por cada 1000 m^3 de agua residual que atraviesa el desarenador cuando el caudal tratado coincide con el caudal de diseño.

Valor recomendado = 0.02

Metros cúbicos de arena por 1000 m^3 de agua residual con tormenta: metros cúbicos de arena y agua residual que se recogen en el desarenador por cada 1000 m^3 de agua residual que atraviesa el desarenador cuando hay tormenta.

Rango usual: 1 a 3

Parámetros en el resultado de calculo

Superficie horizontal: superficie en planta del desarenador.

Valor recomendado = 33,33

Sección transversal: superficie vertical útil del desarenador excluido el resguardo y la tolva de arena.

Valor recomendado = 7,69

Volumen útil unitario: volumen útil del desarenador excluido el resguardo y la tolva de arena.

Valor recomendado = 125

Velocidad ascensional a caudal máximo: velocidad media a la que asciende el agua por una superficie igual a la de la balsa cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo.

Valor recomendado = 22,50

Velocidad de paso a caudal máximo: velocidad media a la que circula el agua por una superficie a la sección transversal del desarenador cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo.

Valor recomendado = 97,50

Tiempo medio de residencia a caudal máximo: tiempo medio que permanecerá el agua residual en la balsa cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo.

Valor recomendado = 10

Caudal total de aire necesario: metros cúbicos de aire que es necesario alimentar a los desarenadores por hora.

Valor recomendado = 533,33

Producción normal de arena seca: metros cúbicos de arena que se recogerán por hora cuando el caudal tratado coincida con el caudal de diseño.

Valor recomendado = 0,48

Producción máxima de arena y residuos secos con tormenta: metros cúbicos de arena y residuos que se recogen por hora cuando el caudal tratado coincida con el caudal máximo y se produzca un aporte de agua en los colectores proveniente de escorrentía superficial del agua de lluvia.

Valor recomendado = 4,50

Fórmulas

Caudal de diseño por línea (m^3/h)

$$\frac{caudal\ de\ diseño(m^3\ /\ h)}{numero\ de\ lineas} \qquad (Ec.\ 14)$$

Caudal máximo por línea (m^3/h)

$$\frac{caudal\ maximo(m^3\ /\ h)}{numero\ de\ lineas} \qquad (Ec.\ 15)$$

Superficie horizontal (m^2)

$$\frac{caudal\ de\ diseño\ por\ linea(m^3\ /\ h)}{vel.ascencional\ a\ caudal\ de\ diseño(m^3\ /\ m^2 * h)} \qquad (Ec.\ 16)$$

Sección transversal (m^2)

$$\frac{caudal\ de\ diseño\ por\ linea(m^3\ /\ h)}{vel.de\ paso\ a\ caudal\ de\ diseño(m^3\ /\ m^2 * h)} \qquad (Ec.\ 17)$$

Volumen útil unitario (m^3)

$$\left(\left(\frac{tiempo\ medio\ de\ residencia\ caudal\ de\ diseño\ (min)}{60}\right) \times caudal\ de\ diseño\ por\ linea(m^3\ /\ h)\right) \quad (Ec.\ 18)$$

Longitud (m)

$$\frac{volumen\ util\ unitario(m^3)}{seccion\ transversal\ (m^2)} \quad (Ec.\ 19)$$

Profundidad útil (m)

$$\frac{volumen\ util\ unitario(m^3)}{superficie\ horizontal(m^2)} \quad (Ec.\ 20)$$

Anchura (m)

$$\left(\frac{volumen\ util\ unitario(m^3)}{(longitud(m) * profundidad\ util(m))}\right) \quad (Ec.\ 21)$$

Velocidad ascensional a caudal máximo (m3/m2.h)

$$\frac{caudal\ maximo\ por\ linea(m^3\ /\ h)}{superficie\ horizontal(m^2)} \quad (Ec.\ 22)$$

Velocidad de paso a caudal máximo (m3/m2 * h)

$$\frac{caudal\ maximo\ por\ linea(m^3\ /\ h)}{seccion\ transversal(m^2)} \quad (Ec.\ 23)$$

Tiempo medio de residencia a caudal máximo (minutos)

$$\left(\frac{volumen\ util\ unitario(m^3)}{caudal\ maximo\ por\ linea(m^3\ /\ h)}\right) \times 60 \quad (Ec.\ 24)$$

Caudal total de aire necesario (m3/h)

$$\left(m^3\ de\ aire\ por\ m2\ de\ superficie\ y\ hora\ *\ superficie\ horizontal(m^2)\right)\times 60 \qquad (Ec.25)$$

Producción normal de arena seca (m3/día)

$$\left(\frac{caudal\ de\ diseño(m^3\ /\ h)*\ m^3 de\ arena\ por\ 1000m^3 de\ aguaresidual\ a\ caudal\ de\ diseño * caudal\ de\ diseño\ por\ linea(m^3\ /\ h)}{1000}\right)$$

$$(Ec.26)$$

Producción máxima de arena seca con tormenta (m3/h)

$$\frac{caudal\ maximo(m^3\ /\ h)\ *\ m^3 de\ arena\ por\ 1000m^3 de\ agua\ residual\ con\ tormenta}{1000}$$

$$(Ec.27)$$

2.4.3. Rejas

Las rejas de desbaste se colocan en dirección transversal u opuesta al flujo de agua, de tal forma que el agua pase a través de ellas, quedando retenidos sólidos con un tamaño superior a la separación entre las barras. En función de la separación entre barras se tiene desbaste de gruesos y desbaste de finos. Cuando son rectas, la colocación de las rejas respecto a la horizontal puede ser vertical o inclinada (Lopez et al., 2014).

2.5. Introducción Al Tratamiento Biológico De Aguas Residuales

En lo que respecta a los tratamientos biológicos, en la actualidad han adquirido otros usos como son: la oxidación del nitrógeno amoniacal (nitrificación), la eliminación del nitrógeno de las aguas residuales mediante la conversión de las formas oxidadas en N_2 (desnitrificación) o la eliminación de fosforo (Ferrer et al., 2018). Es importante considerar que muchas de las aguas residuales tratadas aun contienen porcentajes de nitrógeno y fósforo, es por eso que los vertidos de estos nutrientes al cauce público pueden provocar la eutrofización de ríos, lagos y embalses (Pérez Figueroa, 2017).

La eutrofización y la falta de agua segura se han convertido en problemas globales, por ello, las tecnologías físicas y químicas tradicionales se han empleado de forma inmediata para eliminar contaminantes de las aguas residuales (Chang et al., 2019).

2.5.1. Volumen del Reactor

Para determinar el volumen del reactor biológico se hace necesario conocer la concentración de DBO y Solidos Suspendidos en el agua que entra al biológico antes de mezclarse con el fango recirculado.

Un criterio de diseño para determinar el volumen del reactor es la concentración de sólidos suspendidos en el licor de mezcla (SSLM), el licor mixto es la mezcla de los fangos recirculados y el agua a tratar en el biológico.

Rango usual para este parámetro: 2000 a 4000

Valor recomendado de la bibliografía = 3000

Otro parámetro de diseño es la relación alimento microorganismo (F/M) esto hace referencia a los Kilos de DBO alimentados diariamente con el agua a tratar al reactor de lodos activos, dividido por los kilos de sólidos en suspensión contenidos en el reactor.

Rango usual para este parámetro: 0.1 a 0.5

Algoritmo de cálculo

- Solidos suspendidos en el reactor de fangos

$$SSLM\ en\ el\ Reactor\ de\ fangos = \frac{DBO_{entrada}}{Relacion\ \frac{alimento}{microorganismos}} \qquad (Ec.28)$$

- Volumen del Reactor.

$$Volumen\ del\ Reactor = \frac{SSLM\ en\ el\ reactor\ de\ Fangos}{SSLM\ Criterio\ de\ diseño} \qquad (Ec.29)$$

En general, los procesos biológicos del tratamiento de aguas residuales son parecidos, por lo que pueden considerarse como variantes del mismo proceso. Los fangos activados se consideran como el tratamiento bilógico más utilizado a nivel mundial, por lo que a continuación se describe.

2.5.2. Procesos De Eliminación Biológica De Materia Orgánica

El tratamiento secundario de depuración constituye una serie de importantes procesos de naturaleza biológica de tratamiento de las aguas residuales que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias con el 95% de la biomasa y protozoos 5%) para llevar a cabo la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto coloidal como disuelta, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes de nitrógeno y fósforo. (Clar & Mendoza Roca, 2017)

2.5.3. Fangos Activados

Son procesos aerobios, en ellos se consigue un prolongado tiempo de retención celular mediante una recirculación de los fangos, el aporte del oxígeno se efectúa por medios mecánicos (Ferrer et al., 2018). Los fangos se generan por la acción de microorganismos (bacterias y protozoos) que se desarrollan gracias a la existencia de materia orgánica, DBO y nutrientes como N y P, entre otros oligoelementos requeridos para el proceso aerobio, ahora bien, estos elementos mencionados se encuentran en el sustrato del agua residual que junto con el oxígeno incorporado y agitado permite el crecimiento de dichos microorganismos, los cuales llegan a formar la biomasa, de la cantidad de materia orgánica incorporada dependerá el crecimiento de los microorganismos (Garcia Corchero, 2015). En una EDAR además de la línea de aguas se encuentra también la línea de fangos, donde se tratan los fangos o lodos obtenidos en los tratamientos de las aguas (Jimenez, 2010).

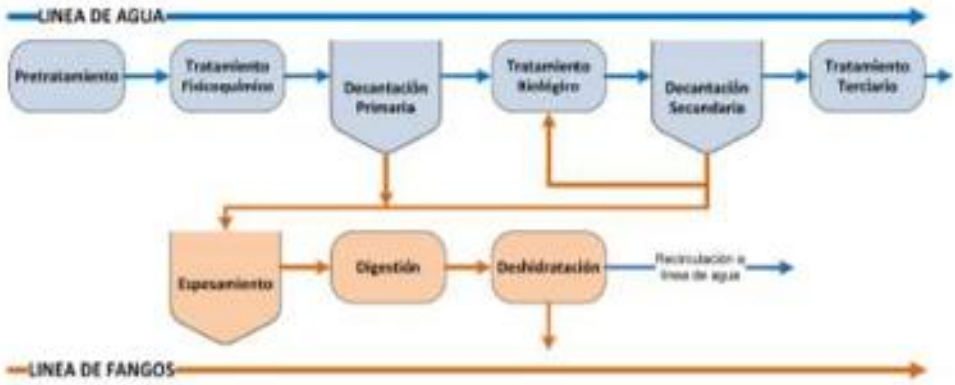


Figura 1. Esquema simple de una EDAR dividida en las dos líneas de tratamiento.

2.5.3.1. Procesos De Eliminación Biológica De Nitrógeno

La eliminación biológica de nitrógeno es uno de los procesos cruciales en las plantas de tratamiento de aguas residuales (EDAR), para la eliminación biológica de este componente va a depender de la tecnología de nitrificación y desnitrificación, que se basa en transformar el nitrógeno contenido en las aguas residuales en nitrógeno gas (Cui et al., 2019).

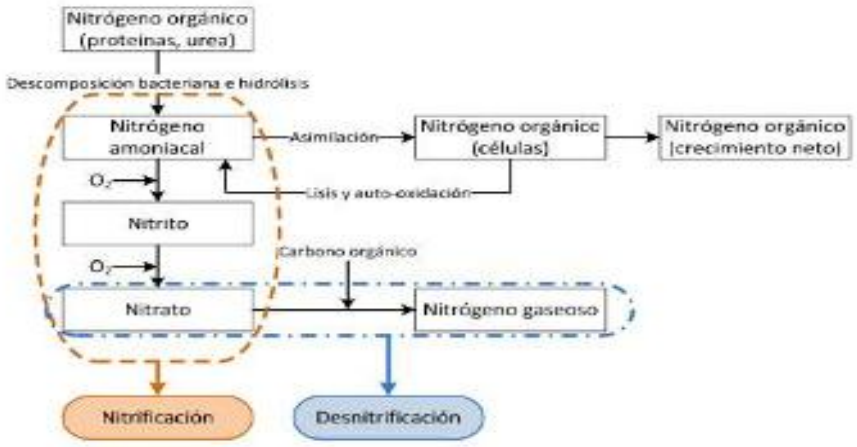


Figura 2. Transformaciones del nitrógeno en los procesos del tratamiento biologico.

2.5.3.1.1. Nitrificación

La nitrificación depende principalmente de las bacterias autótrofas nitrificantes, mismas que necesitan condiciones aeróbicas para la transformación del nitrógeno amoniacal en nitrato (Chang et al., 2019). Las bacterias encargadas de este proceso usan el carbón inorgánico

(CO_2) como fuente de carbono y para su crecimiento obtienen la energía necesaria a partir de la oxidación del nitrógeno amoniacal (Jimenez, 2010). El proceso de nitrificación tiene lugar en dos etapas en las que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitrito y posteriormente a nitrato. (Claros Bedoya, 2012)

Las correspondientes reacciones bioquímicas representativas de cada etapa son:

$$\boldsymbol{Primera\ Etapa}:\ NH_4^+ + \frac{3}{2}O_2 - Amonioxidantes \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

$$\boldsymbol{Segunda\ Etapa}: NO_2^- + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow Nitrificantes \rightarrow NO_3^-$$

En cada una de estas etapas se produce energía misma que es utilizada por los microorganismos para el crecimiento celular. Para condiciones habituales de operación en una EDAR, la primera etapa corresponde con la etapa limitante del proceso de nitrificación, por lo que la reacción energética global es representada en la siguiente ecuación (Jimenez, 2010).

$$NO_4^+ + 2O_2 \longrightarrow NO_3^- + 2H^+ + H_2O$$

La biomasa asimila una fracción del amonio contenida en el agua residual para la formación de tejido celular, la reacción de síntesis de los microrganismos implicados se representa en la siguiente ecuación, en la que se asume como fórmula química de la biomasa $C_5H_7NO_2$.

$$4CO_2 + HCO_3^- + NH_4^+ + H_2O \longrightarrow C_5H_7NO_2 + 5O_2$$

La reacción global que representa los procesos anabólicos y catabólicos de la nitrificación se representan en la siguiente ecuación:

$$4CO_2 + HCO_3^- + 22NH_4^+ + 37O_2 \longrightarrow C_5H_7NO_2 + 21NO_3^- + 20H_2O + 42H^+$$

Teniendo en cuenta esta reacción global de los coeficientes estequiometricas muestran que por cada mol de amonio (NH_4^+) oxidada el proceso de nitrificación se consume una cantidad

relativa de oxígeno, se produce una pequeña cantidad de biomasa y se consume una cantidad considerable de alcalinidad debido a la producción de iones de hidrógeno (Np).

En esta etapa se consigue oxidar el nitrógeno amoniacal a nitrato, pero para transformarlo a nitrógeno gas es necesario reducir el contenido de nitrógeno presente en el agua residual, por lo que se necesita un segundo proceso, denominado desnitrificación.

2.5.3.1.2. Desnitrificación

La segunda etapa del proceso biológico de eliminación de nitrógeno es la desnitrificación la cual se lleva a cabo principalmente por bacterias facultativas heterótrofas, en ausencia de oxígenos, utilizan el nitrato como aceptor de electrones para degradar la materia orgánica (Ren et al., 2020). De este modo, las bacterias en presencia de una fuente de carbón orgánico, reducen el nitrato a nitrógeno gas dando fin al proceso de eliminación bilógica de este nutriente.

Para que este proceso tenga lugar de forma eficiente es fundamental mantener condiciones anóxicas en el reactor, mismo que con la acción de una población de bacterias heterotróficas desnitrificantes que usan los productos de degradación orgánica como fuentes de carbono y energía (Cárdenas & Sánchez, 2013). En los sistemas de desnitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto cuya presencia suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo del proceso de desnitrificación (Ortega de Miguel et al., 2008).

La desnitrificación procede en forma de pasos en los que los nitratos (NO3 -) se reducen secuencialmente a nitritos (NO2-), óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N2O) y gas (N2). Cada una de estas semirreacciones se muestran en las ecuaciones (Pérez, 2013):

$$NO_3^- + 2e^- + 2H^+ = NO_2^- + H_2O$$
$$NO_2^- + e^- + 2H^+ = NO + H_2O$$
$$2NO + 2e^- + 2H^+ = N_2O + H_2O$$
$$N_2O + 2e^- + 2H^+ = N_2(g) + H_2O$$

Por otra parte, la reacción general de desnitrificación utilizando metanol como fuente de carbono, se representa a partir de la siguiente ecuación:

$$6NO_3^- + 5CH_3OH \longrightarrow 3N_2 + 5CO_2 + 7H_2O + 6OH^-$$

El proceso de desnitrificación contribuye a incrementar el pH debido a que la concentración de la alcalinidad se incrementa y la concentración de ácido carbónico disminuye.

2.5.3.2. Esquemas De Eliminación De Nitrógeno

Los esquemas de tratamiento utilizados para la eliminación biológica de nitrógeno vía nitrato alternan etapas aerobias y anóxicas bajo distintas condiciones de operación, tanto en medios de cultivo en donde la biomasa se encuentra suspendida como en medios de cultivo donde la biomasa está adherida a un medio de soporte (Claros Bedoya, 2012). La selección del tipo de proceso y su configuración dependerá de las características de las aguas residuales.

Sistemas De Cultivo En Suspensión o Simples

En un sistema de fangos activados los procesos de nitrificación y desnitrificación son generalmente diseñados y operados mediante cultivos mixtos de bacterias autótrofas y heterótrofas. Además, atendiendo a la posición relativa de las etapas aerobias y anóxicas se pueden clasificar en sistemas de predesnitrificación y postdesnitrificación (Claros Bedoya, 2012).

Los sistemas de predesnitrificación son aquellos en los que el agua residual es tratada primero en una zona anóxica y posteriormente en una zona aerobia (Knobelsdorf Miranda, 2005). Por otra parte, Wuhrmann planteó un sistema de postdesnitrificación, en el cual el agua residual se trata en una etapa aerobia y después en una etapa anóxica (López et al., 2001).

2.5.3.2.1. Configuración Bardenpho

El proceso Bardenpho es un sistema de lodos individuales compuesto por cuatro zonas anóxicas y aeróbicas alternadas en serie, cada reactor proporciona condiciones apropiadas para desempeñar su papel en la eliminación de impurezas de las aguas residuales. (Banayan Esfahani et al., 2019) La primera y tercera zonas son anóxicas, mientras que la segunda y cuarta zonas son aeróbicas, este proceso está diseñado para lograr una mayor eliminación de nitrógeno (Singureanu & Woinaroschy, 2017).

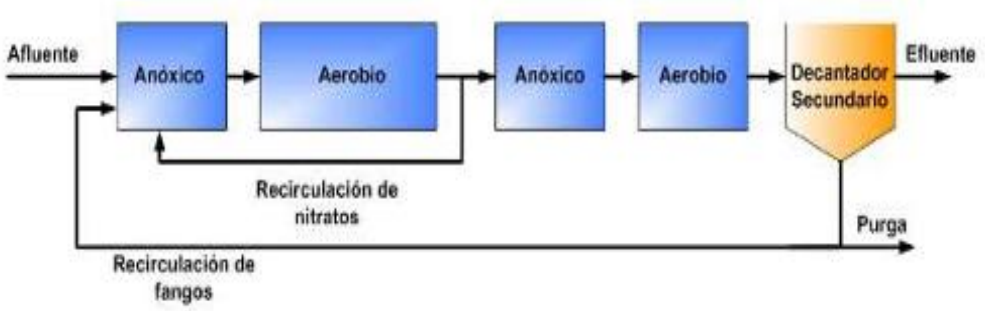


Figura 3. Configuración Bardenpho.

2.5.3.2.2. Configuración Anammox (oxidación anaerobia de amonio)

Corresponde con un proceso de tipo postdesnitrificación, en el cual se busca la eliminación de nitrógeno de las aguas residuales dentro de un medio anaeróbico, en este proceso, el primer amonio se oxida biológicamente a nitrato a través de nitrito en condiciones de óxido y después el nitrato es biológicamente convertido a nitrógeno gaseoso bajo condiciones anóxicas en presencia de carbono orgánico (Ali & Okabe, 2015).

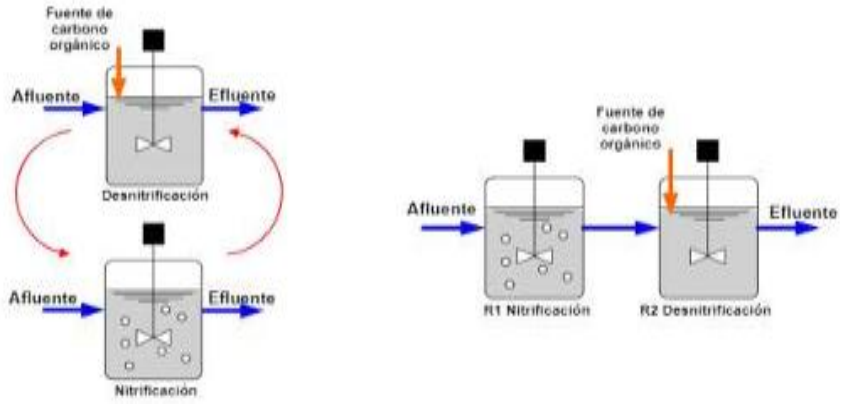


Figura 4. Configuración Anammox (posdesnitrificación).

2.5.3.3. Procesos de eliminación biológica de Fósforo

La eliminación biológica del fosforo requiere la sucesión de una fase anaerobia y una aerobia, en las cuales se desarrollará paralelamente la eliminación de este nutriente y de materia orgánica, la eliminación del fosforo puede combinarse con procesos de nitrificación y

desnitrificación en conjunto, puesto a que, si se realiza solo la nitrificación la presencia de nitratos impide que se obtengan condiciones anaerobias (Ferrer et al., 2018).

El fósforo (P) es el elemento clave a remover en las aguas residuales con el fin de limitar el crecimiento de plantas acuáticas y algas, controlando así la eutrofización (López et al., 2001). A diferencia del nitrógeno, el fósforo solo existe en ambientes acuáticos con valencia de +5, la remoción biológica de fosfato tiene como principal objetivo la eliminación de materia orgánica carbonosa y de fósforo, por lo que se utilizan sistemas modificados de lodos activados y de biopelícula (Peña Popoca, 2010).

2.5.3.3.1. Bacterias PAO

Bacterias capaces de acumular cantidades en exceso de fósforo en forma de poli fosfatos (PAO, Polyphosphate Accumulating Organisms), remueven sustratos simples producto de la fermentación en la zona anaerobia, la cual permite el desarrollo o la selección de una gran población de PAO en el sistema (Comisión Nacional del Agua Mexico, 2007). Estudios recientes de lodos activados que removieron el fósforo indicaron la naturaleza microbiológica de este proceso y condujeron al reconocimiento de organismos que lo proporcionan como un grupo fisiológico especial, "organismos acumuladores de fosfato" (PAO) (Fuhs & Chen, 1975) (Dorofeev et al., 2020).

2.5.3.4. Esquemas de eliminación de fósforo

Barnard en 1974, fue el primero en esclarecer la necesidad de una etapa anaerobia entre la biomasa y el agua residual antes de la degradación aerobia para llevar a cabo la remoción biológica de fósforo (Barnard, 2014). Una gran variedad de procesos para la RBF ha sido desarrollados y aplicados en plantas de tratamiento de aguas residuales las configuraciones de procesos para la RBF utilizadas son: Remoción de fósforo sin nitrificación, Remoción de fósforo con nitrificación y alta relación DBO/P y Remoción de fósforo con nitrificación y baja relación DBO/P (Comisión Nacional del Agua Mexico, 2007).

2.5.3.4.1. Configuración Phoredox (A/O)

La configuración básica del proceso para la remoción biológica de fósforo consiste de una zona anaerobia seguida de una zona aerobia (remoción de fósforo sin nitrificación), para una mayor absorción de fósforo, se han utilizado los procesos Anaeróbio / Óxico (A / O) o Phoredox como lo llamó Barnard (Jaafari et al., 2019). Se pueden eliminar hasta 15 mg / de fosfato (como P) de las aguas residuales sedimentadas en tiempos de retención anaeróbicos nominales de 12 h o más (Gerber & Winter, 1985).

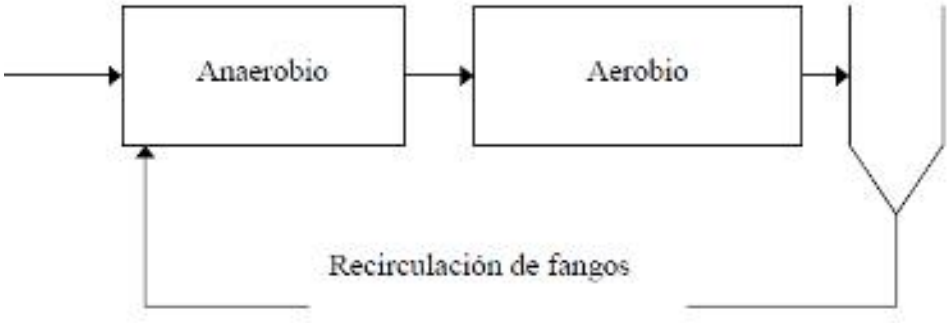


Figura 5. Configuración Phoredox.

2.5.3.5. Eliminación biológica de Nitrógeno y Fósforo

En los últimos años ha surgido un especial interés en la búsqueda de alternativas de remoción simultánea de nutrientes (N y P) que dejan como resultado modificaciones a tecnologías convencionales e innovaciones ingenieriles de procesos unitarios, dinámicos y estáticos, Las modificaciones tienen como fin llevar a cabo la remoción simultánea alternando dos o más condiciones (Saldarriaga et al., 2013).

2.5.3.5.1. Configuración Ludzack-Ettinger modificado

Consiste en la división del reactor biológico en 3 zonas: anóxica, aerobia (optimizar la eliminación biológica de nitrógeno) y anaerobia para la eliminación de nutrientes. Al someter a las bacterias PAOs a la alternancia de condiciones anaerobias y aerobias acumulan fósforo en su interior en forma de poli fosfatos (Suarez Oquendo, 2019).



Figura 6. Configuración Ludzack-Ettinger Modificado.

2.5.3.5.2. Configuración A^2/O

Es el esquema más sencillo para la eliminación conjunta de N y P, que introduce un tanque anóxico entre el tanque anaerobio y el aerobio del proceso de eliminación de P. En el tanque anóxico no existe oxígeno disuelto, pero sí nitratos procedentes de la recirculación de un importante caudal de agua desde el final de la zona aerobia. Estos nitratos son reducidos por las bacterias a nitrógeno gas (desnitrificación) en el proceso de degradación de la materia orgánica (Ferrer et al., 2018).

Para que tenga lugar la eliminación biológica de ambos nutrientes, se requiere una combinación de las tres condiciones ambientales. En la zona anaerobia, las bacterias PAO toman ácidos grasos volátiles contenidos en las aguas residuales o generadas a partir de los procesos de fermentación de las bacterias heterótrofas facultativas. Posteriormente, en la zona anóxica y aerobia, se llevan a cabo los procesos de desnitrificación, nitrificación y asimilación de fósforo del medio (Venegas, 2015).



Figura 7. Configuración A2O.

2.6. Paquetes de Simulación

Un modelo nunca se desarrolla para describir cada uno de los organismos presentes, cada molécula de agua o cada detalle en un proceso de tratamiento de aguas, los modelos se utilizan como una simplificación de la realidad de tal manera que solo describan las partes relevantes para poder entender y manejar los procesos. En este punto es de principal interés mirar los resultados de la simulación de los diferentes modelos en términos de las tendencias y en la medida que estas tendencias reflejan la realidad (López et al., 2001).

2.6.1. Eliminación De Materia Orgánica

A continuación, se hace la representación del modelo matemático ASM1, en este se detallan las cinéticas de crecimiento y las relaciones estequiometricas del proceso de eliminación de materia orgánica y nitrógeno. En el desarrollo del modelo se optó por el uso de una notación matricial en razón de mostrar la interrelación que existe entre las reacciones del modelo y los componentes que intervienen en el.

2.6.2. Modelo Conceptual Del ASM1

Para el modelo matemático del software este usa el modelo ASM1, para predecir lo que pasa en la realidad, mediante estequiometrias y cinéticas, en la siguiente tabla se detalla lo mencionado.

Tabla 1

Matriz del modelo matemático ASM1

	Componentes / **Reacciones**	S_S	X_S	X_{BH}	X_{BA}	X_P	S_O	S_{No}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	**Cinéticas**
1	Crecimiento Aerobio de Heterótrofos	$-\frac{1}{Y_H}$		1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			R1
2	Crecimiento anóxico de Heterótrofos	$-\frac{1}{Y_H}$		1				$-\frac{1-Y_H}{2{,}86\,Y_H}$	$-i_{XB}$			R2
3	Crecimiento Aerobio de Autótrofos				1		$-\frac{4{,}57-Y_A}{Y_A}$	$-\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB}-\left(\frac{1}{YA}\right)$			R3
4	Desaparición de Heterótrofos		1-f_p	-1		f_p					$i_{XB}-f_p i_{xp}$	R4
5	Desaparición de Autótrofos		1-f_p		-1	f_p					$i_{XB}-f_p i_{xp}$	R5
6	Amonificación de Nitratos S_{NO}								1	-1		R6
7	Hidrolisis de X_s	1	-1									R7
8	Hidrolisis de X_{ND}									1	-1	R8

Nota: en la matriz las reacciones (1,4 y 7) están implicadas en la descomposición de M.O, reacción (2) coeficientes estequiometricos (desnitrificación), reacciones (3,5,6,8) coeficientes estequiometricos (nitrificación).Tomado de "Tratamiento biologico de aguas residuales: principios, modelación y diseño"(López et al., 2001).

En la tabla 1 en la parte de filas se muestran los componentes que intervienen en el modelo matemático, los mismos se detallan a continuación en la tabla 2:

Tabla 2

Componentes del modelo matemático ASM1

Descripción	**Símbolo propuesto ASM1**	**Unidades**
Materia biodegradable soluble	S_s	mgDQO/l
Orgánicos solubles no biodegradables en el afluente	S_I	mgDQO/l
Oxígeno disuelto	S_o	mgO2/l
Orgánicos en el afluente lentamente biodegradable (coloidal y partículas	X_s	mgDQO/l
Masa de materia orgánica Inerte	Xp	mgDQO/l
Organismos heterótrofos ordinarios (OHOs)	$XB,_H$	mgDQO/l
Organismos nitrificantes autotróficos (NH4+ a NO3-)	$XB,_A$	mgDQO/l
Amonio (NH4+ + NH3)	S_{NH}	mgN/l
Nitrito + nitrato	S_{NO}	mgN/l
Alcalinidad	S_{ALC}	mgCaCO3/l

Nota: Simbología utilizada dentro del software ASM1.Tomado de "Curso práctico de modelados y simulación en EDAR, ASM1"(Pulido Velázquez & Rey, 2018).

En cambio, en la columna izquierda se muestra los procesos o reacciones que toma en cuenta el modelo matemático: Crecimiento aerobio de Heterótrofos, Crecimiento anóxico de heterótrofos, Crecimiento aerobio de autótrofos, Desaparición de Heterótrofos, Desaparición de Autótrofos, Amonificación de S_{ND}, Hidrolisis de X_s Hidrólisis de $X_{ND.}$ En la siguiente tabla se detalla las ecuaciones cinéticas que se obtienen del modelo matemático ASM1.

Tabla 3
Ecuaciones cinéticas modelo matemático ASM1

Proceso	Ecuación
Crecimiento Aerobio de Heterótrofos	$R1 = \mu_H \frac{s_s}{K_S + S_S} \frac{S_O}{K_{OH} + S_O} X_{BH}$
Crecimiento anóxico de Heterótrofos	$R2 = \mu_H \frac{s_s}{K_S + S_S} \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \eta_g X_{BH}$
Crecimiento Aerobio de Autótrofos	$R3 = \mu_A \frac{s_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \frac{S_O}{K_{OA} + S_O} X_{BA}$
Desaparición de Heterótrofos	$R4 = b_H \times X_{BH}$
Desaparición de Autótrofos	$R5 = b_A \times X_{BA}$
Amonificación de Nitratos S_{NO}	$R6 = K_A \times S_{ND} \times X_{BH}$
Hidrolisis de X_s	$R7 = K_h \frac{\frac{X_S}{X_{BH}}}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}}\right)} \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} + \eta_h \frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}}\right) X_{BH}$
Hidrolisis de X_{ND}	$R8 = R7 \times \frac{X_{ND}}{X_S}$

Nota: Coeficientes estequiometricas con relación al proceso y su ecuación. Tomado de "Curso práctico de modelados y simulación en EDAR, ASM1"(Pulido Velázquez & Rey, 2018).

En la columna de la derecha están representadas las ecuaciones de velocidad de dichos procesos donde:

γ_H: Rendimiento para biomasa heterotrófica.

μ_H: Máxima tasa de crecimiento específico para biomasa heterótrofa.

S_s: Sustrato disuelto biodegradable.

K_s: Coeficiente de saturación media para biomasa heterotrófica.

S_o: Oxígeno Disuelto

K_{OH}: Coeficiente de media saturación de oxígeno para biomasa heterótrofa.

X_{BH} : Biomasa Heterótrofa.

K_H: Tasa máxima de hidrólisis específica.

X_S: Sustrato Particulado biodegradable.

K_X: Coeficiente de media saturación para hidrólisis de sustrato lentamente biodegradable.

b_H : Coeficiente de descomposición de la biomasa heterotrófica.

f_P: Fracción de biomasa convertida en materia inerte.

La matriz de estequiometria hace referencia a la conservación de la masa, elementos que intervienen, donde la suma de todos los coeficientes estequiométricos da igual a cero, por ejemplo se destaca el proceso de Hidrolisis X_S fácilmente identificable.

2.6.3. Lynx ASM1

Es un software que trabaja basado en el modelo matemático ASM1 (Activated Slunge Model number 1) o Modelo de Lodos Activado 1, el cual es un sistema que abarca un conjunto de ecuaciones que son utilizadas para la simulación de tratamiento de aguas residuales, además cuenta con modelos matemáticos de decantación, espesamiento y deshidratación de fangos. Lynx ASM1 v2.5 ha sido desarrollado por LYNX Simulations y Héctor Rey, responsable del Área de Modelado y Simulación de ABGC, y la colaboración de Manuel Martínez, de la firma PROINTEC (dueños del software) (Rey et al., 2017). Ofrece al usuario diseñar su propia EDAR y establecer tantas zonas anóxicas y óxicas como se desee, con sus respectivas características de volumen, consignas de oxígeno disuelto y comunicaciones entre zonas (recirculaciones, enlaces con zonas de otras líneas, enlaces directos al decantador), a partir de una caracterización de las aguas residuales.

2.7. Normativa ambiental de descargas

El proyecto cumplirá con lo dispuesto en el Acuerdo Ministerial 097-A, qué reforma a lo expuesto en el Texto Unificado de Legislación Secundaria, Medio Ambiente, Libro VI (TULSMA) en el ANEXO 1, dicho acuerdo determina o establece en la Tabla 9 de límites de descarga a un cuerpo de agua dulce, los cuales se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4

Límites de descarga a un cuerpo dulce

Parámetros	**Expresado como**	**Unidad**	**Límite Máximo permisible**
Demanda Bioquímica de Oxigeno (5 días)	$D.B.O_5$	mg/l	100
Demanda Química de Oxigeno	D.Q.O	mg/l	250
Nitrógeno Total Kjedahl	N	mg/l	50
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30
Fosforo total	P	mg/l	10
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1600

Nota: Parámetros representativos de aguas residuales urbanas. Tomado de "Acuerdo Ministerial 097-A del 2015" (Ministerio de Ambiente, 2015)

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Localización

En el presente proyecto se ha seleccionado como caso de estudio a la Cuidad de Latacunga, Provincia de Cotopaxi - Ecuador. De esta ciudad se tomaron los datos de población, como base de cálculo para estimar un caudal de diseño y caracterización del agua. La información generada sirvió como dato de partida para las distintas configuraciones que se simularon en el Software LYNX.

3.2 Tipo O Diseño De La Investigación

El fundamento metodológico de esta investigación es de carácter explicativa, cuantitativa ya que en este estudio se utilizó simulaciones, dentro de lo cual se analizó datos poblacionales y se proyectó en base a datos estadísticos caudales y características del agua, en cuanto a las simulaciones se propuso varias configuraciones para su análisis, así mismo el software de simulación LYNX está basado en el modelo matemático ASM1 (Activated Slunge Model number 1) o Modelo de Lodos Activado.

Por otra parte, se consideró dentro de un alcance como descriptiva - explicativa, utilizando como base datos bibliográficos, los cuales sirvieron como fundamentos de partida para elaborar distintas configuraciones de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), en el Software LYNX para su simulación. Los distintos diseños de EDAR permitieron analizar, explicar los procesos que ocurren y determinar así los problemas de cada configuración, de esta manera se estableció la mejor alternativa.

3.3 Métodos de la Investigación

En el presente estudio se aplicaron varios métodos los cuales permitieron obtener el resultado esperado, de esta manera, el trabajo se propuso con una metodología analítica, ya que, se realizó una revisión ordenada de la bibliografía, los resultados de las distintas

configuraciones fueron analizados sobre cada uno de los esquemas usados; tras este análisis se empleó un método de sintético lo que permitió estructurar ideas en base a la información analizada, en base a este análisis y síntesis se aplicó el método deductivo con lo que se logró interpretar y obtener conclusiones acerca de la mejor alternativa de las configuraciones planteadas.

3.3.1. Metodología para el primer objetivo

Objetivo 1: Establecer mediante revisión bibliográfica el caudal y la carga contaminante de las aguas residuales generadas en la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi - Ecuador.

Los datos de partida para el Diseño de una EDAR fueron el caudal y carga contaminante, para la obtención de estos datos se obtuvo la proyección de la población de la cuidad de Latacunga, luego se realizó una revisión bibliográfica que permitió en base a la dotación de agua potable determinar la cantidad de agua que se espera llegue a la planta de tratamiento, para determinar la carga contaminante se realizó una revisión bibliográfica sobre la unidad de cálculo habitante equivalente.

3.3.2. Metodología para el segundo objetivo

Objetivo 2. Proyectar 3 Alternativas de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales urbanas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi-Ecuador.

Para la utilidad del Software de modelado y simulación matemática de EDAR y analizar el proceso más adecuado que asegure una calidad del efluente, que cumpla con la normativa ambiental de descarga se describió la siguiente metodología.

El trabajo en el software inició con la Calibración- Validación del modelo matemático, dado que el proyecto partió de una revisión bibliográfica por lo que se usaron los valores de las constantes de calibración propuestos en el simulador LYNX y el modelo matemático ASM1 con el cual es diseñado este Software.

La calibración del modelo se realizó por determinación experimental mediante técnicas de respirometria, (Spanjers et al., 1998) pero es posible afirmar que generalmente solo es

necesario modificar unos pocos parámetros en la calibración y que su valor no cambia drásticamente para diferentes sistemas de tratamiento de agua residual (Liwarska-Bizukojc et al., 2011).

Para las diferentes configuraciones a simular, se realizó una revisión bibliográfica de los esquemas de eliminación biológica de materia orgánica y eliminación biológica conjunta de DQO y nitrógeno. Una vez analizados estos esquemas se procedió a implementarlos en el Software LYNX junto a los valores de caudal, características del agua influente y constantes de calibración.

Se simularon 3 configuraciones para la eliminación de materia orgánica, nitrógeno y DQO, inicialmente se esperó que las configuraciones pudiesen asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental, el resultado logró ser válido también en los casos que las configuraciones no proporcionaron resultados en el cumplimiento del objetivo.

3.3.3. Metodología para el tercer objetivo

Objetivo 3: Seleccionar la mejor alternativa de las configuraciones propuestas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador.

Una vez analizadas y estructuradas las alternativas se realizó una comparación entre las mismas, con el fin de evaluar técnicamente los beneficios y dificultades de cada alternativa y así se recomendó la alternativa más viable.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS

En el siguiente capítulo se describen los resultados obtenidos por cada uno de los objetivos.

4.1. Resultado Objetivo 1. Establecer mediante revisión bibliográfica el caudal y la carga contaminante de las aguas residuales generadas en la ciudad de Latacunga provincia de Cotopaxi Ecuador.

Los datos de partida para el diseño de la EDAR en la ciudad de Latacunga son el caudal y carga contaminante, estos datos están directamente relacionados con la población de dicha ciudad, por lo que el primer paso fue estimar la población a partir de los datos del INEC.

4.1.1. Proyección poblacional

En la siguiente tabla se detallan las proyecciones estimadas por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.

Tabla 5

Proyecciones de INEC

Año	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Población	176.842	179.720	182.598	185.477	188.355	191.233	194.111	196.989	199.868	202.746	205.624

Nota: Proyecciones del INEC al 2020. Tomado de "Instituto de Estadística y Censos (INEC)"(Villacis & Carillo, 2010).

Para cumplir con este objetivo se hizo uso de los métodos aritmético y geométrico, estos dependen del grado de estabilización que ha alcanzado la población, para así obtener las proyecciones de la población.

Para la resolución del método aritmético se calculó la tasa de crecimiento k_a, mediante la siguiente ecuación:

Método Aritmético

$$(Ec.3) \qquad k_a = \frac{205624-176842}{2020-2010}$$

$$K_a = 2878{,}2\ \frac{hab}{año}$$

Método Geométrico

Ahora bien, para el método geométrico se calculó la tasa de crecimiento *R* mediante la siguiente ecuación:

$$R = \left(\frac{205624}{176842}\right)^{\left(\frac{1}{(2020-2010)}\right)^{-1}}$$

$$R = 0{,}01519352 \qquad (Ec.1)$$

Como resultado del presente estudio sobre el método geométrico se presenta una tasa de crecimiento de *R= 1,5%,* este valor es menor al presentado por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos para la provincia de Cotopaxi con una tasa de crecimiento de 1,75%. Esta reducción en la velocidad de crecimiento poblacional puede deberse a varios factores, resaltando el de la reducción del número de hogares y la decisión de tener menos hijos por hogar. Esto se corrobora con los datos presentados en el Censo 2010 del INEC, en el que se indica que los hijos por hogar fueron de 1,6 personas, el cual disminuyó en relación al 2001 (1,8) y a 1990 (2,3).

Entre el número 1 – 11 de la tabla 6 se presenta la proyección poblacional del INEC, además, se presentan los resultados de la aplicación de los métodos aritmético y geométrico con sus respectivas tasas tasa de crecimiento K_a del método Aritmético y la tasa de crecimiento *R* del método geométrico hasta el año 2040.

Se ha definido un periodo de diseño de 20 años es decir hasta el 2040. Este criterio se ha considerado en cumplimiento a lo dispuesto por La Subsecretaría de Saneamiento Ambiental y Obras Sanitarias y el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, IEOS, en base a las NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES. En esta norma se indica las bases de diseño para una planta de tratamiento de aguas residuales, en la cual, se debe considerar un horizonte de diseño (periodo de diseño) entre 20 y 30 años (Codigo Ecuatoriano de La Construccion de Parte IX Obras Sanitarias, 2014).

Tabla 6

Proyección de crecimiento mediante los métodos Aritmético y Geométrico en base a las proyecciones INEC

Nº	AÑO	Proyección INEC (2010-2020)	Proyección M. Aritmético YC $\gamma_c = P_o + (k_a.\mathcal{T})$	Proyección M. Geométrico Yc $Y_c = P_o \times (1+R)^T$
1	2.010	176.842	176.842	176.842
2	2.011	179.794	176842 ((2011-2010) x 2872,2) = 179720	176.842 (1+0,0151935) ^ (2011-2010) =179.529
3	2.012	182.748	179720 ((2012-2011) x 2872,2) = 182.598	179.529 (1+0,0151935) ^ (2012-2011) =182.257
4	2.013	185.698	182.598 ((2013-2012) x 2872,2) = 185.477	182.257 (1+0,0151935) ^ (2013-2012) =185.026
5	2.014	188.627	185.477 ((2014-2013) x 2872,2) = 188.355	185.026 (1+0,0151935) ^ (2014-2013) =187.837
6	2.015	191.539	188.355 ((2015-2014) x 2872,2) = 191.233	187.837 (1+0,0151935) ^ (2015-2014) =190.691
7	2.016	194.423	191.233 ((2016-2015) x 2872,2) = 194.111	190.691 (1+0,0151935) ^ (2016-2015) =193.588
8	2.017	197.277	194.111 ((2017-2016) x 2872,2) = 196.989	193.588 (1+0,0151935) ^ (2017-2016) =196.529
9	2.018	200.094	196.989 ((2018-2017) x 2872,2) = 199.868	196.529 (1+0,0151935) ^ (2018-2017) =199.515
10	2.019	202.878	199.868 ((2019-2018) x 2872,2) = 202.746	199.515 (1+0,0151935) ^ (2019-2018) =202.547
11	2.020	205.624	202.746 ((2020-2019) x 2872,2) = 205.624	202.547 (1+0,0151935) ^ (2020-2019) =205.624
12	2.015		205.624 ((2015-2020) x 2872,2) = 191.233	205.624 (1+0,0151935) ^ (2015-2020) =190.691
13	2.020		191.233 ((2020-2015) x 2872,2) = 205.624	190.691 (1+0,0151935) ^ (2020-2015) = 205.624
14	2.025		205.624 ((2025-2020) x 2872,2) = 220.015	205.624 (1+0,0151935) ^ (2025-2020) = 221.727
15	2.030		220.015 ((2030-2025) x 2872,2) = 234.406	221.727 (1+0,0151935) ^ (2030-2025) = 239.090
16	2.035		234.406 ((2035-2030) x 2872,2) = 248.797	239.090 (1+0,0151935) ^ (2035-2030) = 257.814
17	2.040		248.797 ((2040-2035) x 2872,2) = 263.188	257.814 (1+0,0151935) ^ (2040-2035) = 278.004

Nota: En base a las proyecciones del INEC, se realiza los cálculos de proyección de crecimiento a futuro mediante el método aritmético y geométrico.

Los métodos matemáticos se establecen en ecuaciones, que representan progresiones tanto de forma aritmética y geométrica, por lo que se puede observar en la figura 8, existe una diferencia en relación a la proyección para el año 2040 entre los dos métodos. La técnica matemática aritmética, supone que en cada período la población aumenta o disminuye en el mismo número de personas, por ello en un estudio de (Pittenger, 1976) mencionó, que dicha ecuación no debe ser muy utilizada ya que es muy difícil encontrar una población con dichas características, además, indica que esta ecuación sólo justifica su uso en el caso de disponer únicamente de dos puntos en el tiempo.

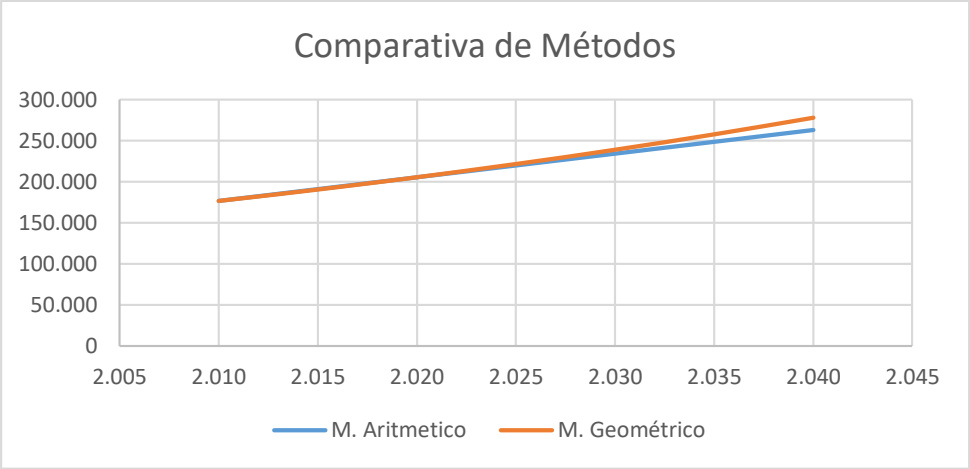


Figura 8. Comparación entre métodos.

En el caso del método geométrico autores como Sussmilch, King, Malthus y otros, observaron cómo la población tendía a crecer en forma geométrica, por lo que, en ciertos estudios esto fue aplicado a varias poblaciones (Granados, 1987).

Para el presente proyecto se ha definido el uso de la población futura al año 2040, correspondiente al método geométrico con 278.004 habitantes; basado en lo expuesto por (Granados, 1987) en su análisis observó cómo la población tendía a crecer en forma geométrica, durante mucho tiempo este comportamiento se presentó en varias poblaciones, por lo que esta función es ampliamente utilizada y se aplica para poblaciones que se encuentran en pleno desarrollo como es el caso de la ciudad de Latacunga.

4.1.2. Cálculo de caudal

Para determinar el caudal de tratamiento en la EDAR, se solicitó información del Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Latacunga sobre la cantidad de agua potabilizada, la misma se remitió a través del Informe del Ing. Byron Oswaldo Montero Jaramillo; Director de Operación y Mantenimiento de la Empresa Municipal de Agua Potable y Alcantarillado (EMAPA) mediante correo electrónico.

La información detalla que actualmente se posee 3 plantas de potabilización localizadas en puntos estratégicos, para así lograr abastecer de agua potable a la ciudadanía, la planta de Loma Alcoseres, abastece al sector oriental y occidental, La planta de Illigua, y Calzado,

abastecen de líquido vital a las parroquias urbanas del sector oriental. Los caudales de tratamiento se expresan en la tabla 7.

Tabla 7
Caudal de tratamiento de las plantas

Planta de Potabilización	Caudal Tratado	Unidades
1. Loma Alcoseres	200	l/s
2. Illigua	170	l/s
3. Calzado	140	l/s
Caudal Total tratado	510	l/s

Nota: La suma de la potabilización de las tres plantas da como resultado un caudal total de 510 l/s. Tomado de "Informe de EMAPA".

Podemos sustentar con esta información que el total de agua tratada entre las tres plantas en la ciudad de Latacunga es de 510 l/s.

En la ciudad de Latacunga existe una población de 205.624 habitantes al año 2020, según los datos proporcionados por EMAPAL el servicio de agua potable se entrega a 80000 predios, esto incluye el consumo de todos los servicios que realiza en un día medio anual, tomando en cuenta las pérdidas.

$$Total\ de\ agua\ tratada = 510\ \frac{l}{s} \times 86400\ \frac{s}{día} = 44064000\ \frac{l}{día}$$

$$Dotación = 44064000\ \frac{l}{día} \div 205624\ hab = 214\ \frac{l}{hab.día}$$

Del análisis de la información del Municipio del cantón Latacunga se trata un caudal de 44´064.000 $\frac{l}{día}$, lo que da como resultado una dotación de 214 $\frac{l}{hab.día}$. Este valor concuerda con las dotaciones de la Norma Ecuatoriana CPE INEN 005-9-1 vigente, "captación y conducción para proyectos de abastecimiento de agua potable", en la tabla 3. Dotaciones recomendadas, en la que muestra que para una población de más de 50000 habitantes en clima frío existirá una dotación de > 200 $\frac{l}{hab.día}$ (INEN, 2003), de igual manera en la revista

NOVASINERGIA, se presenta una dotación entre 190 – 220 L/hab.dia en lo que respecta a la Sierra (Arellano et al., 2018), es importante acotar, que (Garcia Trisolin, 2009) en su manual de proyectos de agua potable en poblaciones rurales menciona una dotación de $200\frac{l}{hab.día}$ según las recomendaciones de la OMS (Howard et al., 2003).

Del análisis de los valores calculados de dotación se verifica que estos concuerdan a los datos bibliográficos, ya que se encuentran en valores similares o dentro de estos rangos.

Una vez estimada la población y con la dotación proporcionada por el municipio se proyectó el caudal al año 2040.

$$Caudal = Población\ (2040) \times Dotación$$

$$Caudal = 278004\ hab\ \times 214{,}29\ \frac{l}{hab.día}$$

$$Caudal = 59574539\ \frac{l}{día}$$

El caudal de diseño para la EDAR se estimó tomando como base de cálculo el caudal de agua que se potabiliza, considerando que no todo el caudal potabilizado retorna a la planta ya que existen perdidas, principalmente debido a fugas en el sistema de alcantarillado, ya sea por daños del material de las tuberías, conexiones defectuosas, rupturas, etc. En el manual Comex expone que entre un 60% a 85% del caudal potabilizado retorna a la planta de tratamiento, esto debido a lo ya antes expuesto (Ortega de Miguel et al., 2008). Para este estudio se ha considerado que retorna un 80% del caudal a la planta para ser tratado, este factor además corresponde a los criterios emitidos por La Subsecretaría de Saneamiento Ambiental y Obras Sanitarias y el Instituto Ecuatoriano de Obras Sanitarias, IEOS, en base a las NORMAS PARA ESTUDIO Y DISEÑO DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES PARA POBLACIONES MAYORES A 1000 HABITANTES, en el mismo se define que para el caso de sistemas nuevos se determinará el caudal medio de diseño a base de la dotación de agua potable multiplicada por la población y un factor entre 0,75 y 0,8

$$Caudal\ de\ diseño = 59574539\ \frac{l}{día} \times 0{,}80$$

$$Caudal\ de\ diseño = 47659631\ \frac{l}{día}$$

Un aporte importante al caudal de diseño es el aporte industrial, para estimar este aporte se ha considerado el aporte que tendría el Eco parque Industrial de la provincia. Según el Ministerio de Industrias y Productividad (MIPRO) el parque se construirá en 121 hectáreas.

Según (Lozano, 2012), pueden estimarse unos valores de aporte de aguas residuales industriales de entre 0,4 a 1,5 L/s por hectárea de suelo de uso industrial, dependiendo del nivel de industrialización de la población. En el presente trabajo se ha utilizado el valor promedio de 0,95 l/s.

$$Q\ aporte\ Industrial = 121\ hectáreas \times 0{,}95\frac{l}{s} = 114{,}5\frac{l}{s}$$

$$Q\ aporte\ Industrial = 114{,}5\frac{l}{s} * \frac{86400_s}{1\ día} = 9931680\ \frac{l}{día}$$

Por lo que para el presente trabajo el caudal de diseño será:

$$Caudal\ de\ diseño = 47659631\ \frac{l}{día} + Q\ aporte\ Industrial\ 9931680\frac{l}{día}$$
$$= 57591311{,}07\ \frac{l}{día}$$

$$Caudal\ de\ diseño = 57591{,}3\ \frac{m^3}{día}$$

Se puede expresar que el dato proyectado como caudal de diseño de 57591,3 m^3/s está acertado a la realidad, al haberse usado el método geométrico para cálculo de población futura, los datos del municipio para estimar la dotación, factores de retorno, aportes de caudal. Es importante indicar que Osorio en el 2019 expresó que diariamente 40000 m^3 de aguas residuales son descargadas en el río Cutuchi.

El factor de mayoración o factor punta KMD para el presente trabajo tiene un valor de 1,25, este valor se ha tomado de la NORMA CO 10.7 – 602 dictada por la Secretaría del Agua (SENAGUA).

4.1.3. Caracterización de agua residual

En el presente proyecto se ha considerado realizar una revisión bibliográfica de distintas caracterizaciones de aguas residuales urbanas, en la siguiente tabla se muestran valores de concentración alta, media y baja, en este caso se ha sacado un promedio de las concentraciones.

Tabla 8
Composición típica de aguas residuales urbanas

Parámetros	Alto	Media	Bajo	Promedio
Sólidos Totales (ST) (mg/l)	1200	720	350	757
DQO (mg/l)	1000	500	250	583
DBO (mg/l)	400	220	110	243
N total (mg/l)	85	40	20	48
N Amoniacal (mg/l)	50	25	12	29
N Orgánico (mg/l)	35	15	8	19
N Total Kjeldahl (mg/l)	85	40	20	48

Nota: Revisión bibliográfica de distintas caracterizaciones de aguas residuales urbanas. Tomado de "Selection of technologies for municipal wastewater treatment". (J. P. Rodriguez et al., 2015).

En la siguiente revisión se recalca las concentraciones de aguas residuales, incluyendo en esta caracterización aportes de efluentes industriales, así mismo, se muestra una concentración alta, media y baja.

Tabla 9

Composición típica de aguas residuales municipales con aportes menores de efluentes industriales

Parámetros	Alto	Media	Bajo	Promedio
Sólidos Suspendidos totales (SST) (mg/l)	600	400	250	417
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) (mg/l)	480	320	200	333
DQO (mg/l)	1200	750	500	817
DBO (mg/l)	560	350	230	380
N total (mg/l)	100	60	30	63
N Amoniacal (mg/l)	75	45	20	47
N Orgánico (mg/l)	25	10	15	17
N Total Kjeldahl (mg/l)	100	60	30	63
N Nitrato + Nitrito	0,5	0,2	0,1	0

Nota: Composición de los parámetros en los rangos alto, medio, bajo. (Ferrer Polo, Jose; Torecillas, 2019).

(Cuenca Haro, 2018) en su trabajo de "Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales de la parroquia Tingo, La Esperanza, ubicada en el cantón Pujilí, provincia de Cotopaxi", indica que realizó 3 muestreos de aguas residuales, los datos de aquel muestreo se presentan en la tabla 10 de dicho estudio.

Tabla 10

Muestreos de aguas residuales

Parámetros	1	2	3	Promedio
Sólidos Suspendidos totales (SST) (mg/l)				
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) (mg/l)				
DQO (mg/l)	75	238	278	197
DBO (mg/l)	42	137	81	87
N total (mg/l)				
N Amoniacal (mg/l)				
N Orgánico (mg/l)				
N Total Kjeldahl (mg/l)	6	8	18	11
N Nitrato + Nitrito				

Nota: Muestreos realizados en la parroquia La Esperanza, tomado de la tesis de grado de la UCE (Cuenca Haro, 2018).

De la revisión bibliográfica realizada, se consideró usar los valores promedios de cada caracterización para estimar un valor promedio final, este valor se ha considerado como los valores de concentración inicial para el diseño de la EDAR.

Tabla 11
Valores de concentración usados en el software LYNX

Parámetros	Torrecillas	IWA	Cuenca	Promedio Final
Sólidos Suspendidos totales (SST) (mg/l)	757	417		587
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) (mg/l)		333		333
DQO (mg/l)	583	817	197	532
DBO (mg/l)	243	380	87	237
N total (mg/l)	48	63		56
N Amoniacal (mg/l)	29	47		38
N Orgánico (mg/l)	19	17		18
N Total Kjeldahl (mg/l)	48	63	11	41

Nota: Promedio de caracterización de diferentes fuentes bibliográficas. Tomado de "el libro de Torrecillas, del libro IWA y de la tesis de Cuenca".

4.2 Resultado Objetivo 2. Proyectar 3 Alternativas de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales urbanas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador.

Para cumplir con este objetivo, se presenta un pretratamiento diseñado, que es similar para las 3 alternativas, luego se presentan las 3 alternativas de diseño que contemplan variaciones en los esquemas de tratamiento biológico. El pretratamiento propuesto es el siguiente:

4.2.1. Pretratamiento

El pretratamiento planteado se conforma de pozo de gruesos y desarenador.

4.2.1.1. Pozo de Gruesos. A continuación, se detalla los criterios de diseño utilizados y los resultados obtenidos para el pozo de gruesos

Parámetros de partida		
Caudal de diseño	57591	(m3 /día)
Caudal de diseño	2400	(m3 /h)
Caudal máximo KMD= 1.25	3000	(m3 /h)
Criterios de diseño para diseño		
Tiempo medio de residencia a caudal de diseño	4	(minutos)
Velocidad ascensional a caudal de diseño	1	(m3/m2.minuto)
Relación Longitud/ anchura del pozo	1	

Metros cúbicos de arena y residuos por 1000 m3 de agua residual a caudal de diseño	1
Metros cúbicos de arena y residuos por 1000 m3 de agua residual con tormenta	3

Resultados de cálculo pozo de gruesos:

1. $Volumen\ útil = 4\ min \times \left(\frac{2400\frac{m^3}{h}}{60}\right) = 159{,}98\ m^3$

2. $Superficie = \left(\frac{2400\frac{m^3}{h}}{60}\right) \div 1\ \frac{m^3}{m^2.min} = 39{,}99\ m^2$

3. $Profundidad\ útil = \frac{159{,}98\ m^3}{39{,}99 m^2} = 4\ m$

4. $Longitud = (1 \times\ 39{,}99\ m^2)^{0{,}5} = 6{,}32$

5. $Ancho = 39{,}99\ m^2 \div\ 6{,}32 = 6{,}32\ m$

6. $Tiempo\ medio\ de\ residencia\ a\ caudal\ máximo = 159{,}98\ m^3 \times 3000\ \frac{m^3}{h}$
$= 3{,}20\ min$

$Velocidad\ ascensional\ a\ caudal\ máximo = \frac{\left(3000\ \frac{m^3}{h} \div 39{,}99 m^2\right)}{60} = 1{,}25\frac{m^3}{m^2.min}$

4.2.1.2. Desarenador. El siguiente proceso de pre tratamiento es un desarenador aireado con dos líneas de ingreso, a continuación, el proceso de cálculo.

Parámetros de partida		
Caudal de diseño	2400	(m3 /h)
Caudal máximo	3000	(m3 /h)
Velocidad ascensional a caudal de diseño	15	(m3/m2.h)
Velocidad de paso a caudal de diseño	65	(m3/m2.h)
Tiempo medio de residencia a caudal de diseño	15	minutos
Número de líneas	2	
Metros cúbicos de aire por metro cuadrado de superficie y hora	8	m3

Resultados de cálculo desarenador:

1. $Caudal\ de\ diseño\ por\ linea = 2400\ \frac{m^3}{h} \div 2 = 1200\ \frac{m^3}{h}$

2. $Caudal\ máximo\ por\ línea = 3000 \frac{m^3}{h} \div 2 = 1500\ \frac{m^3}{h}$

3. $Superficie\ Horizontal = 1200\ \frac{m^3}{h} \div 15\ \frac{m^3}{m^2.hora} = 80\ m^2$

4. $Sección\ transversal = 1200\ \frac{m^3}{h} \div 65\ \frac{m^3}{m^2.hora} = 18\ m^2$

5. $Volumen\ útil\ unitario = \frac{15\ min}{60\ min} \times 1200\ \frac{m^3}{h} = 300\ m^3$

6. $Longitud = 300m^3 \div 18\ m^2 = 16\ m$

8. $Profundidad\ útil = 300\ m^3 \div 80\ m^2 = 4\ m$

9. $Ancho = \frac{300m^2}{16m\ \times 4\ m} = 5m$

10. $Velocidad\ ascencional\ a\ caudal\ maximo = 1500\ \frac{m^3}{h} \div 80\ m^2 = 19\ \frac{m^3}{m^2.hora}$

11. $Velocidad\ de\ paso\ a\ caudal\ máximo =\ 1500\ \frac{m^3}{h}\ \div 18\ m^2 = 81\ \frac{m^3}{m^2.hora}$

12. $Tiempo\ de\ residencia\ a\ caudal\ máximo = \left(1500\ \frac{m^3}{h}\ \div 300\ m^3\right) \times 60$
$= 12\ min$

13. $Caudal\ total\ de\ aire\ necesario = 8m^3 \times 80\ m^2 \times 2 = 1280\ \frac{m^3}{h}$

Para el desarrollo de las diferentes alternativas fue necesario determinar el volumen total del reactor biológico a utilizar.

Cálculo de volumen del reactor: Los datos utilizados para el cálculo del volumen de reactor fueron los siguientes.

Parámetros de partida	
Caudal de diseño	2400 (m3/h)
Caudal máximo	3000 (m3/h)

Sólidos en suspensión en reactor (SSLM) (mg/l)	3000	(mg/l)
Relación de alimento / microorganismos	0,4	(Kg DBO Alimentados/dia)/ Kg SSLM en reactor)

Resultados de cálculo:

$$1.\ DBO\ (reactor\ biologico) = 2400\,\frac{m^3}{h} \times \frac{24\ h}{1\ día} \times \frac{237\frac{mg\ DBo}{l}}{1000} = 13649{,}14\,\frac{Kg\ DBO}{día}$$

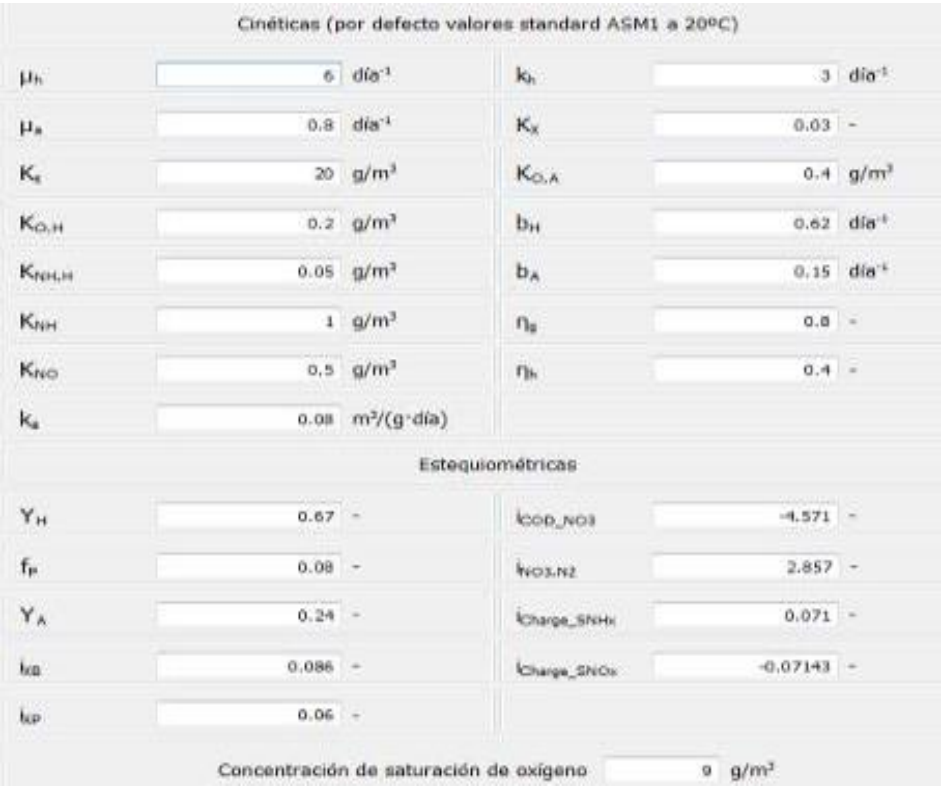
$$2.\ SSLM\ en\ el\ Reactor\ de\ fangos = \frac{13649{,}14\frac{Kg\ DBO}{día}}{0{,}4\frac{\frac{kg\ DBO}{día}}{Kg\ SSLM}} = 34122{,}85\ Kg\ SSLM$$

$$3.\ Volumen\ del\ Reactor = \frac{34122{,}85\ Kg\ SSLM}{3000\,\frac{mg}{l} \times 1000} = 11374{,}28\ m^3$$

4.2.2. Valores cinéticos y estequiométricos

Los parámetros cinéticos y estequiométricos usados en todas las alternativas desarrolladas, son los proporcionados por el software LYNX ASM1, y se muestran en la tabla 12.

Tabla 12
Parámetros de valores cinéticos y estequiométricos



Cinéticas (por defecto valores standard ASM1 a 20ºC)					
μ_H	6	$día^{-1}$	k_h	3	$día^{-1}$
μ_A	0.8	$día^{-1}$	K_X	0.03	-
K_S	20	g/m^3	$K_{O,A}$	0.4	g/m^3
$K_{O,H}$	0.2	g/m^3	b_H	0.62	$día^{-1}$
$K_{NH,H}$	0.05	g/m^3	b_A	0.15	$día^{-1}$
K_{NH}	1	g/m^3	η_g	0.8	-
K_{NO}	0.5	g/m^3	η_h	0.4	-
k_a	0.08	$m^3/(g \cdot día)$			
Estequiométricas					
Y_H	0.67	-	i_{COD_NO3}	-4.571	-
f_P	0.08	-	$i_{NO3.N2}$	2.857	-
Y_A	0.24	-	i_{Charge_SNHx}	0.071	-
i_{XB}	0.086	-	i_{Charge_SNOx}	-0.07143	-
i_{XP}	0.06	-			
Concentración de saturación de oxígeno	9	g/m^3			

Nota: Valores cinéticos estándar del modelo matemático ASM1. Tomado de "Software LYNX".

4.2.3. Alternativa 1

En la alternativa 1 se usó el esquema propuesto por Ludzack-Ettinger modificado, dicho proceso tiene dos líneas de tratamiento, línea de agua y línea de fangos.

En la línea de agua el caudal que ingresa se divide en dos partes iguales, la secuencia de tratamiento tiene dos zonas, un reactor anoxico en la zona 1 y 3, seguido de un reactor aerobio denominada la zona 2 y 4, luego del tratamiento anoxico y aerobio, tenemos una recirculación interna de las zonas aerobias hacia las zonas anóxicas, la línea de agua concluye con el proceso de decantación.

En la línea de fangos tenemos que el caudal de fangos se divide en dos, una parte se recircula hacia la cabecera de la planta y la otra se purga, el fango purgado continua el proceso de espesamiento del fango y luego una deshidratación. El agua que resulta de estos procesos es recirculada a la cabecera de la planta. A continuación, se presenta el esquema propuesto en el software LYNX ASM1.

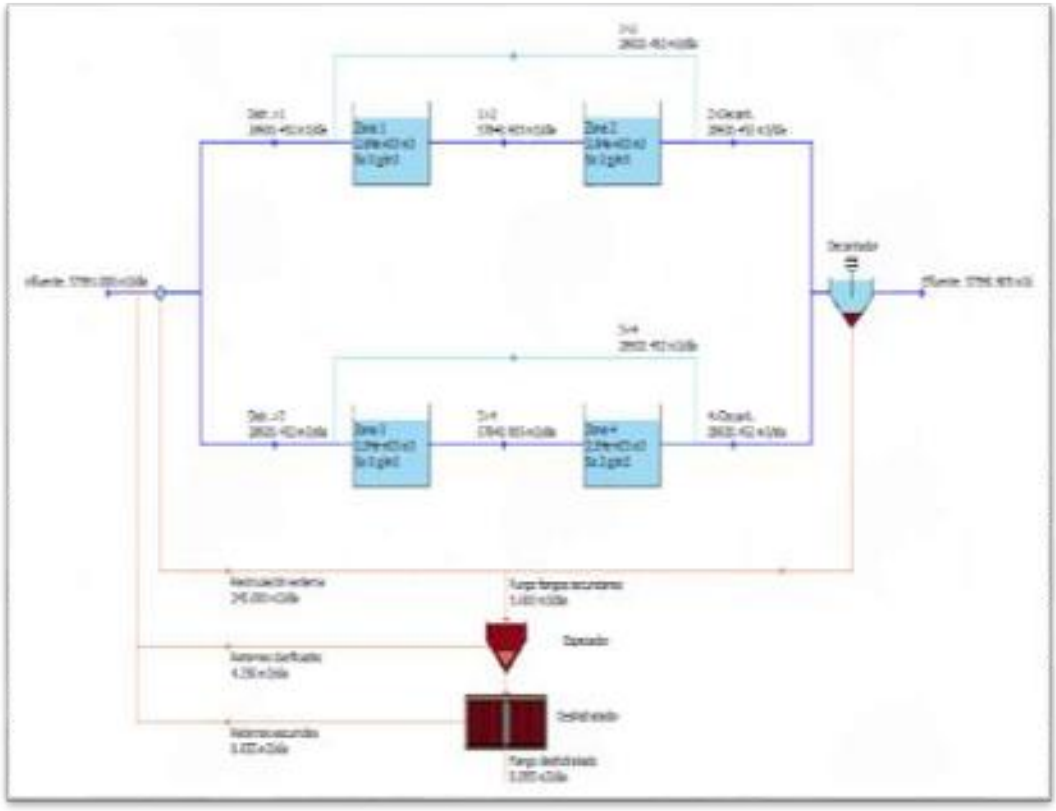
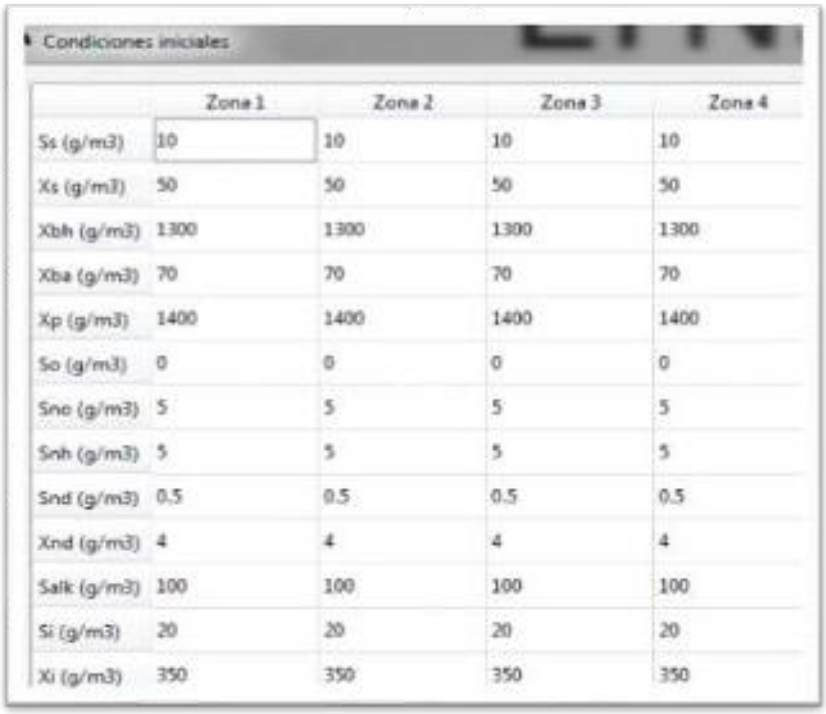


Figura 9. Esquema de Ludzack-Ettinger modificado.

El software de simulación necesita valores iniciales para su proceso de cálculo, a continuación, se presenta las condiciones iniciales de simulación en cada una de las zonas.

Tabla 13
Condiciones iniciales de simulación Ludzack-Ettinger modificado



Condiciones iniciales

	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Ss (g/m3)	10	10	10	10
Xs (g/m3)	50	50	50	50
Xbh (g/m3)	1300	1300	1300	1300
Xba (g/m3)	70	70	70	70
Xp (g/m3)	1400	1400	1400	1400
So (g/m3)	0	0	0	0
Sno (g/m3)	5	5	5	5
Snh (g/m3)	5	5	5	5
Snd (g/m3)	0.5	0.5	0.5	0.5
Xnd (g/m3)	4	4	4	4
Salk (g/m3)	100	100	100	100
Si (g/m3)	20	20	20	20
Xi (g/m3)	350	350	350	350

Nota: Valores de condiciones iniciales del software LYNX. Tomado de "Simulador LYNX ASM1 v2.6".

El valor propuesto como volumen total de los reactores biológicos es el calculado 11374,28 m^3, este se dividió según el esquema de Ludzack-Ettinger modificado, inicialmente en un 50% para la zona anóxica y 50% para la zona aerobia, se ha usado una relación de recirculación del 50 % (Ferrer et al., 2018), desde las zonas aerobias hacia las anóxicas. Los resultados de la configuración y de los valores propuestos se presentan en la tabla 14, descrita a continuación.

Tabla 14
Valores propuestos en la simulación

Volumen Reactor (m3)	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Caudal de recirculación de Nitratos %**	**Caudal de salida a decantador %**	**Caudal de recirculación de fangos (m3/día)**	**DQO (gr/m3)**	**S_{NH4} (gr/m3)**	**S_{NO} (gr/m3)**
11374.28	50	50	50	50	245	68.542	0,457	3,375

Nota: Porcentajes de tamaños en los tanques y recirculación de caudal de fangos al proceso.

Los valores de las concentraciones obtenidas tras la simulación, dan como resultado el cumplimiento de la normativa ambiental en los parámetros DQO, Nitrógeno Amoniacal, tras esta simulación se ha procedido a realizar el análisis de varios parámetros dentro de los reactores, con el enfoque de reducir el volumen de los reactores y el porcentaje del reactor aerobio, para la optimización del consumo energético por el aporte de oxígeno al proceso. En la siguiente gráfica se muestra la presencia de nitratos en la zona anóxica.

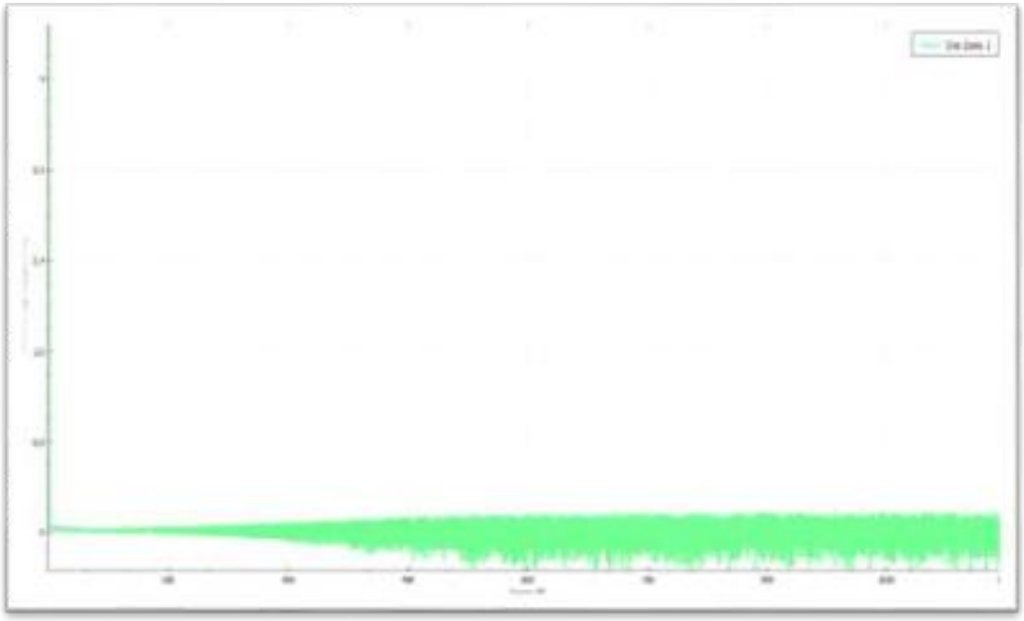


Figura 10. Nitrito y Nitrato en Zona Anóxica esquema de Ludzack-Ettinger modificado.

En las zonas 1 y 3 respectivamente anóxicas, reciben a través de la recirculación interna propuesta, los nitratos que se producen por el proceso de nitrificación en la zona 2 y 4, en esta zona se desarrollan bacterias heterótrofas, que crecen en condiciones de ausencia de oxígeno, utilizando nitratos como aceptadores de electrones, en la figura 10 se observó valores cercanos a cero de nitratos, esto se debe a que en estos reactores se da el proceso de desnitrificación, donde se reduce el nitrato a nitrógeno gas.

En la figura 11, se presenta el crecimiento de bacterias heterótrofas facultativas, pasando del valor de condición inicial de 1300 gr/m^3 a 4600 gr/m^3, esto se da porque las mismas que son capaces de reducir el nitrato, usándolo como aceptor de electrones. En esta reacción se da el consumo de materia orgánica, el cual se usa para los procesos celulares.

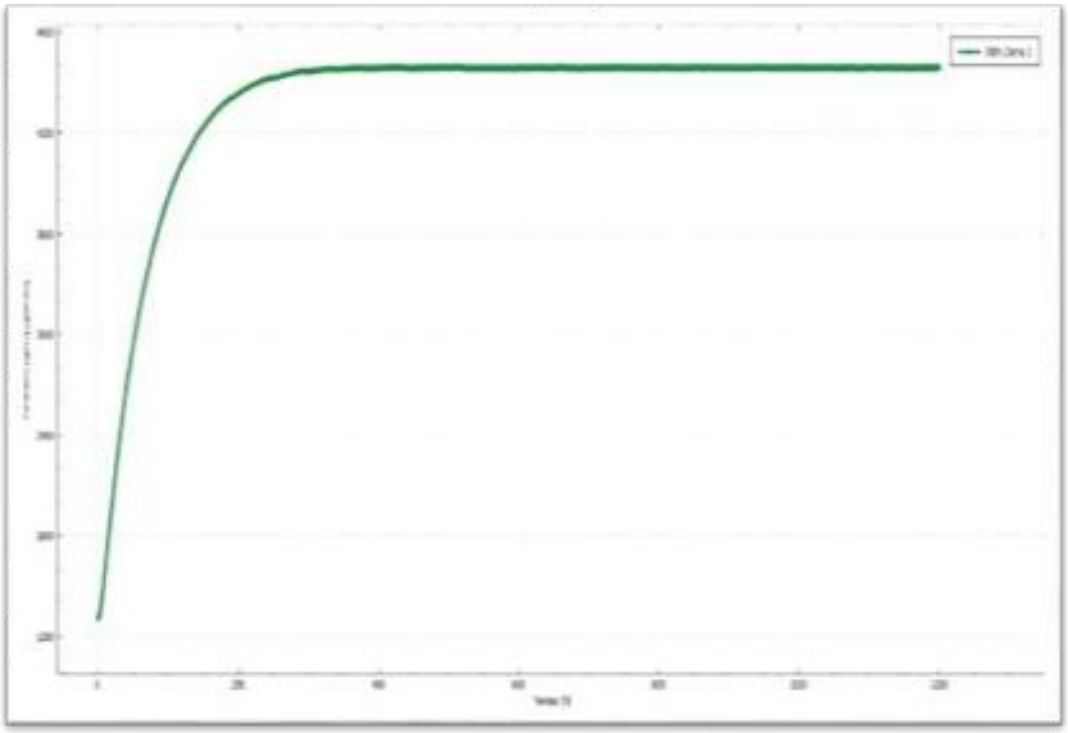


*Figura 11.*Bacterias Heterótrofas en zona Anóxica esquema Ludzack-Ettinger modificado.

En la zona Aerobia, se ha puesto como consigna el valor de 2 mg/l de oxígeno (Ferrer et al., 2018), el nitrógeno amoniacal se transforma a nitrato, esto se da por el proceso bioquímico de la nitrificación; en el que el nitrógeno amoniacal pasa a nitrato el mismo que es recirculado al reactor anoxico, en la figura 12 se muestra dicho consumo.

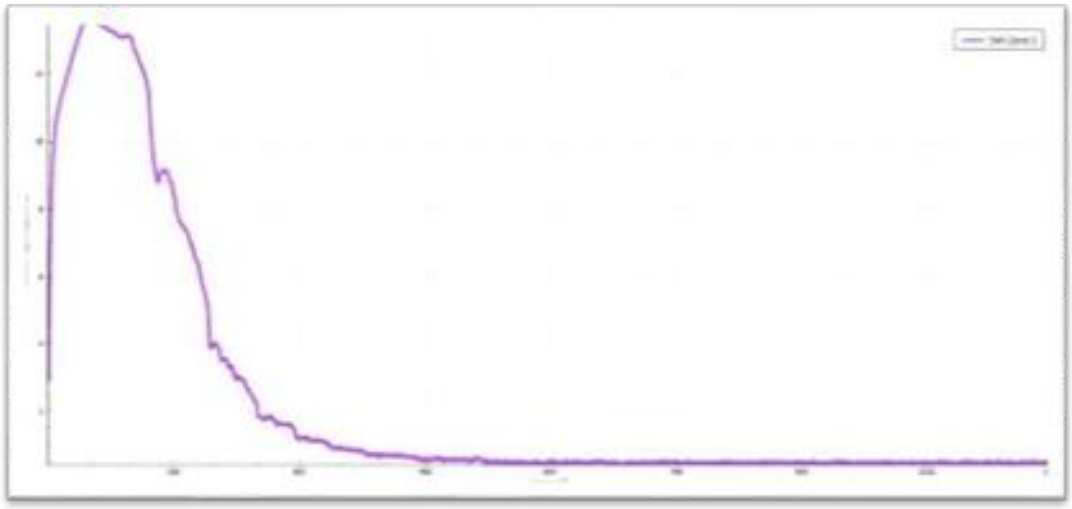


*Figure 12.*Nitrógeno amoniacal Zona Aerobia Ludzack-Ettinger modificado.

La figura 13, presenta el crecimiento de bacterias autótrofas, desde el valor en condiciones iniciales de 70 gr/m^3 a 170 gr/m^3, este crecimiento está directamente asociado al consumo de amonio y oxígeno.

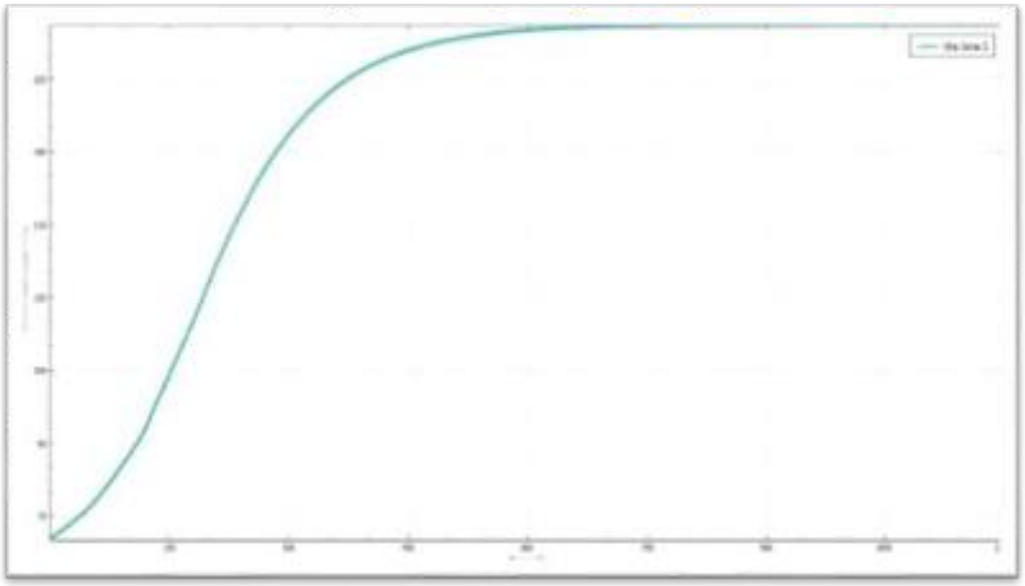


*Figura 13.*Bacterias Autótrofas zona aerobia Ludzack-Ettinger modificado.

Para la optimización del proceso, se propone inicialmente incrementar el valor de concentración de SSLM de 3000 mg/l propuesto anteriormente a 4000 mg/l, en el cálculo del

volumen para el reactor biológico, lo que nos da como resultado un menor volumen del reactor.

$$Volumen\ del\ Reactor = \frac{34122{,}85\ Kg\ SSLM}{4000\ \frac{mg}{l} \times 1000} = 8530{,}71\ m^3$$

Además de esta consideración, el objetivo es reducir el tamaño de la zona aerobia a través de la reducción del porcentaje asignado a este reactor.

Tabla 15
Valores para la optimización

Volumen Reactor (m3)	Anoxico %	Aerobio % So(2mg/l)	Caudal de recirculación de Nitratos %	Caudal de salida a decantador %	Caudal de recirculación de fangos (m3/día)	DQO (gr/m3)	S_{NH4} (gr/m3)	S_{NO} (gr/m3)
8531	60	40	50	50	245	72.55	37.22	0
8531	55	45	50	50	245	70.6	30,7	0
→8531	**55**	**45**	**50**	**50**	**260**	**71,3**	**29**	**0**

Nota: Reducción de tamaños de tanques (%) para optimizar el proceso.

De las simulaciones realizadas se obtiene que el volumen de 8531 m^3, con un porcentaje de 55% para la zona anóxica y 45 % para la zona aerobia, caudal de recirculación interna del 50 % y con un caudal de recirculación de fangos de 255 m^3/día, se cumple con el requerimiento de los límites máximos permisibles de descarga a un cuerpo de agua dulce.

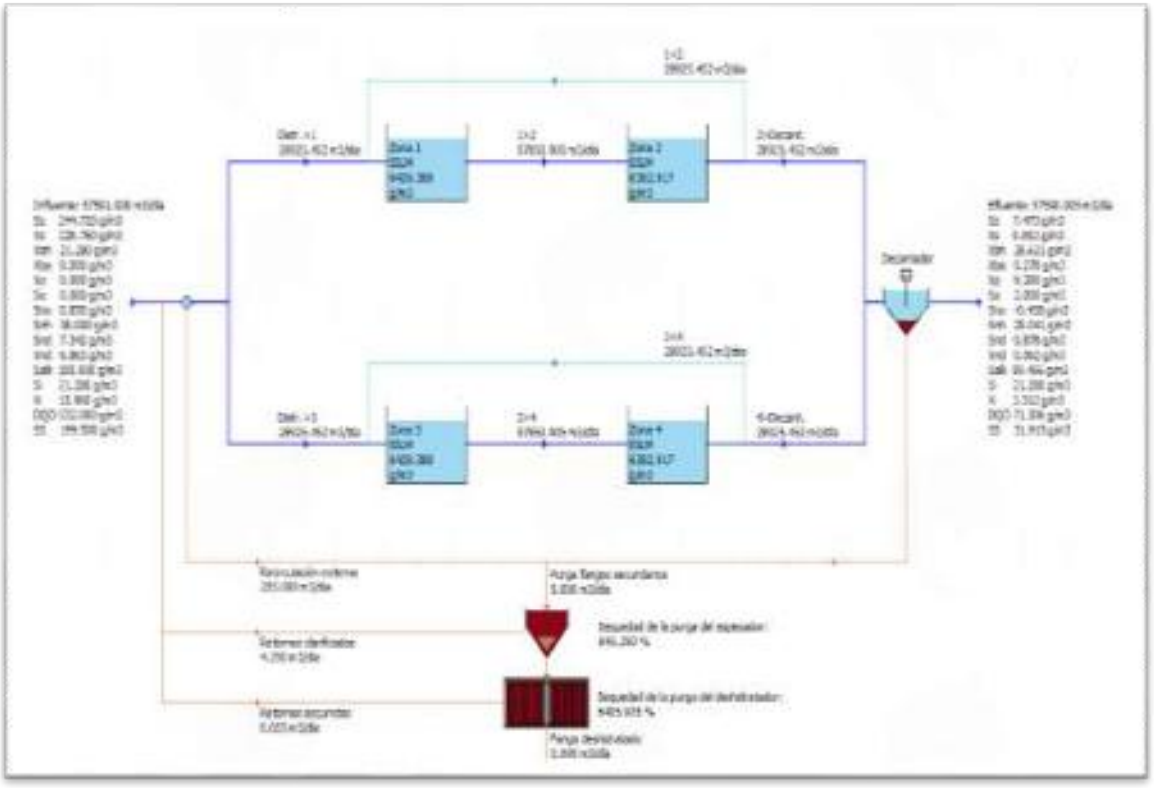


*Figura 14.*Resultado de optimización.

4.2.4. Alternativa 2

La segunda alternativa propuesta, se basa en el esquema de proceso Bardenpho. Para simular el mismo, se ha propuesto dos líneas de tratamiento, la línea de tratamiento de agua y la línea de fangos. El caudal de tratamiento a la entrada de la planta se ha dividido en dos partes iguales y continúan el tratamiento en la línea de agua, está conformada por cuatro zonas, el tratamiento empieza en las Zonas 1,5 anóxica, seguido de la Zona 2,6 aerobia, Zona 3,7 anóxica, Zona 4,8 aerobia, existe una recirculación interna desde las zonas 2,6 aerobia hacia la Zona 1,5. Luego de pasar por estas etapas, los caudales se reúnen para el proceso de decantación, donde se obtiene el agua clarificada y el fango.

El caudal de fangos que entra a la línea de tratamiento se divide, una parte se purga y la otra se recircula hacia la cabecera de la planta, el caudal purgado continua el proceso de espesamiento del fango y luego una deshidratación del mismo. El agua que resulta de estos

procesos es recirculada a la cabecera de la planta. A continuación, se presenta el esquema propuesto en el software LYNX ASM1.

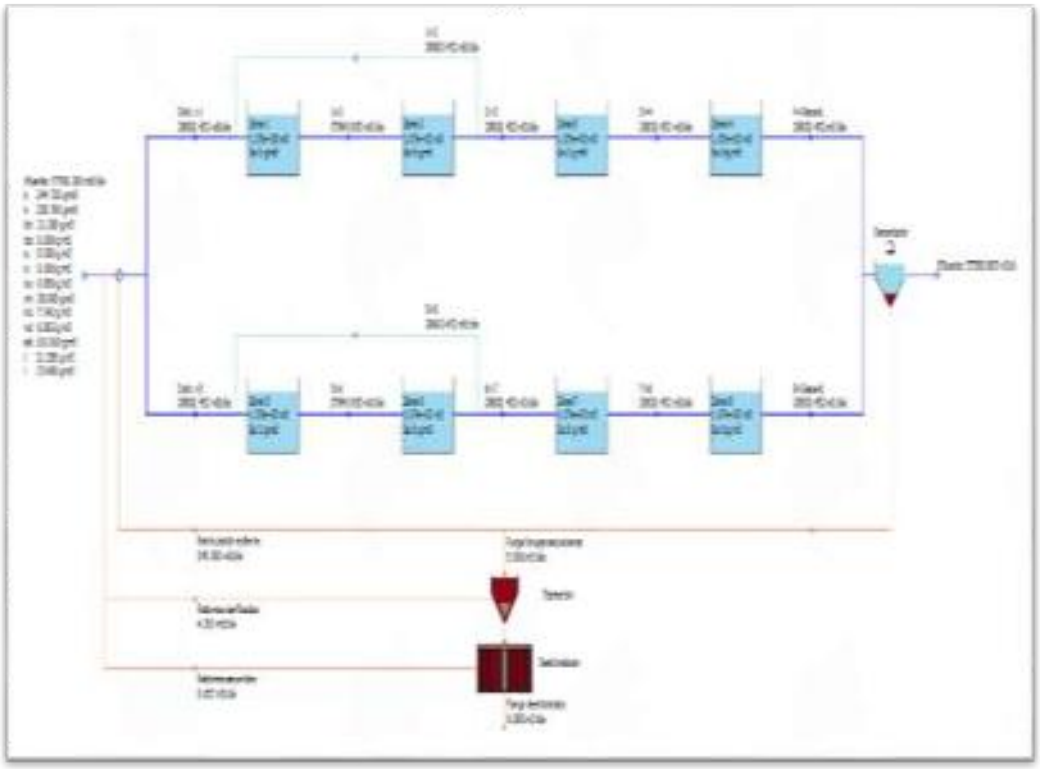
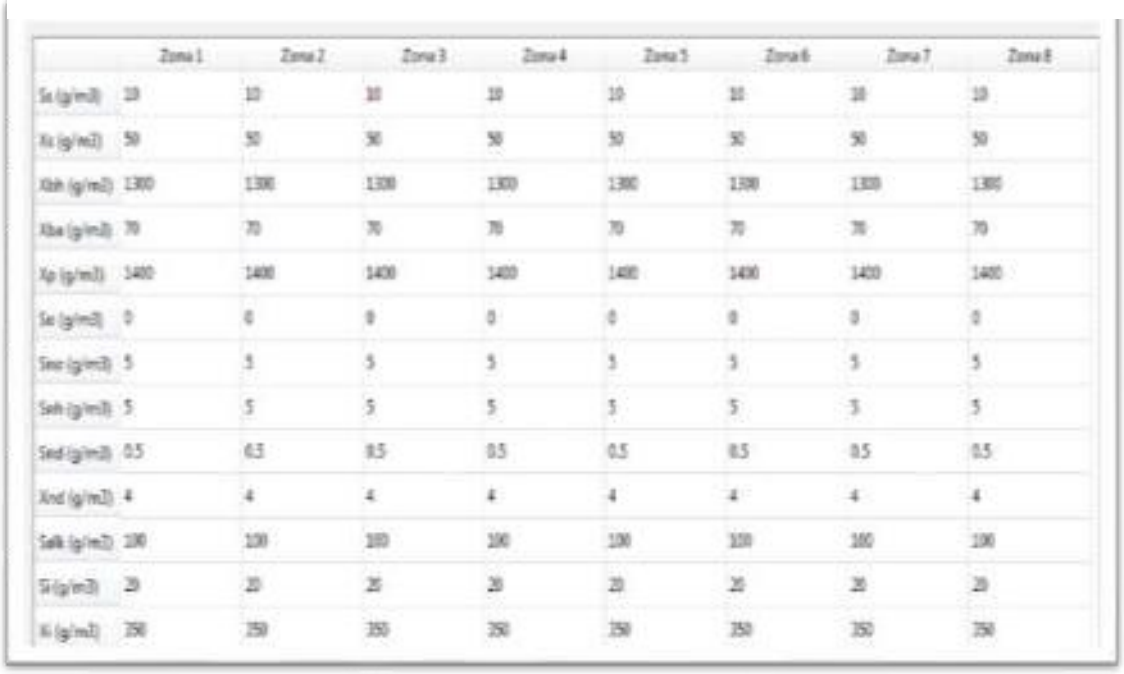


*Figura 15.*Esquema de proceso Bardenpho.

Los valores iniciales usados en el simulador para su proceso de cálculo se presentan a continuación, estos valores cambian con respecto al esquema anterior, puesto a que en este esquema se trabaja con más zonas y dos líneas de agua.

Tabla 16

Condiciones iniciales de simulación Bardenpho



	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4	Zona 5	Zona 6	Zona 7	Zona 8
Ss (g/m3)	10	10	10	10	10	10	10	10
Xs (g/m3)	50	50	50	50	50	50	50	50
Xbh (g/m3)	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Xba (g/m3)	70	70	70	70	70	70	70	70
Xp (g/m3)	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400
Si (g/m3)	0	0	0	0	0	0	0	0
Snox (g/m3)	5	5	5	5	5	5	5	5
Snh (g/m3)	5	5	5	5	5	5	5	5
Snd (g/m3)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Xnd (g/m3)	4	4	4	4	4	4	4	4
Salk (g/m3)	100	100	100	100	100	100	100	100
Si (g/m3)	20	20	20	20	20	20	20	20
Xi (g/m3)	350	350	350	350	350	350	350	350

Nota: Datos iniciales para las simulaciones propuesto en el modelo ASM1.Tomado de "Software LYNX".

El valor inicial de volumen para los reactores biológicos propuesto en las simulaciones es el calculado de 11374,28 m^3, el mismo se dividió en porcentajes para las diferentes zonas.

Zona 1 y Zona 5 Anoxico 20%	Zona 2 y Zona 6 Aerobio So (2mg/l) 30 %	Zona 3 y Zona 6 Anoxico 20%	Zona 4 y Zona 8 Aerobio So (2mg/l) 30%

La relación de recirculación es del 50 % (Ferrer et al., 2018), desde las zonas aerobias hacia las anóxicas. Los resultados de la configuración y de los valores propuestos se presentan en la tabla 17.

Tabla 17

Valores de configuración propuestos

Volumen Reactor (m3)	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Caudal de recirculación de Nitratos %**	**Caudal de recirculación de fangos (m3/día)**	**DQO (gr/m3)**	**S_{NH4} (gr/m3)**	**S_{NO} (gr/m3)**
11374	20	30	20	30	50	250	63	0	7

Nota: Los valores de DQO, S_{NH4}, S_{ON}, son los resultados de las simulaciones.

Los resultados tras las simulaciones, indican que las concentraciones luego del tratamiento propuesto cumplen con la normativa ambiental en los parámetros DQO, Nitrógeno Amoniacal. A continuación, se procedió al análisis de varios parámetros dentro de los reactores, con el fin de reducir el volumen de los reactores y el porcentaje de las zonas aerobios y de esta manera optimizar del consumo energético que se da por el aporte de oxígeno al proceso.

El aporte de oxigeno se realiza con el fin de asegurar el crecimiento de bacterias autótrofas y heterótrofas, que realicen la eliminación de materia orgánica y nutrientes. En el proceso de Nitrificación, se consume el nitrógeno amoniacal por parte de bacterias autótrofas nitrificantes y amonio oxidantes, lo cual da como resultado nitrato en el medio, en este proceso se consume oxígeno.

En la figura 16, se observa las curvas de evolución de los nitratos en las cuatro zonas de tratamiento. En la zona 1 y 3, se muestra muy poca presencia de nitratos, esto se debe a que en estas zonas ocurre el proceso de desnitrificación, en el que las bacterias heterótrofas consumen el nitrato y nitrito que sirven como como aceptadores de electrones dentro del proceso biológico y están presentes en la zona anóxica.

En las zonas 2 y 4, la mayor presencia de nitratos se da por la presencia de bacterias autótrofas que están haciendo el proceso de nitrificación, donde el nitrógeno amoniacal se transforma a nitratos.

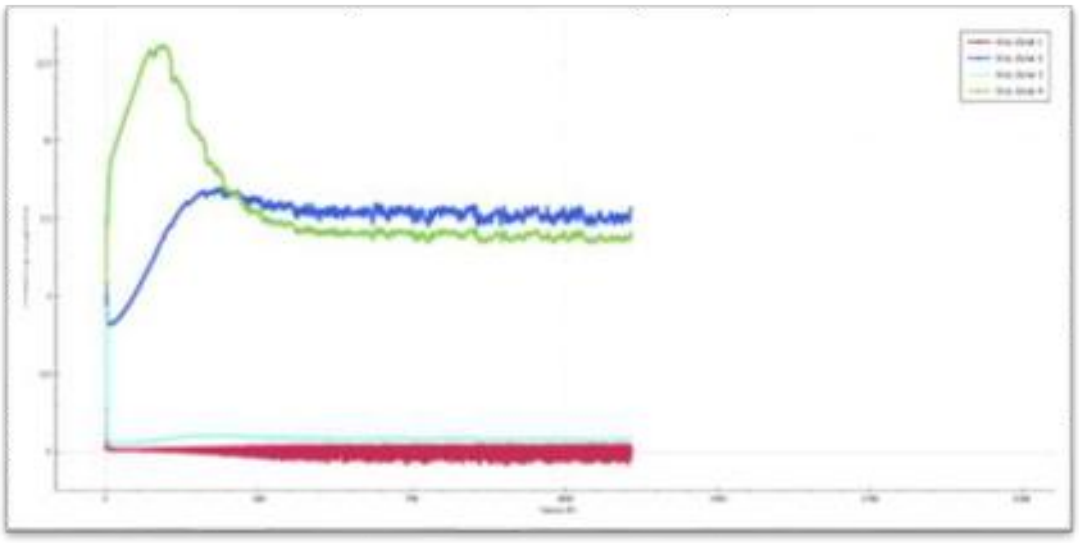


*Figure 16.*Presencia de nitratos en las zonas (1,2,3,4) de tratamiento Bardenpho.

En la figura 17 se observa la presencia de nitrógeno amoniacal en la Zona 1 anóxica, esta concentración se reduce en la Zona 2 Aerobia, esto se debe, a que la Zona 1 recibe la concentración inicial de nitrógeno amoniacal que llega a la EDAR y en esta zona anóxica por no existir la presencia de oxígeno no ocurre el proceso de nitrificación por parte de las bacterias autótrofas, por lo contrario en la Zona 2 si ocurre la nitrificación, donde se observa que existe un consumo de nitrógeno amoniacal.

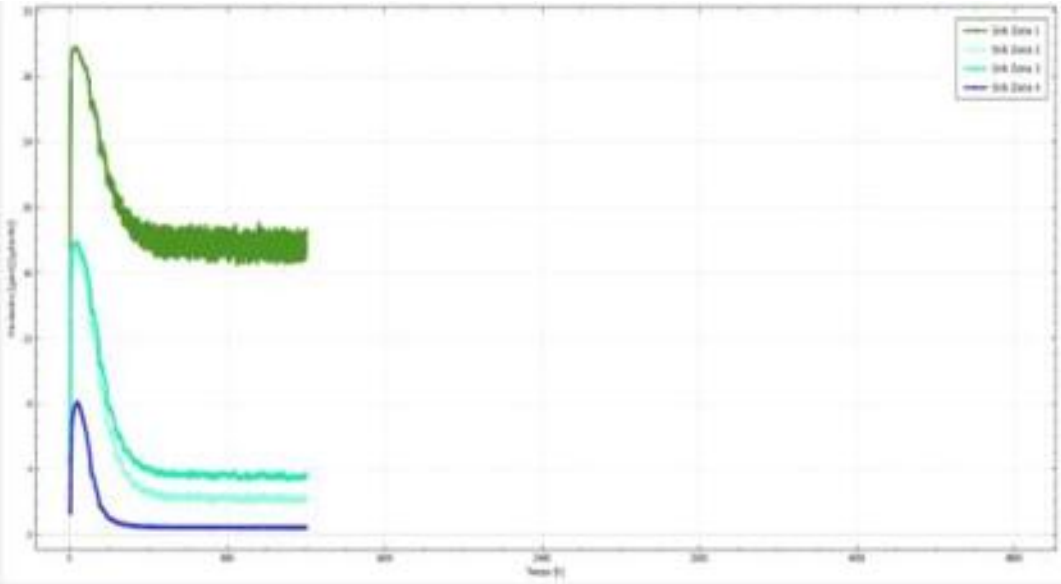


*Figure 17.*Presencia amonio en las zonas de tratamiento Bardenpho.

La optimización del proceso, va encaminada a la reducción del volumen total del reactor biológico y de las zonas aerobias, para reducir el aporte de oxígeno en la EDAR.

Se propone inicialmente incrementar el valor de concentración de SSLM de 3000 mg/l a 3500 mg/l y 4000 mg/l en el cálculo del volumen para el reactor biológico, lo que dará como resultado un menor volumen. Otra propuesta es la reducción en el porcentaje de las zonas aerobias.

$$Volumen\ del\ Reactor = \frac{34122{,}85\ Kg\ SSLM}{3500\ \frac{mg}{l} \times 1000} = 9749{,}39\ m^3$$

$$Volumen\ del\ Reactor = \frac{34122{,}85\ Kg\ SSLM}{4000\ \frac{mg}{l} \times 1000} = 8530{,}71\ m^3$$

Tabla 18
Simulaciones a diferente volumen de reactor

Volumen Reactor (m3)	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Caudal de recirculación de Nitratos %**	**Caudal de recirculación de fangos (m3/día)**	**DQO (gr/m3)**	**S_{NH4} (gr/m3)**	**S_{NO} (gr/m3)**
9749	20	30	20	30	50	250	65	1	11
→9749	**25**	**25**	**25**	**25**	**50**	**250**	**65**	**3.6**	**13**
8531	25	25	25	25	50	250	100	34	0
8531	20	30	20	30	50	250	121	33	0

Nota: El volumen de 8531m^3, no da los resultados esperados de $S_{NH4,}$ según la normativa.

Una vez realizadas las simulaciones, se obtuvo que la reducción del volumen a 9749 m^3 diseñado en base una concentración de SSLM de 3500 m/l y la reducción del porcentaje de las zonas aerobias de 30% a 25% con un total de zonas aerobias del 50% nos da como resultado el cumplimiento de la normativa ambiental.

4.2.5. Alternativa 3

El esquema A_2O, es la propuesta para la tercera alternativa, en esta alternativa se ha propuesto dos líneas de tratamiento, una línea de agua y una línea de fangos. Para la línea de agua se ha dividido el caudal de agua residual para su tratamiento en dos partes iguales, luego una serie de tres reactores en una secuencia de Zona Anaerobia, Zona Anóxica y Zona Aerobia, además posee una recirculación interna de la zona Aerobia a la zona anóxica, el tratamiento en la línea de agua termina con el proceso de decantación donde se separa el agua clarificada y los fangos.

En la línea de fangos, se ha propuesto una recirculación que se considera externa a la cabecera de la EDAR, parte del fango se recircula y otra se purga. Los fangos purgados van a los procesos de espesamiento y deshidratación de los mismos, el agua residual de estos procesos es recirculada para su tratamiento. A continuación, se presenta el esquema propuesto en el software LYNX ASM1.

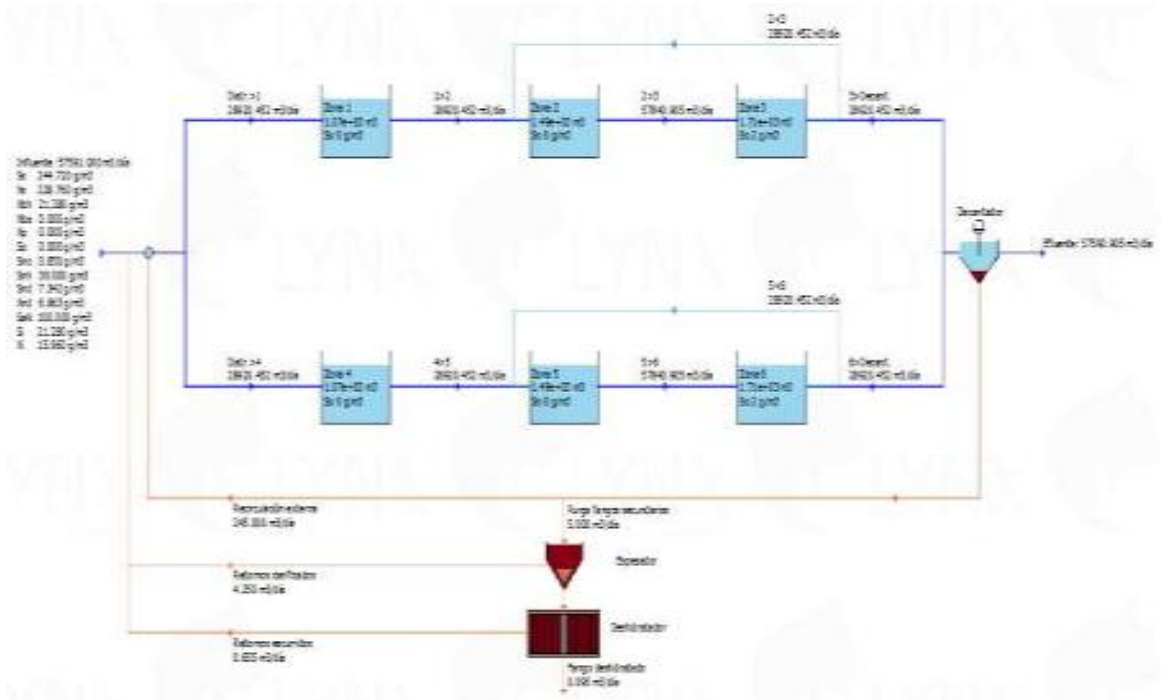


Figure 18. Esquema de proceso A2O.

Los valores iniciales usados en el simulador para su proceso de cálculo se presentan a continuación.

Tabla 19

Condiciones iniciales de simulación A2O

Xs (g/m3)	50	50	50	50	50	50
Xbh (g/m3)	1300	1300	1300	1300	1300	1300
Xba (g/m3)	70	70	70	70	70	70
Xp (g/m3)	1400	1400	1400	1400	1400	1400
So (g/m3)	0	0	0	0	0	0
Sno (g/m3)	5	5	5	5	5	5
Snh (g/m3)	5	5	5	5	5	5
Snd (g/m3)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Xnd (g/m3)	4	4	4	4	4	4
Salk (g/m3)	100	100	100	100	100	100
Si (g/m3)	20	20	20	20	20	20
Xi (g/m3)	250	250	250	250	250	250

Nota: Datos iniciales para las simulaciones propuesto en el modelo ASM1.Tomado de "Software LYNX".

El volumen total del reactor es de 11374,28 m^3, este cálculo se basa en el criterio de diseño de concentración de SSLM de 3000 mg/l. Los porcentajes en los que se ha divido inicialmente el volumen total del reactor biológico para las diferentes zonas es el siguiente:

Anaerobio %	Anoxico %	Aerobio % So(2mg/l)
20	30	50

La relación de recirculación es la máxima del 50 % (Ferrer et al., 2018), desde las zonas aerobias hacia las anóxicas. Los resultados de la configuración y de los valores propuestos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 20
Valores propuestos para las simulaciones

Volumen Reactor (m3)	**Anaerobio %**	**Anoxico %**	**Aerobio % So(2mg/l)**	**Caudal de recirculación de Nitratos %**	**Caudal de recirculación de fangos (m3/día)**	**DQO (gr/m3)**	**S_{NH4} (gr/m3)**	**S_{NO} (gr/m3)**
11374	20	30	50	50	250	64	3	0

Nota: Estos valores iniciales cumplen con lo expuesto en la normativa, dentro de las simulaciones.

Tras las simulaciones, los resultados indican que las concentraciones luego del tratamiento propuesto cumplen con los límites máximos permisibles, los cuales son permitidos para un cuerpo de agua dulce en los parámetros DQO, Nitrógeno Amoniacal. A continuación, el análisis se centró en reducir el volumen de los reactores y el porcentaje de las zonas aerobios, y de esta manera optimizar del consumo energético que se da por el aporte de oxígeno al proceso.

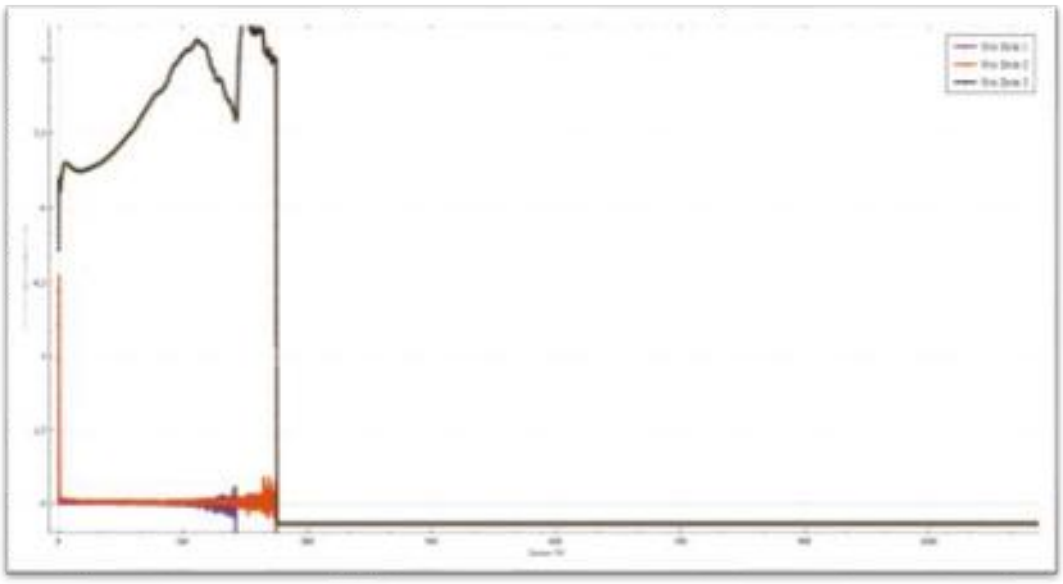


*Figure 19.*Presencia de nitratos en las zonas de tratamiento A2O.

En la figura 20 se muestra los nitratos en las distintas zonas de tratamiento. Las condiciones iniciales propuestas para los nitratos son de 5 gr/m^3; en la Zona 1, luego de las simulaciones se observa que no existe la presencia de nitratos, esto se debe a que no hay un aporte de nitratos del agua residual que ingresa en tratamiento, el simulador considera que los nitratos se generan luego del proceso de nitrificación en este caso. La inexistencia de nitratos en la zona 2, se debe a que esta zona es Anóxica y está diseñada específicamente para el consumo de nitratos mediante el proceso de desnitrificación. En la zona 3, la concentración de nitratos es mayor debido a que esta zona es de tipo aerobia y ocurre el proceso de nitrificación generándose nitratos.

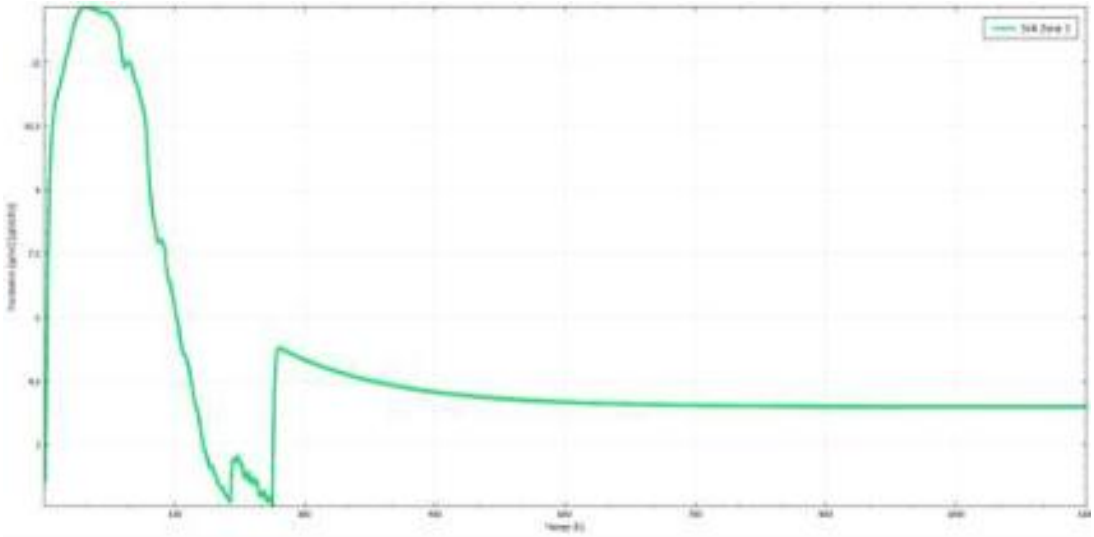


Figure 20. Presencia de Nitrógeno amoniacal en la Zona 3 - A2O.

El nitrógeno amoniacal presentado en la figura 21 de la zona aerobia, muestra un consumo del mismo, esto es inversamente proporcional al crecimiento de las bacterias autótrofas, las cuales se muestra en la figura 22. Esto se debe al proceso de nitrificación, en el que se consume el nitrógeno amoniacal por parte de las bacterias autótrofas amonio oxidante y nitrito oxidante.

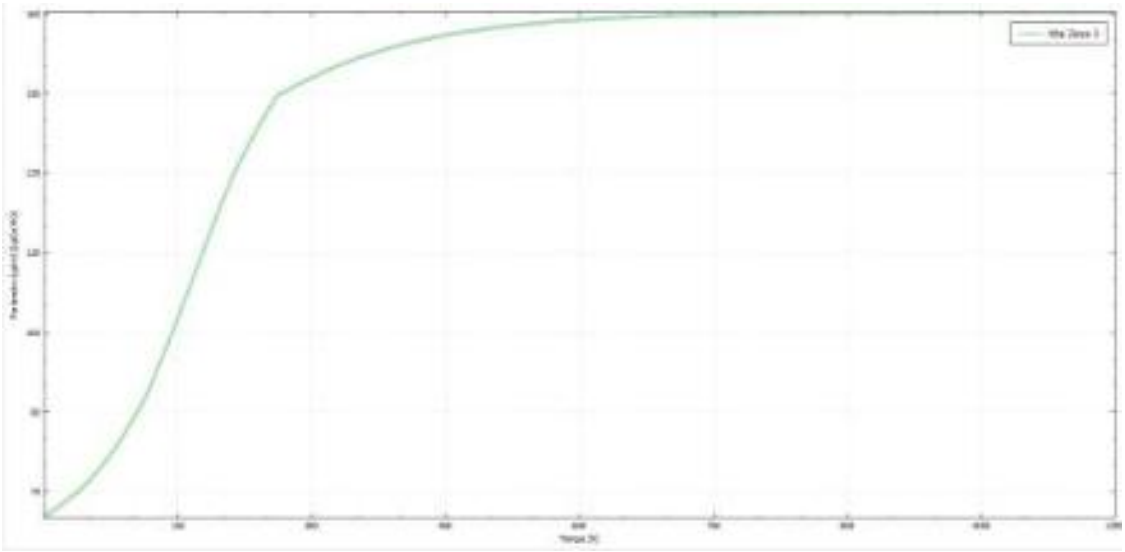


Figure 21. Bacterias Autótrofas en la zona 3 aerobia A2O.

El cumplimiento de la normativa ambiental no indica que el proceso de tratamiento sea el óptimo, por lo que a continuación se presenta resultados de simulaciones con el objetivo de reducir del volumen total del reactor biológico y de las zonas aerobias para reducir el aporte de oxígeno en la EDAR.

El incremento en el criterio de diseño de la concentración de SSLM de 3000 mg/l a 3500 mg/l y 4000 mg/l en el cálculo del volumen para el reactor biológico, lo que dará como resultado un menor volumen. Además, se propone la reducción en el porcentaje de las zonas aerobias.

$$Volumen\ del\ Reactor = \frac{34122{,}85\ Kg\ SSLM}{4000\ \frac{mg}{l} \times 1000} = 8530{,}71\ m^3$$

Tabla 21
Valores propuestos para la optimización

Volumen Reactor (m3)	Anaerobio %	Anoxico %	Aerobio % So(2mg/l)	Caudal de recirculación de Nitratos %	Caudal de recirculación de fangos (m3/día)	DQO (gr/m3)	S_{NH4} (gr/m3)	S_{NO} (gr/m3)
→8531	**20**	**30**	**50**	**50**	**250**	**68**	**12**	**0**
8531	25	35	40	50	250	72	37	0

Nota: La reducción del porcentaje de las zonas aerobias no da resultados positivos y se mantiene el 50 % como zona aerobia.

Las simulaciones realizadas dan con resultado que la reducción del volumen a 8531 m^3 diseñado en base una concentración de SSLM de 3500 m/l son favorables y se cumple con la normativa ambiental.

4.3. Resultado objetivo 3. Seleccionar la mejor alternativa de las configuraciones propuestas, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi Ecuador.

El cumplimiento de este objetivo se realiza a través del análisis de tres parámetros: volumen del reactor, este parámetro se selecciona por el costo necesario para implementar la EDAR a mayor volumen mayor inversión; otro parámetro es el porcentaje del reactor biológico que se establece como zona aerobia, este indicador se ha seleccionado, ya que, el aporte de

oxígeno es el rubro más importante en la operación de la EDAR, a mayor porcentaje mayor aporte de oxígeno, además de estos parámetros se ha considerado el cumplimiento de la normativa ambiental.

En la tabla 22 se presenta el resumen de las alternativas, el volumen del esquema Bardenpho es el mayor por lo que esta alternativa es descartada. La Alternativa 1 y 3 tienen el mismo volumen del reactor 8531 m^3, el esquema Ludzack-Ettinger modificado presenta el menor porcentaje 45 % de zona aerobia comparado con la alternativa A_2O.

Tabla 22
Resumen de Volumen y % Aerobio de las alternativas

Alternativa	Volumen Reactor (m3)	Secuencia de tratamiento				% Total Aerobio
1. Ludzack-Ettinger modificado	8531	Anoxico % 55	Aerobio % 45			45
2.Bardenpho	9749	Anoxico % 25	Aerobio % 25	Anoxico % 25	Aerobio % 25	50
3. A_2O	8531	Anaerobio % 20	Anoxico % 30	Aerobio % 50		50

En la tabla 23 se muestra una comparativa de normativa ambiental, si bien expone el cumplimiento de la normativa ambiental de todas las alternativas, se observa que la alternativa 1 de Ludzack-Ettinger modificado, en el parámetro de nitrógeno amoniacal está al borde del cumplimiento de la norma con 29 gr/m^3, siendo el valor máximo de la normativa 30 gr/m^3.

Tabla 23
Comparativo cumplimiento normativo ambiental

Alternativa	DQO (gr/m3)	S_{NH4} (gr/m3)	S_{NO} (gr/m3)
1. Ludzack-Ettinger modificado	71,3	29	0
2.Bardenpho	65	3.6	13
3. A_2O	68	12	0

Nota: La mejor alternativa está relacionada con el cumplimiento de la normativa ambiental, en relación a S_{NH4}.

El análisis nos indica que la alternativa 3 del esquema A_2O con un volumen 8531 m^3 y una secuencia de zonas anaerobia con 20%, anóxica 30% y aerobia 50% es la mejor opción, ya que, la alternativa 1 está al borde del cumplimiento de la normativa y se debe tener un resguardo, ante la posibilidad de variaciones en las concentraciones de los parámetros del agua residual a tratar. Este esquema, además, favorece el crecimiento de bacterias PAO, las cuales necesitan de condiciones anaerobias, aerobias para su desarrollo, con lo cual también se conseguiría una eliminación biológica de fósforo.

4.4. Conclusiones

- La tasa de crecimiento según el método geométrico es de R=1,5% y según el método aritmético Ka=2878,2 hab/año, el diseño de la EDAR se proyecta para el año 2040 es decir un periodo de diseño de 20 años, según el método geométrico la población para el 2040 es de 278.004 hab.
- El caudal potabilizado por el GAD de Latacunga corresponde a 510 l/s entregado en 80000 predios a 205.624 habitantes, el caudal de dotación calculado es de 214 l/hab. día.
- El caudal de diseño de la EDAR es de 57591,3 m^3/día que se componte de un aporte industrial de 9931,68 m^3/día.
- El pretratamiento se compone de un pozo de gruesos y un desarenador aireado, este pretratamiento esta propuesto para las 3 Alternativas.
- Las 3 Alternativas 1. Ludzack-Ettinger modificado, 2. Bardenpho 3. A_2O cumplen con los límites de vertido en un cuerpo de agua dulce. La alternativa 3 con un volumen 8531 m^3 y una secuencia de zonas anaerobia con 20%, anóxica 30% y aerobia 50% se concluye que es la mejor opción del análisis realizado, además, esta configuración favorece el crecimiento de las baterías PAO, con lo cual se contribuiría a la eliminación de fosforo del agua residual.

4.5. Recomendaciones

- Se recomienda realizar una caracterización del agua residual con muestreos compuestos para contrastar lo propuesto según la bibliografía.

- Se recomienda que el Gobierno Autónomo Descentralizado de Latacunga construya primero el sistema de colectores de aguas residuales de la ciudad para determinar los caudales necesarios para el diseño.
- Se recomienda que el Gobierno Autónomo Descentralizado de Latacunga ordene el análisis de laboratorio para determinar las cinéticas de crecimiento de los microorganismos y constantes estequiométricas necesarias para el uso de software de diseño de EDAR
- Se recomienda hacer el uso de un Software con un modelo matemático ASM2 que incluya la simulación de nutriente fósforo.

4.6. Referencias

Ali, M., & Okabe, S. (2015). Anammox-based technologies for nitrogen removal: Advances in process start-up and remaining issues. *Chemosphere*, *141*, 144–153. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.094

Norma Mexicana, Pub. L. No. AA-034, Diario Oficial de la Federación 16 (2015). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/166146/nmx-aa-034-scfi-2015.pdf

Alvarez Lorena. (2013). *El Universo*. Se Solicitan Acciones Para Descontaminar El Río Cutuchi. https://www.eluniverso.com/noticias/2013/10/14/nota/1581496/se-solicitan-acciones-descontaminar-rio-cutuchi

Arellano, A., Bayas, A., Meneses, A., & Castillo, T. (2018, December). Los consumos y las dotaciones de agua potable en poblaciones ecuatorianas con menos de 150 000 habitantes. *Vol.1*, *1*(1), 23–32. https://doi.org/doi.org/10.37135/unach.ns.001.01.03

Banayan Esfahani, E., Asadi Zeidabadi, F., Bazargan, A., & McKay, G. (2019). The Modified Bardenpho Process. *Handbook of Environmental Materials Management*, *July 2018*, 1551–1592. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73645-7_87

Barcelo, D., & Lopez de Alda, M. J. (2010). Contaminación y calidad química del agua: el problema de los contaminantes emergentes. In *Retinal Cases and Brief Reports* (Vol. 4, Issue 2). https://doi.org/10.1097/ICB.0b013e3181ad3957

Barnard, J. L. (2014). Biological Nutrient Removal: Where we have been, Where we are going? *Proceedings of the Water Environment Federation*, *2006*(13), 1–25. https://doi.org/10.2175/193864706783710578

Bofill Mas, S., Casares, P., Giménez, N., Maluquer de Motes Porta, C., & Hundesa Gonfa,

A. G. L. R. (2005). *EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LA CONTAMINACIÓN DE AGUA Y ALIMENTOS POR VIRUS EMERGENTES HUMANOS*. *79*(Colaboracion Especial), 17.

Bokova, I., & Ryder, G. (2017). Aguas Residuales el Recurso Desaprovechado, Naciones Unidas. In *El Abreguense* (Vol. 3). http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf

Bolong, N., Ismail, A. F., Salim, M. R., & Matsuura, T. (2009). A review of the effects of emerging contaminants in wastewater and options for their removal. *DES*, *239*(1–3), 229–246. https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.03.020

Cape, J. N., Cornell, S. E., Jickells, T. D., & Nemitz, E. (2011). Organic nitrogen in the atmosphere - Where does it come from? A review of sources and methods. *Atmospheric Research*, *102*(1–2), 30–48. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.07.009

Cárdenas, G. L., & Sánchez, I. A. (2013). Nitrogen in wastewater: origins, effects and removal mechanisms to preserve the environment and public health. *Universidad y Salud*, *15*(1), 72–88. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-71072013000100007&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Castro Cardenas, A., Olivares, M., & Rozo, O. (2019). *Evaluación del Sistema de Lavado de los Desarenadores Convencional y Dufour Mediante el Cálculo de Volumen Muerto a Través de Modelos Hidráulicos* (Issue 5). Universidad Cooperativa de Colombia.

Chamorro, A. J. (2014). Consideraciones sobre la evaluación del servicio de mantenimiento y conservación de una EDAR. *Deliberation about Maintenance and Conservation Service in a WWTP*, *7*, 6.

Chang, M., Wang, Y., Pan, Y., Zhang, K., Lyu, L., Wang, M., & Zhu, T. (2019). Nitrogen removal from wastewater via simultaneous nitrification and denitrification using a biological folded non-aerated filter. *Bioresource Technology*, *289*(April), 8. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121696

Clar, A., & Mendoza Roca, J. (2017). *DISEÑO DEL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE FANGOS ACTIVOS PARA LA ELIMINACIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES PARA UNA POBLACIÓN DE 60 000 HABITANTES EQUIVALENTES*. Universitat Politècnica de València.

Claros Bedoya, J. A. (2012). ESTUDIO DEL PROCESO DE NITRIFICACIÓN Y DESNITRIFICACIÓN VÍA NITRITO PARA EL TRATAMIENTO BIOLÓGICO DE CORRIENTES DE AGUA RESIDUAL CON ALTA CARGA DE NITRÓGENO AMONIACAL [Universitat Politècnica de València]. In *Riunet*. https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/17653

Comisión Nacional del Agua Mexico. (2007). Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*, *35*(978-968–5), 1–242. www.conagua.gob.mx

Contreras, E., & Rojas, G. (2014). *Folleto Informativo pH*.

Cruz, F. (2014). *Abastecimiento de Aguas: Tratamientos iniciales de Potabilizacion*. http://andreitapatino.blogspot.com.es/ 2012_03_01_archive

Cuenca Haro, L. (2018). *Diseño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Parroquia Tingo la Esperanza, ubicada en el Cantón Pujilí, Provincia de Cotopaxi*. Universidad Central del Ecuador.

Cui, B., Yang, Q., Zhang, Y., Liu, X., Wu, W., & Li, J. (2019). Improving nitrogen removal

in biological aeration filter for domestic sewage treatment via adjusting microbial community structure. *Bioresource Technology*, *293*(April), 122006. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122006

Dorofeev, A. G., Nikolaev, Y. A., Mardanov, A. V., & Pimenov, N. V. (2020). Role of Phosphate-Accumulating Bacteria in Biological Phosphorus Removal from Wastewater. *Applied Biochemistry and Microbiology*, *56*(1), 1–14. https://doi.org/10.1134/S0003683820010056

Ferrer, J., Seco, A., & Robles, A. (2018). *Tratamientos biológicos de aguas residuales* (J. Ferrer, A. Seco, & A. Robles (eds.); Tercera ed). Universitat Politècnica de València.

Ferrer Polo, Jose; Torecillas, A. (2019). TRATAMIENTOS BIOLOGICOS DE AGUAS RESIDUALES. In *Hilos Tensados* (Vol. 1, Issue). https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Fuhs, G. W., & Chen, M. (1975). Microbiological basis of phosphate removal in the activated sludge process for the treatment of wastewater. *Microbial Ecology*, *2*(2), 119–138. https://doi.org/10.1007/BF02010434

Garcia Corchero, D. (2015). *INVESTIGACIÓN SOBRE LA APLICACIÓN DE ENERGIA SOLAR A UNA DEPURADORA CONVENCIONAL DE FANGOS ACTIVOS*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID.

García, M. E., & Pérez, J. . (2015). *Aguas Residuales Composición*.

Garcia Trisolin, E. (2009). *MANUAL DE PROYECTOS DE AGUA POTABLE EN POBLACIONES RURALES*.

Gerber, A., & Winter, C. T. (1985). The influence of extended anaerobic retention time on

the performance of Phoredox nutrient removal plants. *Water Science and Technology*, *17*(2-3–3 pt 1), 81–92. https://doi.org/10.2166/wst.1985.0121

Granados, M. del P. (1987). *TECNICAS DE PROYECCIONES DE POBLACION DE AREAS MENORES. Aplicacion y Evaluacion*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/32594/D-13118.00_es.pdf?sequence=1

Holmes, D. E., Dang, Y., & Smith, J. A. (2019). Nitrogen cycling during wastewater treatment. In *Advances in Applied Microbiology* (1st ed., Vol. 106). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.10.003

Howard, G., Bartram, J., Manager, P., Water Engineering and Development Centre Loughborough University, U., & World Health Organization. (2003). *Organizacion Mundial de la Salud*. World Health Organization. https://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/WSH03.02.pdf?ua=1

IDEAM. (2011). FICHA TÉCNICA Sistema de Información del Medio Ambiente. In *Subdirección de Hidrología, Grupo Laboratorio de Calidad Ambiental. Subsistema de Información Módulo Fisicoquímico Ambiental –MFQA- de la base de datos Oracle*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/Fosforos_totales_13.pdf

Instruments, H. (1905). *Demanda química de oxígeno y materia orgánica 1* (Issue 5411). www.hannaarg.com

Izquieta Rojano, S., & Elustondo, D. (2017). Importancia de la deposición de nitrógeno orgánico en el ciclo del N a nivel global. *Ecosistemas*, *26*(1), 7–15. https://doi.org/10.7818/ECOS.2017.26-1.03

Jaafari, J., Javid, A. B., Barzanouni, H., Younesi, A., Farahani, N. A. A., Mosazadeh, M., & Soleimani, P. (2019). Performance of modified one-stage phoredox reactor with hydraulic up-flow in biological removal of phosphorus from municipal wastewater. *Desalination and Water Treatment*, *171*, 216–222. https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24752

Jimenez, D. (2010). Modelacion matematica del proceso de nitrificacion en dos etapas. Desarrollo de metodologias de calibracion del modelo para un reactor SHARON y un proceso de fangos activados. *Riunet*, 331. https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/8499

Knobelsdorf Miranda, J. M. (2005). *Eliminación biológica de nutrientes en un ARU de baja carga orgánica mediante el proceso VIP* [Universitat Politècnica de Catalunya]. https://doi.org/8468934801

Liwarska-Bizukojc, E., Olejnik, D., Biernacki, R., & Ledakowicz, S. (2011). Calibration of a complex activated sludge model for the full-scale wastewater treatment plant. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, *34*(6), 659–670. https://doi.org/10.1007/s00449-011-0515-1

López, C., Buitrón, G., García, H., & Cervantes, F. (2001). Tratamiento biologico de aguas residuales. In C. López, G. Buitrón, H. García, & F. Cervantes (Eds.), *Ingenieria Quimica* (Vol. 33, Issue 377). IWA PUBLISHING. https://doi.org/10.17345/9788484241027

Lopez, J., Jacome, A., & Ures, P. (2014). *FICHAS TÉCNICAS DE ETAPAS DE PROCESO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE LA INDUSTRIA TEXTIL*. https://www.wateractionplan.com/documents/177327/558161/Sistemas+de+Desbaste.pdf/90eca02d-49f5-aa12-718f-40ffd6eaa262

Lozano, W. A. (2012). *Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales* (Issue March). ResearchGate. https://www.researchgate.net/publication/298354134_Diseno_de_Plantas_de_Tratamiento_de_Aguas_Residuales

Ministerio de Ambiente. (2015). Registro Oficial Edición Especial 387, Acuerdo Ministerial 097-A. *Secretaría Nacional Del Agua*, 1–7. http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu155128.pdf

Nitrógeno total Kjeldahl. (2020). *Wikipedia, La enciclopedia libre*.

INEN, Pub. L. No. 9-1:1992, 35 (2003).

Ortega de Miguel, E., Ferrer Medina, Y., Aragón Cruz, C., & Real Jiménez, Á. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. In E. Ortega de Miguel, Y. Ferrer Medina, C. Aragón Cruz, & Á. Real Jiménez (Eds.), *Manual de depuración de aguas residuales urbanas - Alianza por el Agua* (p. 264). Hispagua Sistema Español de Información sobre el Agua. https://doi.org/Z-2802/08

Osorio, S. (2019, March 23). Aguas servidas, mayor problema de Latacunga. *El Telégrafo*. https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional/1/aguas-servidas-problema-latacunga

Peña Popoca, R. E. (2010). *IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA Y NUTRIENTES EN AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES*. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Pérez Figueroa, S. (2017). *Optimización De La Eliminación Biológica De Nitrogeno (Bnr) En Un Proceso Bardenpho Modificado Mediante Un Controlador De Aireación Basado En Sonda De Amonio (Abac)*. Universitat Politècnica de València.

Pérez, L. (2013). *TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS PARA LA ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO Y MATERIA ORGÁNICA MEDIANTE UN SISTEMA SBR.* UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

Pittenger, D. B. (1976). *Projecting State and Local Populations* (D. B. Pittenger (ed.); Slight Moi). https://www.amazon.com/Projecting-State-Populations-Donald-Pittenger/dp/0884103560

PNUD. (2010). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html

Pulido Velázquez, M. A., & Rey, H. (2018). *Aula Bioindicacion Gonzalo Cuesta-Universidad Politecnica de Valencia*. Curso Práctico de Modelados y Simulación En EDAR, ASM1. http://aulabioindicacion.com/curso-practico-de-modelado-y-simulacion-en-edar-asm1/

Ramalho, R. S. (1996). *Introduction to Wasterwater Treatment Processes* (Second Edi). Editorial Reverte S.A. https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=30etGjzPXywC&oi=fnd&pg=PA1&dq=aguas+residuales+domésticas&ots=OCyfDVkBqb&sig=-He9li-YhzFJiwf0M1Rw8wxw7Iw#v=onepage&q=DQO&f=false

Ren, Y., Hao Ngo, H., Guo, W., Wang, D., Peng, L., Ni, B. J., Wei, W., & Liu, Y. (2020). New perspectives on microbial communities and biological nitrogen removal processes in wastewater treatment systems. *Bioresource Technology*, *297*, 122491. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122491

Rey, H., Martinez, M., & Zornoza, A. (2017). *Software Lynx ASM1 para modelado y simulación de EDAR*. (2,5). Lynx Simulations; Universitat Politècnica de València. www.lynxsimulations.com

Rodríguez, C., Bojaca, R., & Duque, M. (2007). *Nitrogeno total en agua por el método Semi-Micro Kjeldhl – Electrodo De Amoniaco*. http://www.ideam.gov.co/

Rodriguez, C., Coy, A. G., & Duque, M. E. (2007). Demanda Quìmica De Oxìgeno Por Reflujo Cerrado Y Volumetria. In *Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial*. http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Demanda+Química+de+Oxígeno. .pdf/20030922-4f81-4e8f-841c-c124b9ab5adb

Rodriguez, J. P., Garcia, A., & Pinzon, J. P. (2015). *Selection of technologies for municipal wastewater treatment*. *19*(46), 149–164. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.4.a12

Saldarriaga, J. C., Hoyos, D. Á., & Correa, M. A. (2013). Evaluación De Procesos Biológicos Unitarios En La Remoción Simultánea De Nutrientes Para Minimizar La Eutrofización (Evaluation of Biological Unit Processes in the Simultaneous Removal of Nutrients To Minimize Eutrophication). *Revista EIA*, *8*(15), 129–140. http://repository.eia.edu.co/revistas/index.php/reveia/article/view/251

Codigo Ecuatoriano de la Construccion de Parte IX Obras Sanitarias, 103 (2014). https://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/norma_urbana_para_estudios_y_disenos.pdf

Singureanu, C., & Woinaroschy, A. (2017). Simulation of bardenpho wastewater treatment process for nitrogen removal using superpro designer simulator. In *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. https://www.researchgate.net/publication/321669389

Spanjers, H., Vanrolleghem, P., Nguyen, K., Vanhooren, H., & Patry, G. G. (1998). Towards a simulation-benchmark for evaluating respirometry-based control strategies. *Water Science and Technology*, *37*(12), 219–226. https://doi.org/10.1016/S0273-1223(98)00373-4

Suarez, D., Carpio, M., & Duque, M. (2007). Fósforo Total En Agua Por Digestion Acida, Método Del Acido Ascorbico. In *Instituto De Hidrologia, Meteorología Y Estudios Ambientales* (Vol. 008, Issue 32). http://www.fing.edu.uy/imfia/cursos/hidrometria/material/Guia_de_Monitoreo.pdf

Suarez Oquendo, V. (2019). *Análisis de alternativas para la eliminación de nutrientes en la EDAR "La Poveda" (Rivas-VaciaMadrid, Madrid)*. Universitat Politècnica de València.

Toasa, F. (2012). VALIDACION DE LOS METODOS DE ENSAYO PARA FENOLES, TENSOACTIVOS, SOLIDOS SUSPENDIDOS Y TOTAL DE SOLIDOS DISUELTOS (TDS). [Universidad Central del Ecuador]. In *Resources* (Vol. 2, Issue 10). https://doi.org/10.1007/s11837-012-0378-1

UNESCO. (2019). *La UNESCO y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. © UNESCO 2019. https://es.unesco.org/sdgs

Venegas, C. (2015). Eliminación Biológica De Nutrientes En Aguas Residuales Con Alto Contenido De Nitrógeno Amoniacal Utilizando Un Reactor Biológico Secuencial. [UNIVERSIDAD DE CANTABRIA]. In *Universidad De Cantabria*. https://repositorio.unican.es/xmlui/handle/10902/8451

Villacis, B., & Carillo, D. (2010). Pais atrevido la nueva cara sociodemografica del Ecuador. *Edicion Especial Revista Analitica*, 10-16-42–44.

Wetzel, R. (2001). *Limnology: Lake and River Ecosystems* (3rd Editio). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/C2009-0-02112-6