



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE MITIGACIÓN DEL EFECTO CONTAMINANTE
GENERADO EN LOS AFLUENTES SIN CANALIZACIÓN SOBRE LA
MARGEN IZQUIERDA DEL LAGO MACAGUA.**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
Presentado ante la
UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Como parte de los requisitos para optar al título de
INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

Marcos Barroyeta
José Idrogo

TUTOR ACADÉMICO

Ing. Antonio Seijas

FECHA

Septiembre del 2014

DEDICATORIA

Principalmente a mi **Señor Jesucristo**, por ser esa luz en mi camino en momentos de oscuridad.

A mis padres **Marcos Barroyeta** y **Evila Bello**, por darme la vida, por darme ese gran aliento y respaldo durante esta larga carrera, por ser el pilar principal en mi formación como persona y ser esos dignos ejemplos en mi vida, los cuales me han llevado alcanzar grandes logros.

A mis hermanos, **Cesar Arquímedes**, **Andrea** y **Alejandra** por darme su comprensión y cariño en muchos momentos de dificultad que con la ayuda de Dios supimos superarlos juntos.

A mis **amistades**, que por ser tantas no alcanzaría a colocarlas en esta resumida y digna dedicatoria, ya que estas fueron y siguen siendo un gran apoyo para mí, por darme su verdadera amistad y ser partícipes y forjadores de tantos momentos de felicidad.

A mi tutor, profesor y amigo **Antonio Seijas**, por creer siempre en mí al momento de emprender este difícil y largo camino, por estar dispuesto a apoyarme en todo momento y darme esa sugerencia y noble consejo que siempre me sacaba de aprietos y generaba una gran reflexión y aprendizaje.

Y por último a mi compañero de tesis y amigo **José Idrogo**, por su gran esfuerzo y voluntad para la elaboración de este trabajo.

Marcos Barroyeta.

A mis padres, **José Idrogo** y **Analiene Villanueva**, por darme su amor incondicional, por ser mi sustento día a día y por haberme inculcado valores y enseñanzas que fueron de mucha valía a lo largo de mi carrera estudiantil.

A mi abuelo, **José Manuel**, en paz descanse, y a mi abuela **Aura Mercedes**, por su apoyo absoluto al comienzo de esta carrera y por su valiosos e innumerables consejos.

A mis hermanos, **Carlos Eduardo** y **Ana Karina**, por su compañía, comprensión y cariño brindado.

A **mis tíos, tías, primos y primas**, por poner cada uno ese granito de arena, que me fueron de gran ayuda para conseguir este logro.

A mi novia, **Amaya Escobal**, por ser mi fuente de inspiración y energía a lo largo de mi carrera, y me ayudó a levantarme en los momentos más difíciles.

A mi amigo y compañero de tesis, **Marcos Barroyeta**, por su compañía y apoyo en esas largas horas de estudio y de elaboración de este trabajo.

José Idrogo

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a **Dios todopoderoso** por darnos salud, sabiduría, paciencia y mucha voluntad para superar cada uno de los obstáculos presentes en el camino y ayudarnos a alcanzar este gran logro.

A nuestros **padres**, por darnos la oportunidad y facilidad de estudiar en esta universidad, por siempre confiar en nosotros y ayudarnos a levantarnos en cada uno de nuestros tropiezos, además de siempre darnos esas palabras de aliento que nos impulsaron a seguir adelante.

A la **Universidad Católica Andrés Bello**, por creer en nosotros, apoyarnos y por ser la casa de estudio que contribuyó en nuestra formación personal y profesional.

Al profesor **Antonio Seijas** por la confianza que depositó en nosotros, por esas largas horas de conversa y asesoramiento, por su esfuerzo y dedicación para llevar a cabo este trabajo de investigación.

A la Sra. **Manuela Petit** y a la Srta. **Ismel Talavera** por su colaboración en el laboratorio de sanitarias durante la elaboración de los ensayos.

Al Sr. **Ángel Villalba** por su colaboración al momento de conocer los alrededores de afluente estudiado y suministrar información del comportamiento y condiciones del cauce.

Al profesor **Henry Patiño** por ayudarnos en la metodología de nuestro trabajo de investigación.



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**PROPUESTA DE MITIGACIÓN DEL EFECTO CONTAMINANTE
GENERADO EN LOS AFLUENTES SIN CANALIZACIÓN SOBRE LA
MARGEN IZQUIERDA DEL LAGO MACAGUA.**

REALIZADO POR

Marcos Barroyeta
José Idrogo

TUTOR ACADÉMICO

Ing. Antonio Seijas

RESUMEN

El agua es un recurso indispensable para las actividades humanas, para el desarrollo económico de una región y el bienestar social; sin embargo, cada día se incrementa la contaminación de este recurso, producto de la descarga de aguas residuales sin tratamiento a los cursos naturales de agua; el Lago de Macagua no escapa de esta realidad, y de seguir ocurriendo esta problemática podrían verse afectadas las características naturales del lago, modificando sus usos y capacidades, además de que el mismo podría entrar en un proceso de eutrofización que lo llevaría a la disminución de su vida útil.

El propósito de este trabajo de investigación consistió en diseñar una serie de propuestas que permitirán reducir los niveles de contaminación en uno de los afluentes sin canalización que se vierte sobre la margen izquierda del Lago de Macagua, adaptándolo a los parámetros establecidos en las Normas Venezolanas para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua, Decreto 883. La presente investigación es de tipo evaluativa y aplicada, y el diseño de la misma es de campo y de laboratorio; asimismo se utilizó la recolección de muestras y ensayos de laboratorio para la recopilación de datos. Para lograr este objetivo

fue necesaria la realización de una serie de ensayos de laboratorio los cuales permitieron obtener un diagnóstico sanitario de las condiciones actuales del afluente, con el propósito de obtener datos veraces y así diseñar propuestas más acertadas y efectivas para la solución de la problemática. Para el diseño de estas propuestas se realizó modelo de cálculo fundamentado en una investigación bibliográfica compuesta por varios autores e instituciones basadas en tratamientos de aguas residuales a través de procesos biológicos (lagunas de estabilización y humedales artificiales). Las propuestas diseñadas lograron adaptarse a las condiciones naturales del afluente y alcanzaron rendimientos de depuración superiores al 99% en DBO₅ y coliformes fecales, adaptándose así por debajo de los parámetros establecidos en la norma Decreto 883 y contribuyendo con la preservación del el Lago de Macagua.

Palabras Claves: aguas residuales, tratamiento biológico de aguas residuales, lagunas de estabilización, humedales artificiales, norma Decreto 883, demanda bioquímica de oxígeno, coliformes.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
CAPÍTULO I	3
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
OBJETIVOS	4
Objetivo general.....	4
Objetivos específicos	5
JUSTIFICACIÓN	5
ALCANCE Y LIMITACIONES	7
CAPÍTULO II	9
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
AGUAS RESIDUALES	10
CAUDAL.....	10
AFOROS POR PENDIENTE – ÁREA.....	10
COMPOSICIÓN DE LOS CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES	11
CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	12
1. Características físicas de las aguas residuales	13
2. Características químicas de las aguas residuales.....	25
3. Características biológicas de las aguas residuales.....	41
PROBLEMAS QUE GENERA EL VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES	44
TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES.....	45
1. Recogida y conducción.....	45
2. Tratamiento.....	46
3. Evacuación	56
LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	56
Clasificación de los humedales artificiales	58

Partes de los humedales de flujo subsuperficial	64
Mecanismos de remoción de contaminantes	67
Ventajas y desventajas de los humedales artificiales.....	73
DISEÑO DE HUMEDALES.....	75
1. Diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal.....	75
2. Diseño de humedales subsuperficiales de flujo vertical.....	80
LAGUNAJE O LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	85
Factores que influyen en el proceso de lagunaje	87
Tipos de lagunas según su mecanismo de depuración.....	91
– Lagunas anaerobias	92
– Lagunas facultativas.....	93
– Lagunas aerobias de alta tasa	95
– Lagunas de maduración.....	96
Ventajas de sistemas Lagunares.	96
Desventajas de sistemas Lagunares.	97
DISEÑO DEL LAGUNAJE	98
– Diseño de lagunas anaerobias	98
– Diseño de lagunas facultativas	100
– Diseño de lagunas aerobias y de maduración	109
BASES LEGALES	112
CAPÍTULO III.....	115
ENFOQUE, TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.....	115
TIPO DE INVESTIGACIÓN	115
DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	116
UNIDADES DE ANÁLISIS	116
TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	117
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN	118
PROCEDIMIENTO.....	118
CAPÍTULO IV	120

CARACTERIZAR EL AFLUENTE, UBICADO EN LA UD-298 DE CIUDAD GUAYANA, EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL LAGO DE MACAGUA.....	120
Delimitación del afluente.....	120
Medición del caudal.....	123
ANALIZAR EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN DEL AFLUENTE, SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS QUE POSEA EL MISMO, Y COMPARARLAS CON LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS ESTABLECIDOS EN EL DECRETO 883.	126
Revisión bibliográfica y selección de ensayos	126
Elaboración de los ensayos y determinación de las características fisicoquímicas y biológicas del afluente	127
Resultados Obtenidos	127
EVALUAR LOS DISTINTOS MÉTODOS Y PROCESOS DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE AFLUENTES NATURALES, DE BAJO IMPACTO ECOLÓGICO Y QUE SE ADAPTEN AL AFLUENTE.	141
Características de sistemas de humedales como opción para la remoción de contaminantes en las aguas servidas.....	142
Características de sistemas lagunares como opción para la remoción de contaminantes en las aguas servidas	144
ELABORAR UNA PROPUESTA CON LOS DISTINTOS MÉTODOS, PROCESOS Y/O ESTRUCTURAS, QUE PERMITAN MITIGAR LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN PRESENTES EN LAS AGUAS DEL AFLUENTE Y ADAPTARLAS A LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL DECRETO 883.	146
Propuesta 1.....	149
Propuesta 2.....	151
Propuesta 3.....	155
Propuesta Final	157
CAPÍTULO V.....	161
CONCLUSIONES.....	161
RECOMENDACIONES.....	165

BIBLIOGRAFÍA	166
ANEXOS	169
ANEXO 1.	170
Memoria fotográfica del cauce natural.	170
ANEXO 2.	174
Memoria fotográfica de ensayo de DBO5.	174
ANEXO 3.	176
Memoria fotográfica de ensayo de coliformes totales y fecales.	176
ANEXO 4.	180
Memoria fotográfica de ensayo de Sólidos.....	180
ANEXO 5.	183
Memoria fotográfica de ensayo de Nitritos y Nitratos.	183
ANEXO 6.	186
Elaboración de cálculos. (Software: Microsoft Excel).	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. <i>Composición típica del agua residual doméstica.</i>	12
Tabla 2. <i>Relación entre la temperatura y la saturación de oxígeno en el agua.</i>	22
Tabla 3. <i>Guía general para interpretar los datos de oxígeno disuelto en el agua.</i>	23
Tabla 4. <i>Porcentaje de saturación</i>	23
Tabla 5. <i>Etapas de la línea de agua en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.</i>	46
Tabla 6. <i>Rendimientos medios de depuración, en %, en función de tipo de tratamiento.</i>	55
Tabla 7. <i>Procesos y mecanismos que ocurren en los humedales artificiales.</i>	68
Tabla 8. <i>Rendimientos medios de depuración en humedales artificiales de flujo subsuperficial.</i>	72
Tabla 9. <i>Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.</i>	78
Tabla 10. <i>Parámetros de diseño de los humedales sub superficiales de flujo horizontal.</i> ...	80
Tabla 11. <i>Características del substrato para el diseño de humedales verticales.</i>	84
Tabla 12. <i>Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.</i> ...	85
Tabla 13. <i>Valores recomendados de carga orgánica volumétrica en función de la temperatura de diseño y rendimientos.</i>	99
Tabla 14. <i>Constante de reacción de primer orden.</i>	102
Tabla 15. <i>Valores de k_p20 en función de la carga orgánica superficial.</i>	104
Tabla 16. <i>Valores de la carga orgánica superficial en función de las características climáticas de la zona.</i>	108
Tabla 17. <i>Coordenadas geográficas de los puntos de toma de muestras.</i>	122
Tabla 18. <i>Longitud del cauce.</i>	122
Tabla 19. <i>Valores de la velocidad media del efluente.</i>	123
Tabla 20. <i>Valores obtenidos del caudal medio del afluente.</i>	125
Tabla 21. <i>Valores obtenidos de la conductividad en cada muestra.</i>	128
Tabla 22. <i>Valores obtenidos de los ST, SST, SDT.</i>	129
Tabla 23. <i>Valores obtenidos de la conductividad en cada muestra.</i>	130
Tabla 24. <i>Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 1.</i>	131
Tabla 25. <i>Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 2.</i>	131

Tabla 26. Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 3.....	131
Tabla 27. Valores calculados de la DBO ₅ de muestra 1.	132
Tabla 28. Valores calculados de la DBO ₅ de muestra 2.	132
Tabla 29. Valores calculados de la DBO ₅ de muestra 3.	132
Tabla 30. Lecturas de los tubos de ensayo	134
Tabla 31. Valores obtenidos de coliformes totales y fecales.	134
Tabla 32. Valores obtenidos de nitritos en cada muestra.....	135
Tabla 33. Valores obtenidos de nitratos en cada muestra.....	135
Tabla 34. Resumen de Caracterización de las aguas servidas para cada muestra.....	136
Tabla 35. Capacidad de remoción de contaminantes del Afluyente.....	136
Tabla 36. Comparación de Sistemas de Humedales Artificiales.	142
Tabla 37. Comparación de sistemas lagunares.	144
Tabla 38. Superficie disponible para construcción de sistema de depuración de aguas servidas.	147
Tabla 39. Posible superficie adicional de uso privado.....	147
Tabla 40. Datos de entrada para diseño de laguna de maduración.....	150
Tabla 41. Resultados del diseño de laguna de maduración.	150
Tabla 42. Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.	151
Tabla 43. Datos de entrada para diseño de laguna de maduración.....	152
Tabla 44. Resultados del diseño de laguna de maduración.	153
Tabla 45. Datos de entrada para diseño de cada HASSH.....	153
Tabla 46. Resultados del diseño de cada HASSH.....	154
Tabla 47. Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.	154
Tabla 48. Datos de entrada para diseño de cada laguna de maduración.....	156
Tabla 49. Resultados del diseño de cada laguna de maduración.....	156
Tabla 50. Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.	157
Tabla 51. Comparación de propuestas para una selección más acertada.	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Canal de aforo Parshall.</i>	48
Figura 2. <i>Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.</i>	59
Figura 3. <i>Humedal artificial de flujo superficial.</i>	60
Figura 4. <i>Humedal subsuperficial de flujo horizontal (vista corte sección).</i>	62
Figura 5. <i>Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).</i>	63
Figura 6. <i>Diagrama del metabolismo del nitrógeno.</i>	70
Figura 7. <i>Ubicación Geográfica del afluente.</i>	121
Figura 8. <i>Afluente donde se desarrolló la investigación.</i>	122
Figura 9. <i>Sección transversal del cauce en el punto 1.</i>	124
Figura 10. <i>Sección transversal del cauce en el punto 2.</i>	125
Figura 11. <i>Sección transversal del cauce en el punto 3.</i>	125
Figura 12. <i>Características y comportamiento del cauce natural.</i>	138
Figura 13. <i>Punto #1, unión de canal colector con el cauce natural.</i>	139
Figura 14. <i>Unión entre el bote de escombros y vertido de aguas servidas.</i>	139
Figura 15. <i>Efluente aguas abajo del bote escombros.</i>	140
Figura 16. <i>Punto #2, aguas debajo de la unión entre el vertido de aguas servidas y el cauce natural.</i>	140
Figura 17. <i>Punto #3, toma de muestras, a 100 metros de la desembocadura en el Lago Macagua.</i>	141
Figura 18. <i>Superficies para construcción de sistema de depuración de aguas servidas.</i>	147
Figura 19. <i>Esquema de propuesta 1. L. Maduración – L. Maduración (en serie).</i>	149
Figura 20. <i>Esquema de propuesta 2. 1 L. Maduración (en serie) – 2 HASSH (paralelo).</i> .	152
Figura 21. <i>Esquema de propuesta 3. 2 L. Maduración (serie) – 2 L. Maduración (paralelo).</i>	155

INTRODUCCIÓN

La contaminación de los recursos hídricos superficiales es un problema cada vez más grave, debido a que estos se usan como destino final de residuos domésticos e industriales. Estas descargas son las principales responsables de la alteración de la calidad de los cuerpos de agua naturales, que en algunos casos llegan a estar tan contaminados que su saneamiento resulta muy difícil y costoso. Actualmente el Lago de Macagua se encuentra inmerso en esta problemática, ya que en su margen izquierda se encuentran una serie de afluentes que contienen desechos provenientes de las comunidades aledañas a esta zona del embalse. Si esta problemática en el Lago de Macagua no es solventada, podrían verse modificadas las características en la calidad de agua del mismo, generando así cambios en sus usos y capacidades.

Este trabajo de investigación se elaboró con la finalidad de diseñar un conjunto de propuestas que permitan mitigar los niveles de contaminación generados en los afluentes sin canalización sobre la margen izquierda del Lago de Macagua. El diseño de estas propuestas se caracterizó por hacer uso de procesos biológicos en la depuración de los afluentes, ya que las condiciones climáticas y geográficas de la zona favorecen en gran manera la utilización de estos métodos; otra de las premisas en el diseño de las propuestas fue que las mismas debían ser de fácil operación, poseer poco mantenimiento, adaptarse a las características del afluente y generar un bajo impacto ambiental.

Con el propósito de desarrollar lo descrito anteriormente, la investigación se estructuró en 5 capítulos descritos a continuación:

El capítulo I plantea la problemática que se desea solventar con la investigación, los objetivos que se proponen para lograrlo, la justificación de la investigación y su alcance.

El capítulo II contiene los fundamentos teóricos recopilados de un conjunto de diversos autores, instituciones e investigaciones posteriores, que sirven como sustento y base de la investigación.

El capítulo III contiene la metodología planteada para la elaboración de la investigación, la cual se conforma por el tipo y diseño de investigación, técnicas e instrumentos utilizados, presentación y análisis de los resultados.

El Capítulo IV expone los análisis y resultados de la investigación, siguiendo la estructura fijada a través de los objetivos planteados en el capítulo I. De igual manera en este capítulo se presenta una propuesta final que genera una solución a la problemática actual.

El capítulo V presenta las conclusiones y recomendaciones generadas producto de la investigación realizada.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento desenfrenado que ha tenido la población de Ciudad Guayana, ha producido la expansión de la ciudad en sentido oeste, a las cercanías de la margen izquierda del Lago de Macagua, con la construcción de nuevos conjuntos residenciales, comerciales e invasiones sin planificación. Las aguas servidas e industriales de estos nuevos núcleos son drenadas sin ningún tipo de control o normalización, a través de pequeños cauces de quebradas que a su vez desembocan en el Lago de Macagua, pudiendo comprometer la calidad del agua de dicho lago.

Boccalon, A. (2001). *El nivel de contaminación acelera el proceso de envejecimiento en aguas del embalse*. Disponible en: <http://www.analitica.com/info/2621098.asp>. En una entrevista realizada a “Selma García” (microbiólogo, responsable del área de limnología y jefe de la sección de información del departamento de manejo ambiental, de la Gerencia de Gestión Ambiental de Edelca), expreso que a la empresa no sólo le interesa monitorear la cantidad, sino también la calidad de las aguas de la cuenca del Caroní, pues se trata de la materia prima para la producción de la energía eléctrica. Dice que si bien es cierto Edelca no modifica las características naturales del agua que utiliza durante el proceso industrial, sí ha observado con preocupación que las condiciones urbanísticas de Ciudad Guayana provocan la afectación paulatina del Lago de Macagua, bien sea por contaminación directa o por el vertido al embalse de una buena cantidad de aguas servidas sin tratar.

Esta realidad ha marcado una notable diferencia entre las aguas del embalse de Guri y las del Lago de Macagua, razón por la cual a los análisis de oxígeno y sólidos suspendidos, que son los que establece la normativa 883, Edelca incluyó los indicadores

de calidad sanitaria para comprobar niveles de contaminación de las aguas en algunos puntos del embalse, debido a la presencia de coliformes totales y fecales que aceleran el proceso de envejecimiento natural del cuerpo de agua.

Debe tomarse en consideración que con la construcción de una presa, el medio acuático pasa de ser de un río a ser un embalse, generando cambios en los procesos de autodepuración del agua y en cada uno de los parámetros fisicoquímicos del agua como lo son: la dureza, turbidez, temperatura, DBO, pH, oxígeno disuelto, alcalinidad, entre otros.

Si no se toman en cuenta medidas para reducir el impacto generado por cada uno de estos afluentes que desembocan sobre la margen izquierda del lago, el mismo podría reducir notoriamente sus usos y capacidades, además de que podría entrar en un proceso de eutrofización, disminuyendo su vida útil y aumentando la acidez en el agua, habiéndose determinado previamente que la misma posee altos niveles de acidez. A causa de cada uno de estos procesos, podría verse afectada toda la infraestructura industrial de la presa (compuertas, turbinas, tomas para dotaciones de agua potable, puentes, entre otras).

Esta investigación tiene como propósito diseñar un conjunto de estrategias y posibles soluciones que permitan reducir los niveles de contaminación de los afluentes sin canalización que se vierten sobre la margen izquierda del Lago de Macagua.

OBJETIVOS

Objetivo general

Diseñar una propuesta que permita mitigar los niveles de contaminación generados en los afluentes sin canalización sobre la margen izquierda del Lago de Macagua, haciendo uso de tecnologías con la presencia de procesos biológicos, que sean de fácil operación,

posean poco mantenimiento, generen un bajo impacto ambiental y se adapten a los afluentes.

Objetivos específicos

- Caracterizar el afluente, ubicado en la UD-298 de Ciudad Guayana, en la margen izquierda del Lago de Macagua.
- Analizar el nivel de contaminación del afluente, según las características fisicoquímicas y biológicas que posea el mismo, y compararlas con los parámetros fisicoquímicos y biológicos establecidos en el Decreto 883.
- Evaluar los distintos métodos y procesos de tratamientos biológicos de afluentes naturales, de bajo impacto ecológico y que se adapten al afluente.
- Elaborar una propuesta con los distintos métodos, procesos y/o estructuras, que permitan mitigar los niveles de contaminación presentes en las aguas del afluente y adaptarlas a los parámetros establecidos en el Decreto 883.

JUSTIFICACIÓN

Guayana es una región caracterizada por sus riquezas minerales y gran potencial de generación hidroeléctrica, al contar con la bendición de encontrarse entre dos grandes ríos como el Orinoco y el Caroní. Este último ha sido objeto de mucho aprovechamiento con la construcción de varias presas tales como Gurí, Tocoma, Caruachi y Macagua, en donde se explotan las condiciones naturales de este río para la generación de energía, abastecimiento de agua, riego y recreación a la ciudad.

Con la gran importancia que tiene el Caroní para la región, el país y las obras hidráulicas que en él existen, surge la necesidad de realizar estudios a los afluentes que

desembocan en él, para evaluar que estos no comprometan la calidad del agua y las obras que en él existen.

De no tomarse en cuenta medidas que permitan reducir el impacto generado por cada uno de estos afluentes que desembocan sobre la margen izquierda del lago, el mismo podría entrar en un proceso de eutrofización, disminuyendo su vida útil y aumentando la acidez en el agua, habiéndose determinado previamente que la misma posee altos niveles de acidez. A causa de cada uno de estos procesos, podría verse afectada todas las infraestructuras hidráulicas de la presa (compuertas, turbinas, tomas para dotaciones de agua potable, puentes, entre otras). La mayor parte de estos afluentes se encuentran aguas arriba de la torre toma para dotación de agua potable, generando así una gran problemática ya que el proceso de potabilización del agua podría verse modificado, aumentando así los costos para lograr la potabilización de la misma. Debido a la versatilidad que tiene el lago en cuanto a su uso, el mismo es utilizado para recreación de los ciudadanos, por tal motivo, es necesario que el agua del lago cumpla con los parámetros de calidad exigidos por la norma para su disfrute.

Esta investigación tiene como propósito diseñar un conjunto de estrategias y posibles soluciones que permitan reducir los niveles de contaminación que generan los afluentes sin canalización sobre la margen izquierda del Lago de Macagua.

Con base a los requerimientos establecidos en la Norma para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua (Decreto 883), se caracterizarán los distintos afluentes para analizar los parámetros fisicoquímicos y biológicos, y se evaluarán los distintos métodos y procesos para el tratamiento de afluentes en lagos, y de esta manera poder diseñar propuestas que mitiguen los niveles de contaminación de los afluentes que se encuentran en la margen izquierda del Lago de Macagua.

ALCANCE Y LIMITACIONES

El siguiente trabajo de investigación tiene como objetivo el diseño de una propuesta que permita mitigar los niveles de contaminación de los afluentes sin canalización que son vertidos en la margen izquierda del Lago de Macagua. Estos afluentes se encuentran localizados en la margen izquierda del Lago Macagua, aguas arriba de la Presa Macagua, comenzando desde la torre toma para dotación de agua potable de Toro Muerto hasta la Urbanización Santa Rosa.

El afluente donde se desarrollará la investigación es un cauce natural que se ve afectado por el vertido de aguas servidas y de lluvia. Este fue escogido teniendo en cuenta su cercanía y accesibilidad, y se encuentra ubicado en el sector Río Sipapo, UD-298, llamado por los lugareños como Río Sipapo.

Partiendo de la caracterización previa del afluente se realizarán análisis de los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua, para conocer de la calidad del agua del afluente sin canalización que desemboca al Lago de Macagua del afluente sin canalización. A partir de estos estudios se evaluarán los distintos métodos, procesos y/o estructuras que permitan mitigar los niveles de contaminación en el afluente. La propuesta final estará limitada principalmente por el diagnóstico del afluente y por la necesidad de que la misma debe hacer uso de procesos naturales y biológicos para el tratamiento de las aguas del afluente, además de que debe carecer de equipos sofisticados para su operación y poseer un fácil y bajo mantenimiento.

El siguiente trabajo de investigación será elaborado en un periodo estimado de 6 meses (Marzo – Septiembre de 2014).

La investigación se efectuará en las siguientes instalaciones y zonas:

- Laboratorio de ingeniería sanitaria, de la Universidad Católica Andrés Bello, extensión Guayana, donde se realizarán diferentes ensayos de calidad de agua.
- Margen izquierda del Lago de Macagua, aguas arriba de la presa Macagua, comenzando desde la torre toma para dotación de agua potable de Toro Muerto hasta la Urbanización Santa Rosa, Sector Rio Sipapo UD-298.

El estudio utilizará las siguientes normativas como referencia:

- Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua. Decreto 883.
- Aguas naturales, industriales y residuales COVENIN 2634:2002.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Araujo D. y Araujo Y. (2011) en conjunto con la Universidad de Los Andes, realizaron un trabajo de investigación titulado “Alternativas para el manejo de aguas residuales municipales en la parroquia La Puerta, municipio Valera, estado Trujillo” el cual fue elaborado con la finalidad de plantear las alternativas más adecuadas para el manejo de aguas residuales en la parroquia La Puerta. Para llevar a cabo este objetivo se hizo un inventario del sistema de abastecimiento urbano, recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales en la población, es decir, se realizó un diagnóstico del sistema inventariado; se plantearon las alternativas para el tratamiento de las aguas residuales y se elaboró la ingeniería conceptual de la alternativa seleccionada.

Rodríguez J. (2010) en conjunto con la Universidad Nacional Experimental de Guayana, desarrollaron un trabajo de investigación titulado “Neutralización de los vertidos líquidos residuales. Caso: área de análisis de hierro total y metálico del laboratorio de ensayos de la empresa Orinoco Iron”. Los efluentes residuales por su agresividad y altos niveles de contaminación deben ser descargados en forma tal que no generen un problema ecológico, biológico y económico. En el Laboratorio de ensayos de la empresa Orinoco Iron se determina la cantidad de hierro total y metálico de los productos. El residuo líquido generado tiene un pH muy bajo. En esta condición, estos desechos no pueden ser descargados al ambiente debido a sus características fisicoquímicas que ocasionan daños irreversibles al ecosistema, es por ello que el trabajo desarrollado tiene como objetivo proponer una metodología para la neutralización de estos desechos.

AGUAS RESIDUALES

“Es el agua proveniente de cualquier proceso industrial, actividad doméstica agropecuaria, comercial y que perdió sus características originales”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.2).

CAUDAL

“Se define caudal o gasto de una corriente como la cantidad de volumen que pasa por una sección transversal del cauce en unidad de tiempo”. (Manuel Vicente Méndez, 2001, p. 33.)

$$Q = \frac{\text{vol}}{T} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Q = caudal o gasto

Vol = volumen

T = tiempo

AFOROS POR PENDIENTE – ÁREA

Este método de cálculo de caudal utiliza la ecuación de Chezy – Manning para canales abiertos.

$$Q = A \times V \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Q = caudal

A = área

V = velocidad

(Manuel Vicente Méndez, 2001, p. 48.).

La velocidad del agua se calcula mediante la siguiente ecuación

$$V = \frac{R^{\frac{2}{3}} \times S^{\frac{1}{3}}}{n} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

R= radio hidráulico de la sección

S = pendiente longitudinal de la superficie del agua

n = coeficiente de rugosidad (número de Manning)

(Manuel Vicente Méndez, 2001, p. 181)

COMPOSICIÓN DE LOS CAUDALES DE AGUAS RESIDUALES

La composición de los caudales de aguas residuales depende del tipo de sistema de recolección y puede incluir los siguientes componentes:

1. Agua Residual doméstica o Sanitaria

“Es el agua que abastece a zonas residenciales, comercios, instituciones y áreas recreacionales, este tipo de aguas incluye la del consumo humano, la que se utiliza para cualquier tipo de limpieza, higiene, evacuación de residuos y también regados de jardines”. (Metcalf & Eddy, 1995, p.18).

2. Agua residual industrial

“Son todas aquellas aguas en la cual predominan los vertidos industriales”. (Metcalf & Eddy, 1995, p.18).

3. Aguas negras municipales

“Las aguas negras municipales son una mezcla de aguas domésticas e industriales generadas en una ciudad cuya composición es superior al 99% de agua y, el resto, son contaminantes orgánicos e inorgánicos, tanto en suspensión como disueltos”. (Roa Márquez, J.A., 2001, p. 208).

4. Aguas servidas

“Son las aguas cloacales residuales de cualquier clase, provenientes de una edificación, con o sin contener materia fecal y/u orina, pero sin contener aguas de lluvia.” (Normas sanitarias, 2007, p. 168).

5. Aguas pluviales

“Son aquellas provenientes de la escorrentía superficial.” (Metcalf & Eddy, 1995, p.18).

CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Tabla 1. *Composición típica del agua residual doméstica.*

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Diluida
Sólidos totales	mg/l	1200	720	350
Sólidos disueltos totales	mg/l	850	500	250
Sólidos disueltos fijos	mg/l	525	300	145
Sólidos disueltos volátiles	mg/l	325	200	105
Sólidos suspendidos	mg/l	350	220	100
Sólidos suspendidos fijos	mg/l	75	55	20
Sólidos suspendidos volátiles	mg/l	275	165	80

Cont.

Componente	Unidad	Concentración		
		Fuerte	Media	Diluida
Sólidos sedimentables	mg/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅	mg/l	400	220	110
Carbono orgánico total, COT	mg/l	290	160	80
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/l	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/l	85	40	20
Nitrógeno orgánico	mg/l	35	15	80
Nitrógeno amoniacal	mg/l	50	25	12
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0
Fósforo total	mg/l	15	8	4
Fósforo orgánico	mg/l	5	3	1
Fósforo inorgánico	mg/l	10	5	3
Cloruros	mg/l	100	50	30
Sulfatos	mg/l	50	30	20
Alcalinidad	mg/l	200	100	50
Aceites y grasas	mg/l	150	100	50
Coliformes totales	NMP/100 ml	10 ⁷ a 10 ⁹	10 ⁷ a 10 ⁸	10 ⁶ a 10 ⁷
Compuestos orgánicos volátiles	mg/l	> 400	100 a 400	<100

Fuente: Metcalf & Eddy, 1995.

1. Características físicas de las aguas residuales

Las características físicas más importantes del agua residual son el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 59).

1.1 Conductividad

“La conductividad se define como la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica y es lo contrario de la resistencia. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm), con una magnitud de 10^{-6} , es decir micro Siemens/cm ($\mu\text{S/cm}$), o en 10^{-3} , es decir, mili Siemens (mS/cm)”.

En el caso de medidas en soluciones acuosas, el valor de la conductividad es directamente proporcional a la concentración de sólidos disueltos, por lo tanto, cuanto mayor sea dicha concentración, mayor será la conductividad. La relación entre conductividad y sólidos disueltos se expresa, dependiendo de las aplicaciones, con una buena aproximación por la siguiente regla: $1.4 \mu\text{S/cm}$ (Grados ingleses) = 1ppm (Grados americanos).

Donde 1 ppm = 1 mg/L es la unidad de medida para sólidos disueltos.

La temperatura influye en la medición de la conductividad por lo tanto hay que tomarla en consideración, para realizar mediciones comparativas, la temperatura de referencia es de 20 °C ó 25 °C. (APHA, (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edition. Washintong, D.C. p. 1265).

1.2 Sólidos totales

“Es el término aplicado al material o residuo que permanece en el recipiente después de la evaporación de la muestra y su posterior secado en un horno a una temperatura definida”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.6).

Determinación de sólidos totales (103-105 °C)

Principio

Se evapora una muestra homogeneizada, en una cápsula de porcelana previamente pesada, luego se seca en un horno a 103-105 °C hasta peso constante. El aumento de peso sobre el de la cápsula vacía representa los sólidos totales.

Procedimiento

1. Si se van a medir sólidos volátiles, calentar en una mufla la cápsula de evaporación limpia a 550 °C durante 1 hora. Si sólo se van a medir sólidos totales, calentar la cápsula de evaporación limpia a 103-105 °C durante 1 hora.
2. Mantener y enfriar en un desecador y pesar inmediatamente antes de usar.
3. Transferir un volumen conocido de la muestra previamente homogeneizada, a la cápsula y evaporar a sequedad en un baño de vapor o en un horno de secado. Utilizar un volumen de muestra que proporcione un residuo de 2,5 a 200 mg. En caso necesario, añadir a la misma cápsula, después de la evaporación, nuevas porciones de muestra.
4. Si la evaporación se lleva a cabo en un horno de secado reducir la temperatura hasta 2 °C por debajo del punto de ebullición, con la finalidad de evitar salpicaduras.
5. Secar la muestra evaporada por espacio de una hora en el horno entre 103 -105 °C.
6. Enfriar la cápsula en un desecador para equilibrar la temperatura y pesar.

7. Repetir los puntos 5 y 6 hasta obtener peso constante, o hasta que la variación de peso sea menor del 4% del peso anterior o menor de 0,5 mg.

Expresión de los resultados

Calcular los sólidos totales de la muestra de la siguiente manera:

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(A-B) \times 10^6}{c} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

A= Peso de la cápsula + peso de residuo seco, (g)

B= Peso de la cápsula, vacía (g)

C= Volumen de muestra analizada, en ml

Se debe Reportar la cantidad de sólidos de la muestra como sólidos totales a 103-105 °C, en mg/l. (Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, Ensayo de Sólidos, p. 3).

1.3 Sólidos disueltos

“Es la porción de sólidos que pasa a través de un filtro con tamaño de poro de 2 µm o menos, bajo condiciones específicas”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.6).

Determinación de sólidos disueltos totales secados a 180 °C

Principio

Se hace pasar una muestra homogénea por un filtro de fibra de vidrio; luego se evapora y seca en un horno de 180 °C, hasta peso constante. El aumento de peso de la cápsula representa los sólidos totales disueltos.

Procedimiento

1. Preparación de filtro de fibra de vidrio.
Insertar el filtro con la cara rugosa hacia arriba en el equipo de filtración. Aplicar vacío y lavar el filtro con tres porciones sucesivas de 20 ml de agua destilada. Continuar la succión hasta remover todas las trazas de agua. Descartar los lavados.
2. Preparación de la cápsula de evaporación.
Si sólo se van a medir sólidos disueltos, calentar la cápsula vacía por espacio de una hora a 180 ± 2 °C. Si se van a realizar la medición de sólidos volátiles, llevar la cápsula de evaporación a una mufla a calentar a 550 ± 50 °C durante 3 min, después de finalizada la filtración.
3. Selección del filtro y la cantidad de muestra.
Elegir un volumen de muestra entre 10 y 200 mg de residuo seco, si se requieren más de 10 minutos para completar la filtración, incrementar el tamaño del filtro o disminuir el volumen de muestra.
4. Pasar un volumen medido de muestra homogenizada por un filtro de fibra de vidrio.
Lavar con tres porciones sucesivas de 10 ml de agua destilada, permitiendo el drenaje completo de filtro entre los lavados; y continuar la succión durante 3 min, después de finalizada la filtración.
5. Transferir el filtrado a la cápsula de porcelana pesada y evaporar a sequedad en un baño de vapor. ó en horno de secado, la evaporación puede llevarse a cabo en varias horas. Si el volumen de filtrado excede la capacidad de la cápsula, se debe añadir, después de la evaporación, nuevas porciones de muestra.
6. Secar la muestra evaporada en un horno a 180 ± 2 °C por lo menos durante 1 hora.
7. Enfriar la cápsula en un desecador para equilibrar la temperatura y pesar.

8. Repetir los puntos 6 y 7 hasta obtener peso constante o hasta que la variación de peso sea menor del 4% del peso anterior o menos de 0,5 mg (seleccionar la menor de ambas).

Expresión de los resultados

Calcular los sólidos disueltos totales en la muestra de la manera siguiente:

$$\text{Sólidos Disueltos Totales } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(A-B) \times 10^6}{c} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

A: Peso de la cápsula + peso de residuo seco, (g)

B: Peso de la cápsula, (g)

C: Volumen de muestra filtrada, en ml

Reportar la cantidad de sólidos disueltos de la muestra como: sólidos disueltos a 180 °C en mg/l. (Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, Ensayo de Sólidos p. 5).

1.4 Sólidos suspendidos

“Es la porción de sólidos que es retenida en un filtro con tamaño de poro de 2 μm menos, se determina por pesada del filtro o como la diferencia entre el sólidos totales y los sólidos disueltos”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.7).

Determinación de sólidos suspendidos totales secados entre 103-105 °C

Principio

Se hace pasar una muestra homogénea por un filtro de fibra de vidrio y el residuo retenido en el mismo se seca en un horno a 103-105 °C hasta peso constante. El aumento del peso del filtro representa los sólidos totales en suspensión.

Cuando el material obstruya el filtro y prolongue la operación de filtrado, la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos disueltos totales puede proporcionar un estimado de la concentración de sólidos suspendidos totales.

Procedimiento

1. Preparación del filtro de fibra de vidrio.
2. Insertar el filtro con la cara rugosa hacia arriba en el equipo de filtración. Aplicar vacío y lavar el filtro con tres porciones sucesivas de 20 ml de agua destilada. Continuar la succión hasta remover todas las trazas de agua. Descartar los lavados.
3. Retirar el papel filtro del equipo de filtrado con una pinza y trasladar hasta el vidrio de reloj.
4. Secar en un horno a 103-105 °C, durante una hora. Si se van a medir los sólidos volátiles colocar a 550 °C durante 15 minutos en una mufla.
5. Mantener y enfriar el filtro en un desecador y pesar inmediatamente antes de usar.
6. Instalar el aparato de filtrado y el filtro para iniciar la succión. Para muestras no homogéneas, como es el caso de muestras de agua residual no tratadas, se debe agitar la muestra para homogeneizar, con un agitador magnético e introducir una pipeta aproximadamente en el punto medio entre el remolino y la pared para permitir el filtrado de una muestra representativa.

7. Humedecer el filtro, con pequeñas cantidades de agua destilada, con la finalidad de ajustarlo.
8. Pasar un volumen medido de muestra homogenizada por un filtro de fibra de vidrio. Lavar con tres porciones sucesivas de 10 ml de agua destilada, permitiendo el drenaje completo del filtro entre los lavados; y continuar la succión durante 3 min, después de finalizada la filtración.
9. Separar con cuidado el papel filtro del aparato de filtración con una pinza para filtros de membrana y llevarlo al vidrio de reloj.
10. Secar en el horno a 103-105 °C, durante una hora.
11. Enfriar en un desecador con la finalidad de equilibrar la temperatura y pesar.
12. Repetir los puntos 10 y 11 hasta obtener un peso constante hasta que la variación de peso sea menor del 4% del peso anterior o menor de 0,5 mg (seleccionar la menor de ambas).

Expresión de resultados

Calcular los sólidos suspendidos totales de la muestra siguiente manera

$$\text{Sólidos Suspendidos Totales } \left(\frac{\text{mg}}{\text{l}} \right) = \frac{(A-B) \times 10^6}{c} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

A: Peso del papel filtro + residuo, (g)

B: Peso del papel filtro, vacío en (g)

C: Volumen de muestra analizada, en ml

Reportar la cantidad de sólidos suspendidos de la muestra como: sólidos suspendidos, mg/l. (Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, Ensayo de Sólidos p. 7).

1.5 Sólidos fijos

“Es el término aplicado al residuo de los sólidos totales, suspendidos o disueltos después del proceso de ignición de la muestra, durante un tiempo y temperatura especificados”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.7).

1.6 Sólidos volátiles

“Es la pérdida de peso en el proceso de ignición para la determinación de los sólidos fijos. Se determina como la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos fijos”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.7).

1.7 Olores

“Normalmente, los olores son debidos a los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica. El agua residual reciente tiene un olor peculiar, algo desagradable, que resulta más tolerable que el agua residual séptica. El olor más característico del agua residual séptica es debido a la presencia del sulfuro de hidrógeno que se produce al reducirse los sulfatos a sulfitos por la acción de microorganismos anaeróbicos”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 63).

1.8 Temperatura

“La temperatura del agua residual suele ser siempre más elevada que la del agua del suministro hecho principalmente debido a la incorporación de agua caliente procedente de las casas y los diferentes usos industriales. La temperatura del agua es un parámetro muy

importante dado a su influencia, tanto sobre el desarrollo de la vida acuática como sobre las reacciones químicas y velocidades de reacción. Por ejemplo el aumento de la temperatura en el agua puede ocasionar cambios en el comportamiento de las especies piscícolas. Hay que destacar que la temperatura óptima para el desarrollo de la actividad bacteriana se sitúa entre los 25 y los 35 °C y los procesos de digestión aeróbica y de nitrificación se detienen cuando se alcanzan los 50 °C”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 70).

Tabla 2. *Relación entre la temperatura y la saturación de oxígeno en el agua.*

Temperatura (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
Oxígeno Disuelto (mg/l)	14.6	12.3	11.3	10.1	9.1	8.2	7.5	6

Fuente: Global Water Watch, International Center for Aquaculture and Aquatic Environment, Mexico.

Según la (Global Water Watch, International Center for Aquaculture and Aquatic Environment, Mexico). “La concentración de oxígeno en agua es inversamente proporcional con la temperatura. Si elevamos la temperatura del agua a su punto de ebullición generamos una solución libre de oxígeno. Podemos generalizar que a cualquier presión atmosférica, aguas frías saturadas con oxígeno contienen una mayor cantidad de oxígeno disuelto que aguas tibias o calientes. No obstante, la relación inversa entre temperatura y la concentración de oxígeno disuelto puede verse alterada en ambientes naturales por efecto de los procesos de fotosíntesis y respiración. Los cambios estacionales generan alteraciones significativas en la temperatura de los cuerpos de agua. Dichas alteraciones en temperatura tendrán, a su vez, un efecto sobre los niveles de oxígeno disuelto. Aumentos en la temperatura del agua traen como consecuencia una disminución en los niveles de oxígeno disuelto. Algunos incidentes de mortandad masiva de peces en cuerpos de agua, durante la época de verano, se pueden relacionar con una reducción en los niveles de oxígeno. De forma inversa, en cuerpos de agua no contaminados se registran aumentos en los niveles de oxígeno disuelto durante el periodo de invierno algas y plantas acuáticas pueden a veces producir oxígeno mediante el proceso de fotosíntesis, a una

velocidad mayor de la que el oxígeno puede difundirse desde el agua hacia el aire. Este proceso puede conducir a una sobresaturación de oxígeno disuelto en el agua que ocurre cuando la concentración de oxígeno es superior al 100% de la cantidad que se puede disolver sólo mediante una mezcla física en función de la salinidad, la presión y la temperatura del momento. El agua que se sobresatura de oxígeno frecuentemente contiene altos niveles de fósforo y/o nitrógeno. Este enriquecimiento en nutrientes puede ser intencional, como por ejemplo en fertilización de estanques para peces, o no intencional, como en el caso de escorrentía de campos agrícolas con fertilizantes o excrementos animales”.

Tabla 3. *Guía general para interpretar los datos de oxígeno disuelto en el agua.*

Concentración	0-2 ppm	No suficiente oxígeno para soportar vida animal en el agua
	2-4 ppm	Sólo pocos peces e insectos acuáticos pueden sobrevivir
	4-7 ppm	Bueno para la mayoría de animales acuáticos, aceptable para peces de aguas tropicales y bajo para peces de aguas frías
	7-11 ppm	Muy bueno para la mayoría de vida animal en ríos y lagos

Fuente: Global Water Watch, International Center for Aquaculture and Aquatic Environment, Mexico.

Tabla 4. *Porcentaje de saturación*

Saturación	Menos de 60%	Pobre, el agua está muy caliente o bacterias usando el Oxígeno Disuelto
	60-79 %	Aceptable para la mayoría de vida animal en ríos y lagos
	80-125 %	Excelente para la mayoría de vida animal en ríos y lagos
	Más de 125%	Demasiado alto, puede ser peligrosa para peces

Fuente: Global Water Watch, International Center for Aquaculture and Aquatic Environment, Mexico.

1.9 Densidad

“Se define la densidad como la masa por unidad de volumen, expresada en kg/m^3 . De esta característica depende la potencial formación de corrientes de densidad de fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 72).

1.10 Color

“Este término se refiere a la edad del agua residual, siendo determinada de forma cualitativa mediante el color y olor que esta posea. En las aguas residuales recientes destaca un color grisáceo que a medida que avanza el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado y al desarrollarse condiciones más próximas a las anaeróbicas, el color del agua residual cambia gradualmente su color de gris a gris oscuro, para finalmente adquirir un color negro”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 72).

1.11 Turbiedad

“Es una expresión de la propiedad óptica que causa la dispersión y absorción de la luz más que la transmisión en línea recta cuando pasa a través de una muestra”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.7).

“Establece que la turbiedad además de ser una propiedad de transmisión de luz del agua, es el parámetro que se utiliza para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en función de la materia coloidal y residual que se encuentran suspendidas en ellas”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 73).

2. Características químicas de las aguas residuales

“El estudio de las características químicas de las aguas residuales se aborda en los siguientes cuatro apartados: materia orgánica, medición del contenido orgánico, materia inorgánica y gases presentes en el agua residual. El hecho de que la medición del contenido en materia orgánica se realice por separado viene justificado por su importancia en la gestión de la calidad del agua y en el diseño de las instalaciones de tratamiento de aguas”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 73).

2.1 Materia orgánica

“Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 20% de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos. Los compuestos orgánicos están formados normalmente por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia, en determinados casos, de nitrógeno. También pueden estar presentes otros elementos como azufre, fósforo o hierro. Los principales grupos de sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40%), hidratos de carbono (25%) y grasas y aceites (10%)”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 73).

2.2 Proteínas

“Son los principales componentes del organismo animal, mientras que su presencia es menos relevante en el caso de los organismos vegetales. La composición química de las proteínas es muy compleja e inestable, pudiendo adoptar muchos mecanismos de descomposición diferentes. Algunas son solubles en agua, mientras que otras no lo son. Todas las proteínas contienen carbono, común a todas las sustancias, oxígeno e hidrógeno y poseen un 16% de nitrógeno”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 74).

2.3 Hidratos de carbono

“Estos se encuentran ampliamente distribuidos en la naturaleza, los hidratos de carbono incluyen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera, compuestos que se encuentran comúnmente en el agua residual. Algunos hidratos de carbono son solubles en agua, principalmente los azúcares, mientras que otros, como los almidones, son insolubles. Desde el punto de vista de volumen y la resistencia a la descomposición, la celulosa es el hidrato de carbono cuya presencia en agua residual es más importante. La destrucción de la celulosa en un proceso que se desarrolla sin dificultad en el terreno, principalmente gracias a la actividad de diversos hongos, cuya acción es especialmente notable en condiciones ácidas”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 74).

2.4 Grasas, grasas animales y aceites

“Las grasas animales y los aceites son el tercer componente, en importancia, de los alimentos. El término grasa, de uso extendido, engloba las grasas animales, aceites, ceras y otros constituyentes presentes en las aguas residuales. El contenido de grasa se determina por extracción de la muestra con triclorotrifluoroetano, debido a que la grasa es soluble en él. Las grasas y aceites animales alcanzan las aguas residuales en forma de mantequilla, manteca de cerdo, margarina, aceites y grasas vegetales. Las grasas provienen habitualmente de carnes, gérmenes de cereales, semillas, nueces y ciertas frutas. Las grasas se hallan entre los compuestos orgánicos de mayor estabilidad, y su descomposición por acción bacteriana no resulta sencilla”. (Metcalf & Eddy, 1995, p. 74).

2.5 Medida del contenido orgánico del agua residual: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)

“Se define como la cantidad de oxígeno requerido por las bacterias para estabilizar la materia orgánica susceptible a la degradación bajo condiciones aerobias, en un tiempo dado y a una temperatura específica”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.3).

El manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, “Determinación de la Demanda Bioquímica de Oxígeno”, p. 7, establece la $DBO_{5,20}$ como el parámetro de contaminación orgánica más ampliamente utilizado, aplicable tanto para aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO a 5 días y 20°C ($DBO_{5,20}$). La DBO es ejercida por tres clases de sustancias: materia carbonácea, fuente nutriente para los organismos aerobios, materia nitrogenada oxidable, transformable por bacterias específicas y compuestos químicos inestables (sulfuro, sulfito, hierro ferroso, etc.). La determinación de la misma está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica. A pesar de lo extendido del ensayo de la DBO, éste está sujeto a ciertas limitaciones.

Las limitaciones de la determinación de la DBO incluyen:

- a. La necesidad de disponer de una elevada concentración de bacterias activas y aclimatadas que desarrollen el papel de inóculo.
- b. La necesidad de un pretratamiento cuando haya residuos tóxicos.
- c. La necesidad de reducir los efectos de los organismos nitrificantes.
- d. El arbitrario y prolongado período de tiempo requerido para la obtención de resultados.
- e. El hecho de que sólo se midan los productos orgánicos biodegradables.
- f. El ensayo no tiene validez estequiométrica una vez haya sido utilizada la materia orgánica soluble presente en la muestra.
- g. El hecho de que sólo se midan los productos orgánicos biodegradables.

Posiblemente, la mayor limitación la constituye el hecho de que el período de 5 días puede no corresponderse con el momento en el que se haya oxidado toda la materia orgánica soluble.

Los resultados de los ensayos de DBO se emplean para:

- a. Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.
- b. Dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales.
- c. Medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento.
- d. Controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.

La oxidación bioquímica es un proceso lento, cuya duración es, en teoría, infinita. En un período de 20 días la oxidación se completa en el 95 al 99% de la materia carbonosa presente, y en los 5 días que dura el ensayo de la DBO se llega a oxidar entre el 60 y el 70%. Se asume la temperatura de 20°C como un valor medio representativo de la temperatura que se da a los cursos de agua que circulan a baja velocidad en climas templados. Los resultados obtenidos a diferentes temperaturas serán distintos, debido a que las velocidades de las reacciones bioquímicas son función de la temperatura.

Proceso para determinar la DBO_{5,20}.

Pre-tratamiento de la muestra

En la determinación de la DBO interfieren la presencia de compuestos tóxicos y/o el pH desfavorables al crecimiento de microorganismos, que causan interferencias.

Para muestras que contienen alcalinidad caústica de pH >8,5 ó acidez < 6,0; neutralizar las muestras a pH entre 6,5 y 7,5 con una solución de ácido sulfúrico (H₂SO₄) ó hidróxido de sodio (NaOH) 1N de tal manera que la cantidad de reactivo agregado no diluya la muestra en más del 0,5%. El pH del agua de dilución no debe ser afectada por la dilución de la muestra.

Para muestras que contienen cloro residual se recomienda tomar la muestra antes del proceso de cloración, si la muestra proviene de una corriente clorada pero no tiene cloro residual, inocular el agua de dilución, si hay presencia de cloro residual eliminarlo y

después inocular el agua de dilución. En algunos casos el cloro desaparece en el plazo de 1 a 2 horas después de su exposición a la luz. Si en este tiempo el cloro residual no se disipa destruirlo añadiendo una solución de Sulfito de sodio (Na_2SO_3), para determinar el volumen de sulfito requerido tomar una porción de la muestra entre 100 a 1000 ml ya neutralizada y agregar 10 ml de ácido acético (1:1) o ácido sulfúrico (1:50), 10 ml de solución de yoduro de potasio (10 g/100 ml) y titular con una solución de Na_2SO_3 utilizando almidón como indicador. Agregar a la muestra neutralizada el volumen de sulfito determinado, luego mezclar y después de 10 a 20 minutos verificar el contenido de cloro residual.

Las muestras que contienen otro tipo de sustancias tóxicas, ciertos residuos industriales, que requieran de un estudio y tratamiento previo no son consideradas en este método.

Muestras sobresaturadas con OD en aguas frías o en aguas donde se produce la fotosíntesis es posible encontrar muestras que contienen más de 9 mg/l de OD a 20 °C. Para evitar la pérdida de oxígeno durante la incubación, redúzcase el OD hasta la saturación a 20 °C calentando la muestra hasta esta temperatura en frascos parcialmente llenos mientras se agitan con fuerza o se airean con aire limpio, filtrado y comprimido.

La temperatura de la muestra debe estar ajustada a 20 ± 1 °C antes de hacer la dilución.

Inhibición de la nitrificación: Si se desea inhibir la nitrificación agregar 10 mg de 2-cloro-6-Tricloro metilpiridina (TCMP) a cada botella de 300 ml antes de taponarlos o cantidades proporcionales a otro tamaño de botella. No añadir TCMP a las botellas de DBO antes de añadir las 2/3 partes de la muestra diluida. Nota 1: La TCMP pura se disuelve lentamente y puede quedar flotando en la superficie de la muestra si no está bien mezclada. Algunas formulaciones comerciales se disuelven pero no son 100% puras en este caso ajustar la dosis de acuerdo a la pureza del reactivo.

Métodos de ensayo de DBO_{5,20}

El método consiste en llenar una botella de cierre hermético con una porción de muestra hasta rebosar, incubarla bajo condiciones específicas de temperatura (20 °C) durante 5 días. El oxígeno disuelto (OD) se mide antes y después de la incubación y la DBO se calcula mediante la diferencia obtenida entre el OD inicial y el final. Debido a que el OD inicial se determina inmediatamente después de hacer la dilución, todo el consumo de oxígeno que ocurre después se incluye en la determinación de la DBO.

- **Preparación y conservación de la muestra**

Las muestras para el análisis de DBO se alteran en forma significativa, durante el tiempo que transcurre entre la captación de la muestra y su análisis, resultando valores bajos de DBO. Esto se puede minimizar analizando la muestra tan pronto sea posible o refrigerarla a una temperatura cercana a la congelación durante su almacenamiento. Sin embargo incluso a bajas temperaturas el tiempo de almacenamiento se reduce al mínimo. Antes de analizar las muestras refrigeradas, esperar a que las mismas alcancen la temperatura de 20 °C.

- **Muestras al azar**

Si se va iniciar el análisis dentro de las 2 horas después de la captación de la muestra no es necesario el almacenamiento en frío; de lo contrario mantener la muestra a una temperatura de 4 °C o menos desde el momento de su captación. Comenzar el análisis en el plazo de 6 horas a partir de la captación de la muestra, cuando esto no es posible debido a que el lugar de captación está lejos del laboratorio, almacenar la muestra a 4°C o menos y al presentar el resultado indicar la duración y temperatura de almacenamiento. En ningún caso comenzar el análisis después de haber transcurrido las 24 horas desde el momento de captación de la muestra. Cuando estas muestras van a ser utilizadas para fines de regulación, realizar todos los esfuerzos posibles por enviar las muestras para su análisis en el plazo de las 6 horas después de su captación. Indicar como parte de los resultados el tiempo y las condiciones de almacenamiento.

- **Muestras compuestas**

Mantener las sub-muestras constitutivas de las muestras compuestas refrigeradas a una temperatura de 4 °C o menos. Limitar el período de composición de la muestra a 24 horas. Seguir los mismos criterios de almacenamiento descritos para las muestras tomadas al azar, comenzar la medición del tiempo de almacenamiento a partir del momento de la mezcla de la muestra. Indicar como parte de los resultados del tiempo y las condiciones de almacenamiento.

Procedimiento del ensayo para determinar el de DBO_{5,20}.

1. Preparación del agua de dilución

Colóquese el volumen de agua deseado en un envase apropiado y añádase 1 ml por litro de agua de cada una de las siguientes soluciones: de amortiguadora de fosfato, sulfato de magnesio, cloruro de calcio y cloruro férrico $MgSO_4$, $CaCl_2$, $FeCl_3$, Na_2SO_3 , por cada litro de agua. De ser necesario inocular el agua de dilución. Verificar y conservar el agua de dilución como se describe a fin de disponer de agua de dilución de calidad garantizada.

2. Verificación y almacenamiento de agua de dilución

El agua de dilución puede ser almacenada antes de ser utilizada, siempre que satisfaga los criterios de control de calidad. El almacenamiento puede mejorar la calidad del agua de dilución de algunas fuentes de agua pero al permitir el crecimiento biológico puede causar deterioro en otras. Es recomendable no almacenar el agua de dilución por más de 24 horas después de la adición de los nutrientes, minerales y solución amortiguadora a menos que los blancos del agua de dilución estén consistentemente en los límites de los controles de calidad. Descartar el agua almacenada si el blanco de agua de dilución muestra una reducción mayor de 0,2 mg/l de OD a los 5 días de incubación.

Si en el agua de dilución el consumo de oxígeno excede a 0,2mg/l, descartar el agua de dilución y mejorar los procedimientos de purificación o cambiar la fuente,

Alternativamente si se utiliza la inhibición de la nitrificación, almacenar el agua de dilución, inocular como se describe en el apartado a temperatura ambiente y en la oscuridad, hasta que el consumo de oxígeno sea lo suficientemente reducido como para satisfacer los criterios de aceptabilidad del agua de dilución. Verificar el agua de dilución almacenada en uso, pero no agregar inóculo al agua almacenada para mejorar su calidad. No se recomienda el almacenamiento si la determinación se hace sin inhibidor de la nitrificación, ya que durante este tiempo se pueden desarrollar los organismos nitrificantes.

Verificar el contenido de amoníaco remanente en el agua de dilución después del almacenamiento; si no existe agregar solución de cloruro de amonio para proveer un total de 0,45 mg N/l.

Si el agua de dilución no ha sido almacenada, para mejorar su calidad agregar suficiente inóculo para producir de 0,5 mg/l a 0,1 mg/l en 5 días y a 20 °C. Llenar completamente una botella con agua de dilución e incubar durante 5 días a 20 °C. Determinar el OD inicial y final como se describe más adelante. El consumo de oxígeno no puede ser mayor a 0,2 mg/l y preferiblemente no mayor a 0,1 mg/l.

3. Verificación con solución glucosa_ acido glutámico

Debido a que la determinación de DBO es un bioensayo, los resultados pueden estar influenciados en gran medida por la presencia de sustancias tóxicas o por el uso de inóculos de baja calidad.

El agua destilada frecuentemente contiene cobre entre sus impurezas y algunos inóculos de aguas residuales son relativamente inactivos. Con tales aguas y simientes (inóculo) siempre se obtienen resultados bajos de DBO, por tanto se hace necesario verificar periódicamente la calidad del agua de dilución, la efectividad del inóculo y la técnica analítica realizando la determinación de DBO con una mezcla de 150 mg/l de glucosa y 150 mg/l de ácido glutámico como solución de patrón de verificación.

La glucosa tiene una tasa excepcionalmente alta y variable de oxidación pero cuando se utiliza con el ácido glutámico, la tasa de oxidación se estabiliza y es similar a la que se obtiene con muchas aguas residuales domésticas.

Alternativamente si un agua residual en particular contiene un mejor componente identificable que contribuya a la DBO, utilizar este compuesto en lugar de ácido glutámico-glucosa.

Determinar la DBO a 5 días y 20 °C a una disolución al 2 % de la solución patrón de verificación utilizando lo descrito en los apartados.

4. Inoculación

- **Preparación del inóculo**

En caso de realizar la determinación de muestras provenientes de aguas que no contengan una población microbiana en cantidades suficientes para degradar la materia orgánica presente (por ejemplo: algunos residuos industriales no tratados, residuos desinfectados, aguas residuales con temperaturas altas y/o pH extremo), para tales residuos inocular el agua de dilución. El inóculo preferido es el proveniente del sistema de tratamiento que procesa agua residual o licor de mezcla de un sistema de tratamiento biológico procesador del desecho. Cuando esto no es posible, utilizar el sobrenadante del agua residual doméstica que se ha dejado sedimentar a temperatura ambiente durante al menos 1h pero no más de 36 h.

Cuando se utiliza el efluente de un proceso de tratamiento biológico se recomienda inhibir la nutrición.

Algunos líquidos residuales contienen materia orgánica difícilmente biodegradable por los microorganismos presentes en el agua residual doméstica; en estos casos inocular tales muestras con un inóculo adaptado proveniente del efluente no desinfectado que trate el residuo. Si esto no es posible, obtener el inóculo del cuerpo del receptor captándolo en

un punto aguas debajo de la descarga preferiblemente entre 3 y 8 km del sitio de descarga. Si esto tampoco es posible preparar en el laboratorio un inóculo adaptado aireando continuamente una muestra de agua residual doméstica previamente sedimentada y agregar diariamente pequeñas cantidades del residuo. Opcionalmente, se puede utilizar una suspensión de lodos activados, o una preparación de inóculo comercial para proveer la población microbiana inicial.

- **Control del inóculo**

Determinar el DBO del material de inoculación como en cualquier muestra (este es el inóculo control). A partir de este valor obtenido y conociendo su proporción en el agua de dilución determinar el consumo de OD del inóculo. Lo ideal es hacer diluciones del inóculo tales que la mayor cantidad resulte en al menos un 50% de reducción de consumo de OD.

Si se gráfica el consumo de OD en mg/l versus lo ml de inóculo presente en la dilución, la pendiente de la línea recta obtenida indica el consumo de OD por ml del inóculo, la intercepción con el eje de las X representa el consumo de oxígeno causado por el agua de dilución y debe ser menor a 0,1 mg/l. Para determinar el consumo de OD de una muestra inoculada, restar el consumo de OD del inóculo del consumo total de oxígeno. El consumo de OD total del agua de dilución inoculada debe estar entre 0,6 mg/l y 1,0 mg/l.

- **Preparación previa de la muestra**

Ajustar la temperatura de la muestra: esperar a que la muestra alcance una temperatura de 20 ± 1 °C, antes de preparar las diluciones.

Verificar el pH de todas las muestras antes de la determinación de la DBO, aunque la experiencia previa indique que el pH está dentro del rango aceptable.

- **Técnicas de dilución**

Las diluciones que producen resultados más confiables, son aquellos cuyo OD residual sea de al menos 1mg/l y el consumo de OD al menos 2mg/l después de 5 días de incubación.

Preparar las diluciones para obtener un valor de OD en este rango. Si no se tienen conocimientos previos de la muestra, se recomienda utilizar las siguientes: 0,0% a 1,0% para aguas residuales de alto contenido de materia orgánica; de 1% a 5% para aguas residuales crudas y depuradas; de 5% a 25% para efluentes tratados biológicamente y de 25% a 100% para aguas superficiales contaminadas (ríos).

Preparar las diluciones en cilindros graduados o en balones volumétricos y después transferir a las botellas de DBO o preparar directamente en la botella de DBO.

Ambos métodos de dilución pueden ser combinados con cualquier técnica de medición de OD. El número de botellas que serán preparadas para cada dilución dependen del OD utilizado y el número de réplicas deseadas. Cuando se utilizan cilindros graduados o balones volumétricos para la preparación de las diluciones, y es necesario inocular, añadir el inóculo directamente al agua de dilución o a los cilindros o balones antes de diluir. La inoculación en los cilindros y/o balones evita una disminución de la proporción del inóculo con respecto a la muestra a medida que se realizan diluciones mayores.

Cuando las diluciones son preparadas directamente en las botellas de DBO y es necesario inocular, añadir directamente el inóculo al agua de dilución o a las botellas de DBO. Cuando una botella tiene más de 67% de la muestra después de la dilución, los nutrientes pueden estar limitados en la muestra diluida y en consecuencia se reduce la actividad biológica. En tales muestras, añadir los nutrientes, minerales y solución amortiguadora directamente a las botellas de DBO a una tasa de 1ml/l (0,33 ml/300 ml).

La forma de preparar las diluciones en las botellas directamente es la siguiente:

- a. Agregar el volumen deseado de muestra a cada una de las botellas utilizando una pipeta volumétrica de punta ancha.
- b. Llenar las botellas aproximadamente 2/3 con suficiente agua de dilución, inoculada si es necesario, de modo que la introducción de la tapa de la botella desplace todo el aire sin dejar burbujas.
- c. Si el método para la determinación del OD es el volumétrico preparar dos botellas por cada dilución, en una de ellas determinar el OD y sellar la otra hidráulicamente e incubar durante 5 días a 20 °C.
- d. Si el método para la determinación del OD es el electrodo de membrana, preparar una sola botella por cada dilución, medir el OD y restituir el volumen desplazado por el electrodo con agua de dilución, tapar herméticamente e incubar durante 5 días a 20 °C.
- e. Enjuagar el electrodo de membrana entre las determinaciones para evitar la contaminación cruzada de las muestras.

- **Determinación del OD inicial**

Si la muestra contiene materiales que reaccionan rápidamente con el OD, determinar este inmediatamente después de haber llenado la botella de DBO con la muestra diluida. Si el consumo de OD inicial es insignificante el periodo entre la preparación de la dilución y la medida del OD inicial no es crítico pero no debe exceder de 30 min.

- **Blanco de agua de dilución**

Conjuntamente con cada uno de los lotes de muestra, incubar una botella llena con agua de dilución sin inocular como un control aproximado de la calidad del agua de dilución no inoculada y de la limpieza de las botellas de DBO. Determinar el OD inicial y final. El consumo de OD no puede ser mayor a 0,2 mg/l y preferiblemente no más de 0,1 mg/l.

- **Incubación**

Incubar a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ las botellas de DBO que contienen las diluciones preparadas, control del inóculo, blanco de agua de dilución y verificación con solución de glucosa – ácido glutámico. Sellar todas las botellas con sello hidráulico.

- **Determinación del OD final**

Después de 5 días de incubación determinar el OD en las muestras diluidas, blancos y controles como se indica en la Norma Venezolana 2871.

- **Expresión de resultados**

Por cada botella de DBO que tenga un mínimo de reducción de 2,0 mg/l de OD y al menos de 1,0 mg/l de OD residual. Calcular el contenido de DBO, expresado en mg/l de la siguiente manera:

-Si el agua de dilución no se inocula:

$$\text{DBO}_5 = \frac{D_1 - D_2}{P} \quad (\text{Ecuación 7})$$

-Si el agua de dilución se inocula:

$$\text{DBO}_5 = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2) f}{P} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

D1= OD de la muestra diluida inmediatamente después de su preparación, mg/l

D2= OD de la muestra diluida después de 5 días de incubación, mg/l

P= Fracción volumétrica decimal de muestra utilizada

B1= OD del inóculo de control antes de la incubación, mg/l

B2= OD del inóculo de control después de la incubación, mg/l

f= volumen de inóculo en cada botella de ensayo /volumen de inóculo en el agua de dilución

Si la reducción de OD es menos de 2,0 mg/l y la concentración de la muestra es 100% (excepto las no diluciones para inóculo, nutrientes, minerales y solución tampón) del

inóculo actual corregido, la reducción del OD puede ser reportado como la DBO, aun si esta es de al menos 2,0 mg/l.

Cuando todas las diluciones tienen un residual de OD menor de 1,0 mg/l seleccionar la botella que tenga la menor concentración de OD (dilución mayor) y reporte.

En estos cálculos no se hace corrección por consumo de OD en el blanco de agua de dilución durante la incubación. Esta corrección es necesaria si el blanco de agua de dilución cumple con los criterios establecidos en los apartados anteriores. Si el agua de dilución no satisface estos criterios, es difícil realizar la corrección apropiada y los resultados se consideran cuestionables.

Si se inhibe la nitrificación los resultados se indican como DBO_5 (demanda bioquímica de oxígeno carbonácea).

Si más de una dilución cumple con los criterios: OD residual al menos 1mg/l y consumo de OD al menos 2mg/l y no hay evidencia de toxicidad o existencia de alguna otra anomalía, presentar el promedio de los resultados obtenidos en el rango aceptable. (Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, Determinación de la Demanda Bioquímica de oxígeno, p. 4).

2.6 Materia inorgánica

“Son varios los componentes inorgánicos de las aguas residuales y naturales que tienen importancia para la determinación y control de calidad del agua. Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que a ella se descargan. Puesto que las concentraciones de los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, conviene examinar la naturaleza de algunos de ellos, especialmente aquellos que han sido incorporados al agua superficial durante su ciclo de uso”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 95

2.7 pH

“Es el logaritmo negativo o el logaritmo recíproco de la actividad de ion hidrógeno en una solución acuosa o de otro solvente especificad”. (Norma Venezolana COVENIN 2634:2002, p.2).

Metcalf & Eddy (1995) afirma que el agua residual con concentraciones de ion hidrógeno inadecuadas presenta dificultades de tratamientos con procesos biológicos, y el efluente puede modificar la concentración de ion hidrógeno en la aguas naturales si esta no se modifica antes de la evacuación de las aguas. (p.95).

2.8 Cloruros

“Se definen como aniones que se encuentran en el agua residual provenientes, en su mayoría de las sales más utilizadas en la alimentación humana como es el cloruro de sodio. Se estima que el hombre expulsa a través de la orina y las heces aproximadamente 6 gramos de cloruros por persona al día, en consecuencia, la presencia de este ion en el agua residual podría indicar la posible contaminación de origen fecal”. (Roa Márquez, J.A, 2001, p.214).

Metcalf & Eddy (1995) afirma que la infiltración de aguas subterráneas en las alcantarillas contiguas a aguas saladas constituyen también una potencial fuente de cloruros y sulfatos. (p.97).

2.9 Alcalinidad

“Puede definirse como la capacidad que posee el agua para neutralizar ácidos. La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampón de un agua.

En las aguas naturales la alcalinidad es debida a la presencia generalmente de tres clases de iones: bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos, y en aguas contaminadas con residuos industriales se pueden encontrar otras clases de compuestos como boratos, silicatos, fosfatos, etc., que contribuyen con la alcalinidad en las aguas.

Los bicarbonatos representan la mayor parte de la alcalinidad, ya que se forman en cantidades considerables por la acción del CO_2 sobre los materiales básicos del suelo”. (Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, 2014, Ensayo de Alcalinidad, p. 1).

2.10 Nitrógeno

“Los elementos nitrógeno y fósforo son esenciales para el crecimiento de protistas y plantas, razón por la cual reciben el nombre de nutrientes o bioestimuladores. Cuando el contenido de nitrógeno sea insuficiente, será preciso añadirlo para hacer tratable el agua residual. En aquellos casos en los que sea necesario el control de alga en la masa de agua receptora para preservar los usos a que se destina, puede ser necesaria la eliminación o reducción del nitrógeno en las aguas residuales antes del vertido”. (Metcalf & Eddy, 1995, p.97).

2.11 Fósforo

“Es un elemento esencial para el crecimiento de algas y otros organismos biológicos. Debido a que en aguas superficiales tienen lugar nocivas proliferaciones

incontroladas de algas, actualmente existe mucho interés en limitar la cantidad de compuestos de fósforo que alcanzan las aguas superficiales por medio de vertido de aguas residuales domésticas, industriales y a través de las escorrentías naturales”. (Metcalf & Eddy, 1995, p.98).

2.12 Azufre

“El ion sulfato se encuentra en forma natural tanto en aguas de abastecimiento como en aguas residuales, para la síntesis de proteínas, es necesario disponer de azufre, elemento que posteriormente será liberado en el proceso de degradación de las mismas. Los sulfatos se reducen a sulfuros en los digestores de fangos, y pueden alterar el normal desarrollo de los procesos de tratamiento biológicos si la concentración de sulfuro excede los 200 mg/l”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 100).

2.13 Gases

“Los principales gases disueltos en las agua residuales son el oxígeno (O_2), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), amoníaco (NH_3) y metano (CH_4)”. (Roa Márquez, J.A., 2001, p.215).

Roa Márquez, J.A. (2001) establece que el oxígeno es uno de los componentes más importantes de las aguas naturales, de su presencia depende la vida de los organismos aerobios y, como consecuencia, el equilibrio natural de los ecosistemas acuáticos. Por esta razón, el oxígeno disuelto es un indicador importante de la calidad de las aguas. (p. 216).

3. Características biológicas de las aguas residuales.

De acuerdo a la composición de las aguas residuales, en estas puede existir la presencia de una gran variedad de organismos vivientes, siendo estos los principales responsables de las enfermedades de origen hídrico: fiebre, tifoidea, paratifoidea, cólera,

disentería colibacilar y amibiana. La gran cantidad de huevos y larvas asociadas con las heces y orinas producidas por el organismo humano y otros animales, tales como huevos de gusanos. Dentro de toda la gran cantidad de organismos presentes en especial las bacterias, algas, protozoarios y otras formas inferiores, son de particular interés, ya que su actividad metabólica está íntimamente asociada con la estabilización (oxidación) de la variedad de complejos orgánicos presentes en las aguas residuales. (G. Rivas Mijares, 1978, p. 24).

3.1 Organismos Patógenos

“Los organismos patógenos que se encuentran en las aguas residuales pueden proceder de desechos humanos que estén infectados o que sean portadores de una determinada enfermedad. Las principales clases de organismos patógenos presentes en las aguas residuales son las bacterias, los virus, los protozoos y el grupo de los helmintos. Los organismos bacterianos patógenos que pueden ser excretados por el hombre causan enfermedades del aparato intestinal. Debido a la alta infecciosidad de estos organismos, cada año son responsables de gran número de muertes en países con escasos recursos sanitarios, especialmente en zonas tropicales”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 106).

3.2 Bacterias

“Las bacterias cumplen un papel fundamental, ya que ellas actúan en los procesos de descomposición y estabilización de la materia orgánica, bien sea en el medio natural como en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Las bacterias presentes en el agua residual pueden ser de orígenes fecales o implicados en el proceso de biodegradación. Son afectadas por variaciones de temperatura y pH, a medida que la temperatura aumenta, las bacterias también lo hacen, mientras que a una temperatura baja inhibe su desarrollo y crecimiento. La mayoría de las bacterias no toleran niveles de pH por debajo de 4 ni superiores a 9,5. En general, el pH óptimo para el crecimiento bacteriano se encuentra entre 6,5 y 7,5”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 417).

“Los coliformes son bacterias que se emplean como indicadores de la contaminación por desechos humanos”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 104).

3.3 Hongos

“Son protistas eucariotas, multicelulares, no fotosintéticos y quimioheterótrofos. Muchos de los hongos basan su alimentación en materia orgánica muerta. Junto con las bacterias, los hongos son los principales responsables de la descomposición del carbono en la biósfera. Sin la colaboración de los hongos en los procesos de degradación de la materia orgánica el ciclo del carbono se interrumpiría en poco tiempo, y la materia orgánica empezaría a acumularse”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 104).

3.4 Algas

“Pueden presentar serios inconvenientes en aguas superficiales, puesto que pueden reproducirse rápidamente cuando las condiciones son favorables. Este fenómeno, que se conoce con el nombre de crecimiento explosivo, puede conducir a que ríos, lagos y embalses sean cubiertos por grandes colonias flotantes de algas. Los crecimientos son característicos de los llamados lagos eutróficos, que son lagos con gran contenido de compuestos necesarios para el crecimiento biológico”. (Metcalf & Eddy 1995, p. 104).

CARGAS ORGÁNICAS PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.

Según Rolim Mendonça, S., (2000) “la carga orgánica se expresa en Kg de DBO por día o kg de sólidos suspendidos por día, y el caudal, en l/s o $m^3/día$ ”, y se calculan de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$\text{Carga orgánica (kg/día)} = \frac{\text{Concentración(g/m}^3\text{)} \times \text{Caudal(l/s)} \times 86.400(\text{s/día})}{10^6(\text{g/kg})(\text{l/m}^3)} \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$\text{Carga orgánica (kg/día)} = \frac{\text{Concentración(mg/l)} \times \text{Caudal(m}^3\text{/día)}}{10^6 \text{(mg/kg)}(\text{m}^3\text{/l)}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

PROBLEMAS QUE GENERA EL VERTIDO DE AGUAS RESIDUALES

Según el manual titulado “Manual de depuración de aguas residuales urbanas” Autor: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA) (2008), se encuentra lo siguiente:

El vertido de aguas residuales urbanas sin depurar ejerce sobre los cauces receptores toda una serie de efectos negativos, de entre los que cabe destacar:

- a. Aparición de fangos y flotantes. La fracción sedimentable de los sólidos en suspensión origina sedimentos en el fondo de los cauces. Además, la fracción no sedimentable da lugar a la acumulación de grandes cantidades de sólidos en la superficie y/o en las orillas de los cauces receptores formando capas de flotantes.
- b. Agotamiento del contenido de oxígeno presente en las aguas. Los componentes de las aguas residuales fácilmente oxidables comenzarán a ser degradados vía aerobia por la flora bacteriana de las aguas del cauce, con el consiguiente consumo de parte del oxígeno disuelto en la masa líquida. Si este consumo es excesivo, el contenido en oxígeno disuelto descenderá por debajo de los valores mínimos necesarios para el desarrollo de la vida acuática. Consumido el oxígeno disponible, los procesos de degradación vía anaerobia generarán olores desagradables, al liberarse gases que son los causantes de estos olores.
- c. Aportes excesivos de nutrientes. Las aguas residuales contienen nutrientes (N y P principalmente) causantes del crecimiento descontrolado de algas y otras plantas en los cauces receptores (eutrofización). Este crecimiento excesivo de biomasa puede llegar a impedir el empleo de estas aguas para usos domésticos e industriales.

- d. Daños a la salud pública. Los vertidos de aguas residuales sin tratar a cauces públicos pueden fomentar la propagación de organismos patógenos para el ser humano (virus, bacterias, protozoos y helmintos). Entre las enfermedades que pueden propagarse a través de las aguas contaminadas por los vertidos de aguas residuales urbanas, destacan: el tifus, el cólera, la disentería y la hepatitis A. (p.25).

TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

Las instalaciones para el tratamiento de las aguas residuales urbanas constan de tres elementos principales:

- Recogida y conducción de las aguas residuales hasta la estación de tratamiento.
- Tratamiento propiamente dicho de las aguas residuales.
- Evacuación de los productos resultantes del tratamiento: efluentes depurados y lodos. (Manual de depuración de aguas residuales urbanas. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.26).

1. Recogida y conducción

La recogida y conducción de las aguas residuales desde donde se generan hasta la estación depuradora se realiza a través de una compleja red de tuberías (alcantarillado, colectores). Dependiendo de la topografía, las aguas discurrirán por gravedad o será necesario recurrir a su bombeo. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.26).

2. Tratamiento

El tratamiento de las aguas residuales consta de un conjunto de operaciones físicas, biológicas y químicas, que persiguen eliminar la mayor cantidad posible de contaminantes antes de su vertido, de forma que los niveles de contaminación que queden en los efluentes tratados cumplan los límites legales existentes y puedan ser asimilados de forma natural por los cauces receptores.

En las depuradoras convencionales de aguas residuales se distinguen dos líneas de tratamiento, la línea de agua y la línea de lodos.

2.2 La línea de agua

Incluye los procesos o tratamientos que permiten reducir los contaminantes presentes en las aguas residuales. Consta de cuatro etapas, pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

Tabla 5. *Etapas de la línea de agua en el tratamiento de las aguas residuales urbanas.*

	Pretratamiento	Tratamiento primario	Tratamiento secundario	Tratamiento terciario
Objetivo	Eliminación de objetos gruesos, arenas y grasas.	Eliminación de material sedimentable y flotante	Eliminación de materia orgánica disuelta o coloidal	Eliminación de sólidos en suspensión, materia orgánica residual, nutrientes y patógenos
Operaciones básicas	Desbaste, tamizado, desarenado, desengrasado.	Decantación primaria, coagulación y floculación	Degradación bacteriana y decantación secundaria	Floculación, filtración eliminación de N y P, desinfección.
Tipo de procesos	Físicos	Físicos y químicos	biológicos	Físico, químicos y biológicos

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

2.2.1 Pretratamiento

Las aguas residuales antes de su tratamiento, propiamente dicho, se someten a un pretratamiento, que comprende una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias, que, por su naturaleza o tamaño, pueden dar lugar a problemas en las etapas posteriores del tratamiento. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.28).

Medidor Parshall

El medidor Parshall está incluido en el régimen de flujo crítico. Consiste en una estructura de paredes verticales, constituida a partir de la entrada por un trecho convergente con el fondo, en los sentidos longitudinales y transversales, de un trecho contraído y de una sección divergente en pendiente, dispuesta en planta y en corte.

Además de la facilidad con que pueden constituirse esos medidores, presentan la ventaja de depender de sus propias características hidráulicas, por ejemplo, una sola determinación de carga es suficiente, la pérdida de carga es reducida, posee sistemas de auto-limpieza que hace que no haya obstáculos capaces de provocar la formación de depósitos. Pueden fabricarse de PVC o fibra de vidrio, pudiendo ser montados en el sitio, aumentando su precisión, etc. (Rolim Mendonça, 2000, p.183-184).

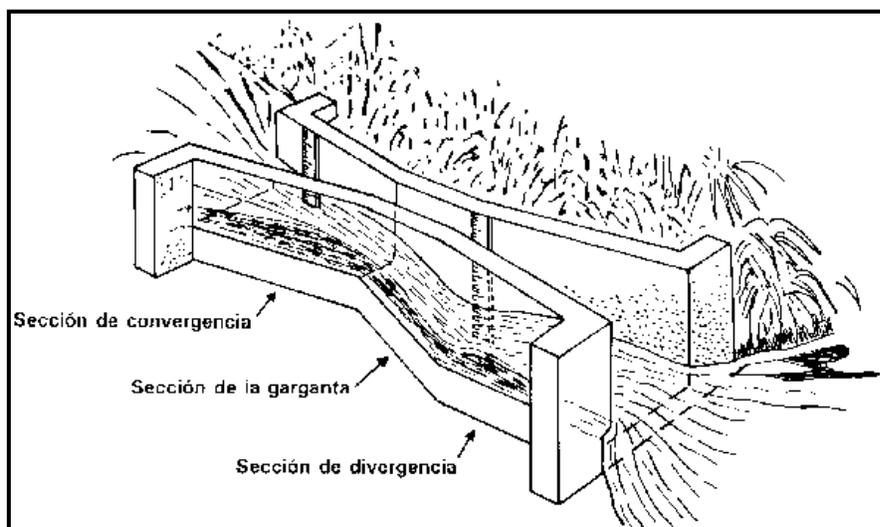


Figura 1. Canal de aforo Parshall.

Fuente: Manuel Vicente Méndez, 2009.

Desbaste

El objetivo del desbaste es la eliminación de los sólidos de pequeño y mediano tamaño (trozos de madera, trapos, raíces, etc.) que de otro modo podrían deteriorar o bloquear los equipos mecánicos y obstruir el paso de la corriente de agua.

El procedimiento más usual consiste en hacer pasar las aguas a través de rejillas que, de acuerdo con la separación entre los barrotes, pueden clasificarse en:

- Desbaste de gruesos: el paso libre entre los barrotes es de 50 a 100 mm.
- Desbaste de finos: el paso libre entre los barrotes es de 10 a 25 mm.

(Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.29).

Tamizado

Tiene por objeto la reducción del contenido en sólidos en suspensión de las aguas residuales, mediante su filtración a través de un soporte delgado dotado de ranuras de paso. Se distingue entre tamices estáticos auto-limpiantes, tamices rotativos y tamices deslizantes. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.29).

Desarenado

Tiene por objetivo la eliminación de materias pesadas de tamaño superior a 0,2 mm, para evitar que sedimenten en canales y conducciones y otros elementos de la abrasión. Aparte de las arenas propiamente dichas, en esta operación se eliminan también gravas y partículas minerales, así como elementos de origen orgánico, no putrescibles (granos de café, semillas, huesos, cáscaras de frutas y huevos, etc.). Los canales desarenadores pueden ser de flujo variable o de flujo constante. Los canales desarenadores de flujo variable se emplean en pequeñas instalaciones de depuración, y en ellos las arenas se extraen manualmente de un canal longitudinal, con una capacidad para el almacenamiento de arenas de 4-5 días. Los canales desarenadores de flujo constante mantienen una velocidad de paso fija, en torno a 0,3 m/s, independientemente del caudal que los atraviesa, con lo que se logra que sedimente la mayor parte de las partículas de origen inorgánico y la menor parte posible de las de origen orgánico (< 5% de materia orgánica). (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.31).

Desengrasado

En esta etapa se eliminan las grasas y demás materias flotantes más ligeras que el agua. Dentro de los desengrasadores se distinguen dos tipos, los estáticos y los aireados. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.31).

Medición de caudal

Aunque los dispositivos que se emplean para la medición de los caudales no ejercen ningún efecto de depuración sobre las aguas residuales, juegan un papel muy importante en el proceso global pues permiten la determinación de los caudales de aguas a tratar y los realmente tratados. Esto posibilita, a su vez, ajustar las condiciones operativas de las distintas etapas del tratamiento, así como obtener el coste del tratamiento por unidad de volumen tratado. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.33).

2.2.2. Tratamientos primarios

Según el manual titulado “Manual de depuración de aguas residuales urbanas” Autor: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA) (2008), se encuentra lo siguiente:

El tratamiento primario se define como el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso físico o fisicoquímico que incluya la sedimentación de sólidos en suspensión, u otros procesos en los que la DBO₅ de las aguas residuales que entren, se reduzca, por lo menos, en un 20% antes del vertido, y el total de sólidos en suspensión en las aguas residuales de entrada se reduzca, por lo menos, en un 50%.

El principal objetivo de los tratamientos primarios se centra en la eliminación de sólidos en suspensión, consiguiéndose además una cierta reducción de la contaminación biodegradable, dado que una parte de los sólidos que se eliminan está constituida por materia orgánica. Los tratamientos primarios más habituales son la decantación primaria y los tratamientos fisicoquímicos.

- Decantación primaria: su objetivo es la eliminación de la mayor parte posible los sólidos sedimentables, bajo la acción exclusiva de la gravedad. La retirada de estos sólidos es muy

importante ya que, en caso contrario, originarían fuertes demandas de oxígeno en el resto de las etapas de tratamiento de la estación.

- Tratamientos fisicoquímicos: en este tipo de tratamiento, mediante la adición de reactivos químicos, se consigue incrementar la reducción de los sólidos en suspensión, al eliminarse, además, sólidos coloidales, al incrementarse el tamaño y densidad de los mismos mediante procesos de coagulación-floculación.

Los tratamientos fisicoquímicos se aplican fundamentalmente:

- Cuando las aguas residuales presentan vertidos industriales que pueden afectar negativamente al tratamiento biológico.
- Para evitar sobrecargas en el posterior tratamiento biológico.
- Cuando se dan fuertes variaciones estacionales de caudal.
- Para la reducción del contenido en fósforo. (p.34).

2.2.3 Tratamientos secundarios y biológicos.

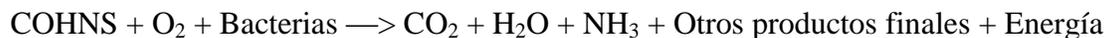
Según el manual titulado “Manual de depuración de aguas residuales urbanas” Autor: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA) (2008), se encuentra lo siguiente:

Se define tratamiento secundario como, el tratamiento de aguas residuales urbanas mediante un proceso que incluya un tratamiento biológico con sedimentación secundaria u otro proceso en el que se consiga la eliminación de materia orgánica.

El tratamiento biológico se realiza con la ayuda de microorganismos, fundamentalmente bacterias que en condiciones aerobias actúan sobre la materia orgánica presente en las aguas residuales.

Una parte de la materia orgánica se oxida por la flora bacteriana, que obtiene de esta forma la energía necesaria para el mantenimiento celular. De forma simultánea, otra fracción de materia orgánica se convierte en un nuevo tejido celular, este proceso es llamado síntesis celular, empleándose para ello la energía liberada en la fase de oxidación.

Oxidación



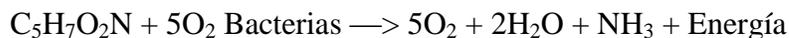
Síntesis



Donde COHNS representa los elementos predominantes en la materia orgánica presente en las aguas residuales y $\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ representa la composición media de los microorganismos encargados de la biodegradación de la materia orgánica. (Hoover y Porges, 1952).

Finalmente, cuando se consume la materia orgánica disponible, las nuevas células empiezan a consumir su propio tejido celular con el fin de obtener energía para el mantenimiento celular. Este tercer proceso se conoce como respiración endógena.

Respiración endógena



El aporte de oxígeno para el mantenimiento de las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, se efectúa introduciendo, generalmente, aire en los recipientes en que se llevan a cabo estas reacciones, recipientes que se conocen con el nombre de reactores biológicos o cubas de aireación.

Las nuevas bacterias que van apareciendo en los reactores, como consecuencia de las reacciones de síntesis, tienden a unirse, formando agregados de mayor densidad que el líquido circundante, y en cuya superficie se va absorbiendo la materia en forma coloidal.

Para la separación de estos agregados, conocidos como lodos o fangos, el contenido de los reactores biológicos (licor de mezcla), se conduce a una etapa posterior de sedimentación (decantación o clarificación secundaria), donde se consigue la separación de los lodos de los efluentes depurados por la acción de la gravedad.

De los lodos decantados una fracción se purga como lodos en exceso, mientras que otra porción se recircula al reactor biológico para mantener en él una concentración determinada de microorganismos.

El proceso descrito se conoce como «lodos activos». Fue desarrollado en 1914 en Inglaterra por Arden y Lockett y, hoy en día, esta tecnología en sus distintas modalidades (convencional, contacto-estabilización, aireación prolongada, etc.) es la más ampliamente aplicada a nivel mundial para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. (p.35).

2.2.4 Tratamientos terciarios

Los tratamientos terciarios (conocidos también como tratamientos avanzados, más rigurosos, complementarios, etc.) permiten obtener efluentes finales de mejor calidad para que puedan ser vertidos en zonas donde los requisitos son más exigentes o puedan ser reutilizados. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.37).

La eliminación de materia particulada y coloidal presente en los efluentes depurados, puede lograrse mediante la aplicación de tratamientos fisicoquímicos (coagulación floculación) y la posterior etapa de separación (decantación, filtración). (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.37).

Para la eliminación de nutrientes (nitrógeno y fósforo), se recurre cada vez más al empleo de procesos biológicos. No obstante, el caso del de fósforo, los procesos de precipitación química, empleado sales de hierro y de aluminio, continúan siendo los de mayor aplicación. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.37).

En la eliminación biológica de nitrógeno se opera de forma secuencial, bajo condiciones óxicas y anóxicas, que dan como resultado final su liberación a la atmósfera, en forma de nitrógeno gaseoso. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.38).

Para la eliminación biológica del fósforo se combinan reactores operando bajo condiciones anaerobias, óxicas y anóxicas, quedando el fósforo almacenado en los microorganismos, que posteriormente se extraen como lodos en exceso. Combinando los procesos anteriores también es posible la eliminación conjunta de ambos nutrientes. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.38).

Con relación a la desinfección de los efluentes depurados, si bien el cloro ha sido, y continua siendo, el desinfectante típico en el campo de las aguas residuales, al incrementarse el número de requisitos para lograr bajas o indetectables cantidades de cloro residual en los efluentes tratados, se hace precisa la implantación de procesos posteriores de cloración, o bien, la sustitución de los sistemas de cloración por sistemas de desinfección alternativos, tales como la radiación UV, el empleo de ozono o el empleo de membranas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.38).

En la siguiente tabla se muestran los rendimientos medios de depuración que se alcanzan en función de tipo de tratamiento aplicado a las aguas residuales urbanas.

Tabla 6. Rendimientos medios de depuración, en %, en función de tipo de tratamiento.

	Sólidos en suspensión	DBO₅	Escherichia coli
Pretartamiento	5 – 15	5 – 10	10 – 25
Tratamientos primarios	40 – 70	25 – 40	25 – 70
Tratamientos secundarios	80 – 90	80 – 95	90 – 98
Tratamientos terciarios	90 – 95	95 – 98	98 - 99

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

2.3. Línea de lodos

En ella se tratan la mayor parte de los subproductos que se originan en la línea de agua. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.26).

El tratamiento de las aguas residuales conduce a la producción de unos subproductos conocidos como lodos o fangos. Cabe distinguir entre «lodos primarios» (sólidos decantados en el tratamiento primario) y «lodos secundarios o biológicos» (sólidos decantados en el clarificador tras el paso de las aguas por el reactor biológico). (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.39).

Espesamiento

Esta etapa del tratamiento incrementa la concentración de los lodos mediante la eliminación de parte del agua que contienen. Los métodos de espesamiento más habituales son por gravedad y por flotación, siendo éste último el más apropiado para el espesamiento de los lodos biológicos. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.39).

Estabilización

En esta fase se reduce la fracción biodegradable presente en los lodos, para evitar su putrefacción. La estabilización puede hacerse mediante:

- Digestión aerobia o anaerobia: se elimina en torno al 40-50% de la materia orgánica presente en el lodo.
- Estabilización química, mediante la elevación del pH por adición de cal.
- Tratamiento térmico. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.40).

Acondicionamiento

En esta etapa, mediante la adición de productos químicos, se mejora la deshidratación de los lodos facilitando la eliminación del agua. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.41).

3. Evacuación

En una estación depuradora la corriente entrante (aguas residuales urbanas), como consecuencia de los procesos de tratamiento a que se ve sometida, se transforma en dos corrientes salientes (efluentes depurados y lodos). Con la evacuación de ambas corrientes se da por finalizado el tratamiento de las aguas residuales urbanas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.43).

LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son sistemas de fitodepuración de aguas residuales. El sistema consiste en el desarrollo de un cultivo de macrófitas enraizadas sobre un lecho de grava impermeabilizado. La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.7).

Los humedales construidos se han utilizado para tratar una amplia gama de aguas residuales:

- a. Aguas domésticas y urbanas.
- b. Aguas industriales, incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y mataderos entre otros.
- c. Aguas de drenaje de extracciones mineras.
- d. Aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana.
- e. Tratamiento de fangos de depuradoras convencionales, mediante deposición superficial en humedales de flujo subsuperficial donde se deshidratan y mineralizan. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.7).

Estos sistemas purifican el agua mediante remoción del material orgánico (DBO), oxidando el amonio, reduciendo los nitratos y removiendo fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.7).

Los humedales eliminan contaminantes mediante procesos que incluyen sedimentación, degradación microbiana, acción de las plantas, absorción, filtración y volatilización, reemplazando así el tratamiento secundario e inclusive, bajo ciertas condiciones, al terciario y primario de las aguas residuales. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.7).

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios básicos: la actividad bioquímica de microorganismos, el aporte de oxígeno a través de los

vegetales durante el día y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de los vegetales, además de servir como material filtrante. En conjunto, estos elementos eliminan sólidos en suspensión y disueltos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.7).

La fitodepuración, se refiere a la depuración de aguas contaminadas por medio de plantas superiores (macrófitas) en los humedales o sistemas acuáticos, ya sean éstos naturales o artificiales. El término macrófitas, dado su uso en el lenguaje científico, abarca a las plantas acuáticas visibles a simple vista. Constituyen fitosistemas, porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales. Al realizar la planta sus funciones vitales, colabora en el tratamiento de las aguas. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.8).

Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden ser clasificados según el tipo de macrófitas que empleen en su funcionamiento:

- **Humedales basados en macrófitas de hojas flotantes**

Principalmente angiospermas sobre suelos anegados. El Jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*) y la lenteja de agua (*Lemna sp.*) son las especies más utilizadas para este sistema. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.8).

- **Humedales basados en macrófitas sumergidas**

Comprenden algunos helechos, numerosos musgos y carófitas y muchas angiospermas. Se encuentran en toda la zona fótica (a la cual llega la luz solar), aunque las angiospermas vasculares sólo viven hasta los 10 m de profundidad aproximadamente. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.8).

- **Humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes**

En general son plantas perennes en suelos anegados permanente o temporalmente. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.8).

En la figura 2 se sintetizan los distintos tipos de humedales artificiales:

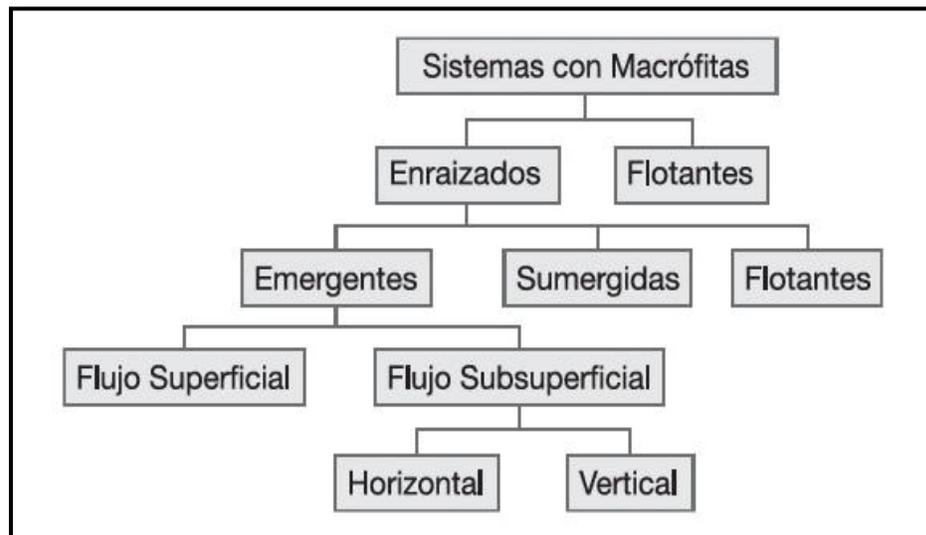


Figura 2. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas.

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010.

Los humedales basados en macrófitas enraizadas emergentes pueden ser de dos tipos, de acuerdo a la circulación del agua que se emplee.

1. Humedales artificiales de flujo superficial

Los sistemas de flujo superficial (conocidos en inglés como surface flow constructed wetlands o free water surface constructed wetlands) son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0,6 m) y tienen plantas. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.9).

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, et. Pueden constituirse, en lugares turísticos y en sitios de estudio de diferentes disciplinas por las complejas interacciones biológicas que se generan y establecen. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.9).

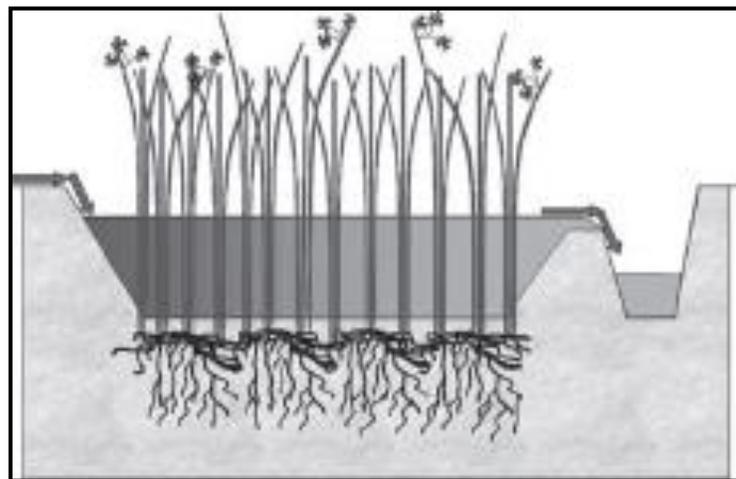


Figura 3. *Humedal artificial de flujo superficial.*

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010.

2. Humedales de flujo subsuperficial

Los sistemas de flujo subsuperficial (conocidos en inglés como subsurface flow constructed wetlands), se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular (subterráneo), con una profundidad de agua cercana a los 0,6 m. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. Los humedales de flujo subsuperficial pueden ser de dos tipos, en función de la forma de aplicación de agua al sistema: humedales de flujo subsuperficial horizontal y humedales de flujo subsuperficial vertical. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.9)

2.1 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977). El diseño de estos sistemas por lo general consiste en una cama, ya sea de tierra o arena y grava, plantada con macrófitas acuáticas, en la mayoría de los casos con la caña común o carrizo (*Phragmites australis*). Toda la cama es recubierta por una membrana impermeable para evitar filtraciones en el suelo. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

El agua ingresa en forma permanente y es aplicada en la parte superior de un extremo y recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de disipación de energía generalmente formada por grava de mayor tamaño. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje cribado, rodeado con grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava de ingreso y salida oscila entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por grava fina de un solo diámetro, en entre 3 mm a 32 mm. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

Es fundamental que el agua residual que ingresa al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5-10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

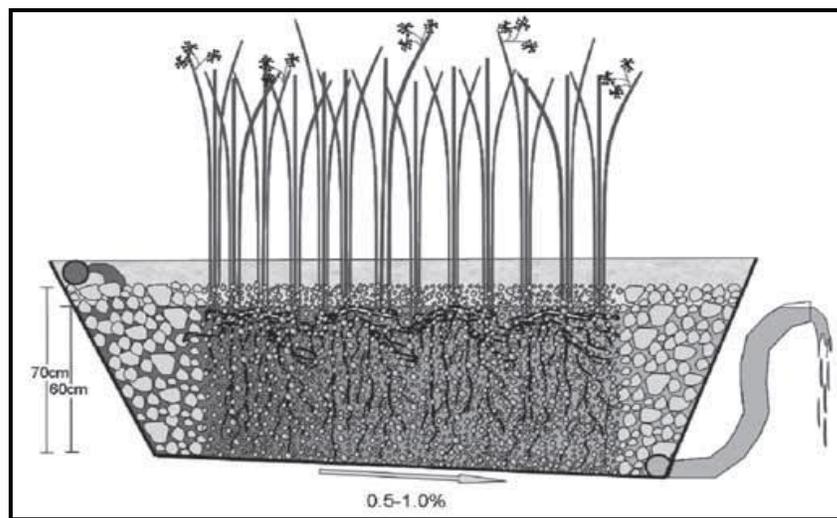


Figura 4. *Humedal subsuperficial de flujo horizontal (vista corte sección).*

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010.

2.2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades

de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama matriz, etc, y los resultados que se han obtenido son promisorios. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.10).

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también en este medio granular. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.11).

Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.11).

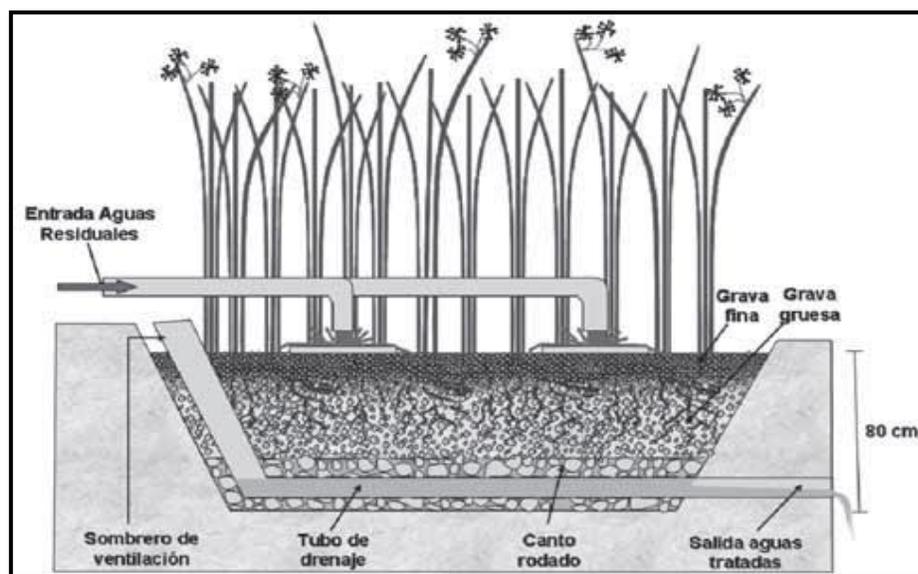


Figura 5. Humedal subsuperficial de flujo vertical (vista corte sección).

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010.

Partes de los humedales de flujo subsuperficial

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están constituidos básicamente por cuatro elementos: agua residual, sustrato, vegetación y microorganismos.

– Agua residual

Las aguas residuales son aquellas recolectadas después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por una red de alcantarillado que las conducirá hacia el humedal.

De acuerdo a Lara (1999), la hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal construido porque reúne todas las funciones del humedal y porque es a menudo el factor primario decisivo en su éxito o fracaso, por los siguientes motivos.

- a. Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- b. Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, un sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.
- c. La densidad de la vegetación en un humedal afecta fuertemente su hidrología, obstruyendo caminos de flujo del agua a través de la red de raíces y rizomas. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.12).

– Sustrato (medio granular)

En los humedales, el sustrato está formado por el suelo: arena, grava, roca, sedimentos y restos de vegetación que se acumulan en el humedal debido al crecimiento biológico. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad

suficiente para permitir el paso del agua a través de él. Esto obliga a utilizar suelos de tipo granular, principalmente grava seleccionada con un diámetro de 5 mm aproximadamente y con pocos finos. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.12).

El sustrato, sedimentos y los restos de vegetación en los humedales artificiales son importantes por varias razones:

- a. Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- b. La permeabilidad del sustrato afecta el movimiento del agua a través del humedal.
- c. Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del sustrato.
- d. Proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- e. La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. La materia orgánica da lugar al intercambio de materia, fijación de microorganismos y es una fuente de carbono que es a la vez, la fuente de energía para algunas de las más importantes reacciones biológicas en el humedal (Lara, 1999). Citado por (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.12).

El tamaño del medio granular afecta directamente al flujo hidráulico del humedal y por ende en el caudal de agua a tratar. Si el lecho granular está constituido por elevadas cantidades de arcilla y limo, se consigue una mayor capacidad de absorción y una mejor filtración, ya que la absorción es alta y el diámetro de los huecos es pequeño. Pero también este medio presenta una elevada resistencia hidráulica y requiere velocidades de flujo muy bajas, limitando el caudal a tratar. Por el contrario, si el lecho granular está formado por

gravas y arenas, disminuye la capacidad de absorción y el poder filtrador del medio, pero aumenta la conductividad hidráulica. Citado por (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.12).

De forma indirecta, el medio granular contribuye a la eliminación de contaminantes porque sirve de soporte de crecimiento de las plantas y colonias de microorganismos que llevan a cabo la actividad biodegradadora (biopelículas).

– **Vegetación**

El papel de la vegetación en los humedales está determinado fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Las plantas son organismos foto autótrofos, es decir que recogen energía solar para transformar el carbono inorgánico en carbono orgánico. Tienen la habilidad de transferir oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces. Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos utilizan el oxígeno disponible para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.13).

De acuerdo a Lara (1999), las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras:

- a. Estabilizan el sustrato y limitan la canalización del flujo.
- b. Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- c. Toman el carbono, nutrientes y elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- d. Transfieren gases entre la atmósfera y los sedimentos.

- e. El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato.
- f. El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.

– **Microorganismos**

Los microorganismos se encargan de realizar el tratamiento biológico. En la zona superior del humedal, donde predomina el oxígeno liberado por las raíces de las plantas y el oxígeno proveniente de la atmósfera, se desarrollan colonias de microorganismos aerobios. En el resto del lecho granular predominarán los microorganismos anaerobios. Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de la materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza (Arias, 2004).

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. La biomasa microbiana consume gran parte del carbono y muchos nutrientes. La actividad microbiana tiene la función de transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas e insolubles y alterar las condiciones de potencial de reducción y oxidación del sustrato afectando así a la capacidad de proceso del humedal. Asimismo, gracias a la actividad biológica, muchas de las sustancias contaminantes se convierten en gases que son liberados a la atmósfera (Lara, 1999).

Mecanismos de remoción de contaminantes

En la siguiente tabla, se muestran los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales artificiales.

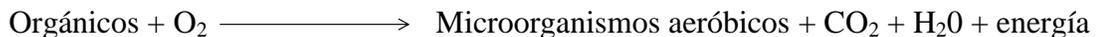
Tabla 7. *Procesos y mecanismos que ocurren en los humedales artificiales.*

Parámetro evaluado	Mecanismo de remoción
Sólidos suspendidos	– Sedimentación/filtración
DBO	– Degradación microbiana (aerobia y anaerobia) – Sedimentación (acumulación de materia orgánica/ lodo en la superficie del sedimento)
Nitrógeno amoniacal	– Amonificación, nitrificación y desnitrificación amoniacal – Captado por la planta
Patógenos	– Sedimentación/filtración – Declinación – Radiación UV – Excreción de antibióticos por las raíces de las macrófitas

Fuente: Brix, 1993; citado por Kolb, 1998.

– **Remoción de sólidos suspendidos**

Aunque la mayor parte de los sólidos suspendidos y sedimentables son removidos en el tratamiento previo, los humedales filtran y sedimentan los remanentes, complementando esta remoción. En efecto, las raíces de las macrófitas y el sustrato reducen la velocidad del agua, favoreciendo ambos procesos. El tratamiento previo es muy importante para evitar obstrucciones y la rápida colmatación del humedal. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.14).



– **Remoción de materia orgánica**

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los

cuales están adheridos a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos. (Brix en Kolb, 1998).

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos o autótrofos. Los heterótrofos requieren material orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono. (Gray en Kolb, 1998).

Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación-reducción como fuente de energía para todas las síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente (Cooper, 1996). Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.15).

– **Remoción de nitrógeno**

Al momento que ingresa agua residual al humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de un compuesto inestable, que es fácilmente transformado a amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógeno en humedales construidos son la nitrificación y la denitrificación, que ocurren en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos, iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y denitrificación. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.15).

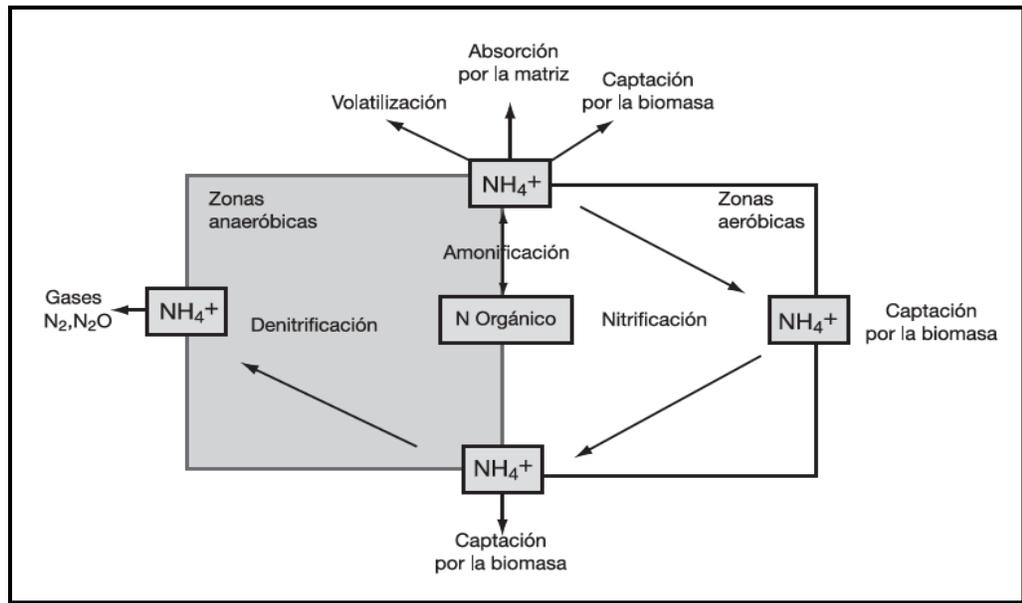


Figura 6. Diagrama del metabolismo del nitrógeno.

Fuente: Cooper et al., 1996.

– Remoción de metales pesados

Los metales traza tienen una alta afinidad para la absorción y complejización con material orgánico y se acumulan en la matriz de un humedal construido. Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo las primeras las formas más biodisponibles. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.17).

La absorción involucra la unión de las partículas (o sustancias disueltas en solución), en partes de la planta o a la superficie de la matriz. En una reacción de intercambio catiónico, los iones metálicos positivamente cargados en solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material absorbente. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.17).

La fuerza atractiva para el intercambio catiónico es electrostática y la medida de esta fuerza depende de un amplio rango de factores. La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un material es una medida del número de puntos de unión por masa o volumen. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.18).

– **Remoción de bacterias**

Los organismos importantes, desde el punto de vista de la salud pública son las bacterias patógenas y los virus. Todos los patógenos son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, y más aún, en agua con temperaturas más frías y con presencia de polución orgánica (como en las aguas residuales). (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.18).

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen la predación y ataque por bacteriófagos y también la muerte (declinación die-off). (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.18).

Funciones de las macrófitas en los mecanismos de remoción

Las macrófitas están adaptadas a crecer bajo condiciones de suelos saturados por agua, porque tienen desarrollado un sistema de grandes espacios aéreos internos. Estos sistemas internos les permiten la provisión de aire bajo condiciones de suelo saturado con agua desde la atmósfera hacia las raíces y rizomas. En algunas especies este sistema ocupa más del 60% del volumen total del tejido. (Brix en Kolb, 1998).

Las macrófitas poseen varias propiedades que hacen de ellas un importante componente de los humedales construidos. Entre estas propiedades, los efectos físicos como la estabilización de la superficie de los humedales construidos y la prevención de

taponamientos de la matriz son muy importantes. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.18).

Proveen buenas condiciones para la filtración física y una superficie grande para el crecimiento microbiano adjunto. Otra de sus propiedades es la transferencia de oxígeno a la rizósfera. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.18).

En la siguiente tabla se muestra los rendimientos medios de depuración que se alcanzan con el empleo de humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Tabla 8. *Rendimientos medios de depuración en humedales artificiales de flujo subsuperficial.*

Parámetro	%
Sólidos en suspensión	85 – 95
DBO ₅	85 – 95
DQO	80 – 90
N	20 – 40
P	15 – 30
Coliformes fecales	90 – 99

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

Tipos de plantas utilizadas en humedales artificiales en climas subtropical y tropical.

– Papiros o Papyrus

Papiro egipcio, son decorativos, pero tienen los problemas que crecen hasta 3m de altura, tiende a formar una capa de materia orgánica en la superficie, y las plantas crecen solo por esquejes de la raíz de la planta madre.

Papiro Paraguas - *albostratus* C. y *C. alternifolius*, plantas muy resistentes, también son excelentes para una mayor concentración de aguas residuales o contenido de sal.

Papiro Enano - *C.haspens*; excelente cuando es el único cultivo, y no sobrevive a la sombra de plantas más grandes. (Dra. Elisabeth von Münch, 2009).

– Bambú, pequeña especie ornamental decorativa. Presenta problemas de crecimiento lento, especialmente en los primeros 3 años (depende del clima). (Dra. Elisabeth von Münch, 2009).

– Junco, *Typha latifolia* (en climas tropicales son más resistentes que el *Phragmites australis*) Es una de las plantas más altas del género, ya que puede alcanzar los 3 m de altura. Tiene grandes matas de follaje verde medio, esta especie puede ser extremadamente invasiva. (Dra. Elisabeth von Münch, 2009).

Especies del género *Heliconia* son decorativas, pero hay que tener en cuenta que algunas de estas especies prefieren media sombra y otras son de condiciones de bastante luz solar. (Dra. Elisabeth von Münch, 2009).

Ventajas y desventajas de los humedales artificiales

– **Entre las ventajas destacan:**

- a. Sencillez operativa, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y al corte y retirada de la vegetación una vez seca.
- b. Consumo energético nulo si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales.
- c. Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
- d. En el caso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial de flujo horizontal, al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga.
- e. Posible aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal).

- f. Los humedales de flujo superficial permiten la creación y restauración de zonas húmedas aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo.
- g. Mínima producción de olores al no estar expuestas al aire las aguas a tratar en los humedales de flujo subsuperficial y por alimentarse con efluentes ya depurados los humedales de flujo superficial.
- h. Perfecta integración ambiental.

– **Como principales desventajas pueden citarse:**

- a. Exigen más superficie de terreno para su implantación que las tecnologías convencionales de depuración, lo que puede repercutir grandemente en los costes de construcción si conlleva la adquisición de los terrenos.
- b. Larga puesta en marcha que va desde meses a un año en sistemas de flujo subsuperficial, hasta varios años en los sistemas de flujo superficial.
- c. Los humedales de flujo subsuperficial presentan riesgos de colmatación del sustrato, si este no se elige convenientemente, no funcionan correctamente las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
- d. Pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
- e. Pérdidas de agua por evapotranspiración, lo que incrementa la salinidad de los efluentes depurados.
- f. Posible aparición de mosquitos en los humedales de flujo libre. Los humedales artificiales presentan pocas posibilidades de actuación y control ante modificaciones de las condiciones operativas, por lo que es muy importante que estén bien concebidos, dimensionados y construidos. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.258).

DISEÑO DE HUMEDALES

El diseño hidráulico de un humedal es crítico para obtener buenos rendimientos en la eficiencia de depuración. En los modelos de diseño se asume un flujo en condiciones uniformes y de tipo pistón. Para llegar a poder intentar acercarse al modelo ideal (flujo pistón) es muy importante realizar un cuidadoso diseño hidráulico y los métodos constructivos apropiados. El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales. La energía para romper esta resistencia está dada por la pérdida de carga entre el ingreso y salida del humedal, para dar esta energía se le asigna al fondo del humedal una pendiente con una salida de altura variable. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.31).

Para el diseño de humedales se deben considerar los siguientes criterios:

1. Se consideran reactores biológicos.
2. Se considera que el flujo a través del medio poroso es flujo pistón y en forma uniforme.
3. La ley de Darcy describe el flujo a través del medio poroso.

Existen dos tipos de humedales de flujo subsuperficial:

- Humedal subsuperficial de flujo horizontal.
- Humedal subsuperficial de flujo vertical.

1. Diseño de humedales subsuperficiales de flujo horizontal

Para el diseño de este tipo de humedales los pasos a seguirse son:

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.

– Relación largo – ancho

1.1 Cálculo del área superficial

El cálculo de los humedales se realiza en función al parámetro contaminante que se desea disminuir o remover, generalmente los diseños se realizan para disminución de la DBO₅, metales pesados y organismos patógenos.

La materia orgánica presente en forma de materia en suspensión sedimentable en las aguas residuales a tratar, irá decantando paulatinamente en los humedales y experimentará procesos de degradación biológica.

En los humedales artificiales la eliminación de DBO₅ y coliformes fecales se ajusta a modelos de cinética de primer orden, lográndose la mayor parte del abatimiento de los patógenos y DBO₅ en los primeros tramos de los humedales, de forma que hacia la mitad de los mismos ya se ha eliminado hasta un 80% de los mismos. La siguiente ecuación permite determinar la concentración final de coliformes fecales en un humedal.

$$N_e = \frac{N_i}{1+K_b \cdot t} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Donde:

N_e = número de coliformes fecales/100 ml en el efluente

N_i = número de coliformes fecales/100 ml en el afluente

K_b = constante de velocidad para la eliminación de coliformes (d^{-1})

t = tiempo de retención (d)

La constante de reacción de primer orden se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k_t = 1,104 * 1,06^{T_2-20} \quad \text{Constante de remoción de DBO}_5 \quad (\text{Ecuación 12})$$

$$k_t = 2,6 * 1,19^{T_2-20} \quad \text{Constante de remoción de Coliformes (Ecuación 13)}$$

Donde:

T2 = temperatura del agua (°C)

Del libro Wastewater Engineering: Treatment, de Tchobanoglous, 1991, se obtiene la ecuación del tiempo de retención hidráulico.

El tiempo de retención hidráulico (días) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$t = \frac{-\text{LN}\left(\frac{C}{C_0}\right)}{Kt} \quad \text{(Ecuación 14)}$$

La profundidad del humedal generalmente varia de 0,3 a 1 m (valor usual 0,6m), con una pendiente de 0,1 a 1%, siendo el valor usual de 0,5%.

1.2 Sustrato

Para el diseño del sustrato se recomienda utilizar grava con menos de 30 mm (3/4") de diámetro que parece ser la que funciona mejor. Si se utiliza grava con diámetros muy grandes de sustrato, origina que se incremente la velocidad del paso del agua, resultando en un flujo turbulento y que no se cumpla la ley de Darcy para el diseño. Caso contrario ocurre con grava de tamaño demasiado pequeño, esta reduce la velocidad del paso de agua originando zonas con presencia de agua en la superficie y flujos preferenciales, pero tienen la ventaja de proporcionar una mayor área superficial para la actividad microbiana y la absorción. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.32).

Antes del inicio del diseño se recomienda realizar pruebas de conductividad y porosidad del sustrato (grava), esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Asimismo, se recomienda multiplicar el valor de la conductividad por 1/3 o bien

por 0.1 (10%) para evitar problemas de atascamiento por acumulación de lodos, raíces y otros. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.32).

En el siguiente cuadro se muestra las características principales de los sustratos usados en los humedales.

Tabla 9. *Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.*

Tipo de Medio	Tamaño efectivo d10* (mm)	Porosidad (ps)	Conductividad hidráulica (m/d)
Arena media	1	0,30	492
Arena gruesa	2	0,32	984
Arena pedregosa	8	0,35	4920
Grava mediana	32	0,40	9840
Grava gruesa	128	0,45	98400

d10* es el diámetro de una partícula en una distribución de peso de partículas que es más pequeña que todas, menos el 10% de la partículas.

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.36.

Para calcular el ancho del humedal consideramos la ley de Darcy, para flujo en medio poroso.

Principio de Darcy para flujo en medios porosos

$$As = \frac{Q \cdot t}{ps \cdot d} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

As= Área superficial m²

Q= caudal medio del afluente en m³/d

t= Tiempo de retención hidráulico (días)

ps = Porosidad del sustrato

d= Profundidad de la lámina de agua (m)

El ancho del humedal (m) se determina en función al área vertical y la profundidad del nivel de agua a tratar.

1.3 Cálculo del ancho del humedal

$$W = \left(\frac{As}{Ra}\right)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 16})$$

Donde:

As = Área superficial (m²)

Ra = Proporción Long/ancho. Se recomienda una proporción 2:1 para garantizar un comportamiento de flujo pistón

1.4 Cálculo del largo humedal

$$L = \frac{As}{W} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

As = Área superficial del humedal (m²)

W= ancho del humedal (m)

Según Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, (2010), mientras mayor es la relación largo-ancho se tiene mejor depuración de las aguas, pero se tiene problemas de cortocircuitos, flujos preferenciales, presencia de agua sobre el lecho de grava y otros. Por ello se recomienda relación largo – ancho de: 2 a 1, 3 a 1 y 4 a 1.

En el siguiente cuadro se muestra un resumen de los principales parámetros de diseño de los humedales sub superficiales de flujo horizontal.

Tabla 10. *Parámetros de diseño de los humedales sub superficiales de flujo horizontal.*

Parámetros	Unidad	Intervalos	Valor usual
Tiempo de retención hidráulico	Días	4 – 15	7
Profundidad de agua	M	0,1 – 0,8	0,6
Área	m ² /heq	2,5 – 5	
Carga orgánica	g DBO ₅ / m ² .di	3 – 7,5	<11
Carga orgánica	kg DBO ₅ / heq.di	<7	
Carga hidráulico	m ³ /m ² .dia	0,1 – 0,2	
Características constructivas			
Grava ingreso salida	Mm	50 – 100	50
Grava media	Mm	3 – 6	19
		5 – 10	
		6 – 12	
Coefficiente de uniformidad		3 – 5	<5
Profundidad medio	M	0,70 – 1,5	0,7
Pendiente	%	0 – 1	0,5
Relación largo-ancho		2:1 – 7:1	3:1
Drenaje			
Tubería perforada	Pulgada	3 – 4	4
Distribución de agua			
tubería perforada – canal	Pulgada	2 – 4	3

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010).

2. Diseño de humedales subsuperficiales de flujo vertical

Para el cálculo del área superficial generalmente el diseño está en función a las poblaciones equivalentes.

La aplicación del agua residual se realiza en forma intermitente, a través de unas tuberías que se colocan encima del lecho de grava o arena. Para un mejor funcionamiento de estos humedales, se debe considerar siempre en el diseño la construcción de dos humedales para que operen en paralelo, es decir, que cada humedal tenga un periodo de reposo y un periodo de aplicación de agua. El periodo de reposo óptimo es que por cada periodo de alimentación se tenga dos periodos de reposo. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.35).

La frecuencia de aplicación del agua residual se calcula considerando que no quede agua en la superficie procedente de la aplicación riego anterior. Esta forma de operación

favorece la oxigenación del interior del lecho filtrante. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.35).

Para el diseño de este tipo de humedales se deben seguir los siguientes pasos:

- Cálculo del área necesaria.
- Profundidad del humedal.
- Pendiente.
- Sustrato.

2.1 Cálculo del área necesaria

El cálculo del área del humedal se realiza en función a: la población equivalente y si el humedal trabajará como tratamiento primario o secundario.

Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010) definen el cálculo de la población equivalente con la siguiente ecuación.

Fórmula para el cálculo de la población equivalente

$$\text{Poblacion equivalente (hab)} = \frac{\text{DBO}_5 \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) * \text{caudal} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{d}}\right)}{60 \text{gr} \frac{\text{DBO}_5}{\text{hab}} * \text{dia}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

El humedal trabaja como tratamiento primario cuando se aplica aguas residuales pretratadas, es decir, aguas que fueron sometidas a un pretratamiento físico (rejillas de desbaste y desarenador). (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.35).

El humedal trabaja como tratamiento secundario, cuando las aguas residuales a aplicarse al humedal ya recibieron un tratamiento primario ya sea por un tanque séptico, reactor UASB, IMHOFF, lagunas anaerobias, u otro método. Para ambos casos se

establecieron ecuaciones que determinan las áreas superficiales de los humedales, como se puede apreciar en la siguiente relación. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.35).

Humedal como tratamiento primario

- 1,2 m²/ P para sistemas de alcantarillado separativo
- 1,5 m²/ P para sistemas de alcantarillado unitario

Humedal como tratamiento secundario

- 0,8 m²/ P para sistemas de alcantarillado separativo
- 1,0 m²/ P para sistemas de alcantarillado unitario

Crites y Tchobanoglous, (2000), calcula el área en base en la tasa hidráulica de aplicación con la siguiente ecuación.

2.2 Área superficial del humedal vertical

$$A_s = \frac{Q}{THA} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Y la tasa hidráulica de aplicación a partir de la siguiente ecuación

$$THA = \frac{TCH}{F} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde:

Q = caudal $m^3/día$

THA= Tasa hidráulica de aplicación (mm/dosis)

TCH= Tasa de carga hidráulica (mm/día)

F = Frecuencia de dosificación (dosis/día)

2.3 Profundidad del humedal

La profundidad del humedal suele ser de unos 60 a 80 cm. El agua fluirá a través del medio poroso y se recogerá en una red de tuberías de drenaje situada en el fondo del lecho. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.36).

2.3 Pendiente

La pendiente de la superficie del humedal es plana (0%), este debe ser realizado con mucho cuidado para evitar que se formen charcos de agua sobre la superficie. La pendiente del fondo o lecho del humedal varía de 0.5 a 2% pero generalmente se utiliza una pendiente ligera del 1%.(Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.36).

2.4 Sustrato

El sustrato está conformado por varias capas de material según el tipo de uso que se le dará al humedal (tratamiento primario o secundario). (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.36).

En el siguiente cuadro se muestran las características del sustrato para diseño de humedales verticales.

Tabla 11. *Características del substrato para el diseño de humedales verticales.*

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

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010).

Para el diseño de este tipo de humedales se requieren las siguientes condiciones.

Para humedales que funcionaran como tratamiento primario se requiere un coeficiente de uniformidad menor a 5, el caudal de aplicación del agua residual debe ser mayor al caudal de infiltración, y se debe tener en cuenta que el agua residual contiene partículas suspendidas, por ende la conductividad hidráulica se reduce. (Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade, 2010, p.36)

Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010) definen las siguientes ecuaciones.

Cálculo de la conductividad hidráulica para tratamiento primario

$$K_{sf} = 0,6 * K_s \quad (\text{Ecuación 21})$$

De la misma forma el cálculo del caudal de infiltración se muestra en la siguiente ecuación.

Cálculo del caudal de infiltración para tratamiento primario

$$Q_i = A_s * K_{sf} * 3600 \quad (\text{Ecuación 22})$$

Para humedales que funcionaran como tratamiento secundario la condición es que el caudal de aplicación sea mayor al caudal de infiltración y la fórmula del caudal de infiltración se reduce a:

$$Q_i = A_s * K_s * 3600 \quad (\text{Ecuación 23})$$

Donde:

Q_i = caudal de infiltración (m^3/h)

A_s = area superficial (m^2)

K_s = conductividad hidráulica (m/s)

En el siguiente cuadro se muestra las principales características de los sustratos empleados para el diseño y construcción de humedales verticales.

Tabla 12. *Materiales empleados en el diseño y construcción de humedales horizontales.*

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Conductividad hidráulica, K_s ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	100 – 1000
Arena gravosa	8	500 – 5000
Grava fina	16	1000 – 10000
Grava media	32	10000 – 50000
Roca gruesa	128	50000 – 250000

Fuente: Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010).

LAGUNAJE O LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN

Una instalación de depuración de aguas residuales mediante la tecnología de lagunaje consiste en medio artificial (balsas, conducciones, etc.), diseñado y construido para que en él se den, de forma controlada, los procesos autodepuradores que tienen lugar de forma natural en ríos y lagos. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.151).

El lagunaje constituye, en definitiva, un sistema natural de tratamiento con un coste mínimo de explotación y mantenimiento, lo que le hace especialmente atractivo para el tratamiento de las aguas de aquellas aglomeraciones urbanas que carecen de los recursos técnicos y financieros para hacer frente a tecnologías de depuración más sofisticadas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.151).

Según Rolim Mendonça, (2000), el tratamiento a través de lagunas tiene tres objetivos:

- Remover de las aguas residuales la materia orgánica que ocasiona la contaminación.
- Eliminar los microorganismos patógenos que representan un grave peligro para la salud.
- Utilizar su efluente para reutilización, con otras finalidades, como agricultura, por ejemplo.

El Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008), expresa que, se pueden distinguir cuatro zonas a lo largo del cauce de las lagunas.

- Zona de degradación próxima al vertido: en ella desaparecen los animales superiores al decaer rápidamente el contenido en oxígeno disuelto de las aguas.
- Zona de descomposición activa: se inician las reacciones de descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en el vertido, lo que origina el desprendimiento de gases malolientes, presentando las aguas una coloración negruzca.
- Zona de recuperación: comienza la degradación vía aerobia de los contaminantes vertidos, procediendo el oxígeno de fenómenos de reaireación superficial y, principalmente, de la actividad fotosintética de las microalgas que colonizan esta zona. Cesa la generación de malos olores y las aguas se clarifican paulatinamente.
- Zona de aguas limpias: el cauce, finalmente, recupera las condiciones existentes previas al vertido.

Las distintas etapas del tratamiento de las aguas residuales mediante la tecnología de lagunaje pueden asimilarse a las tres primeras zonas mencionadas. En el lagunaje anaerobio se dan los mismos procesos que en la zona de degradación próxima al vertido; en las lagunas facultativas los mismos que en la zona de descomposición activa; y en las lagunas de maduración los mismos que en la zona de recuperación. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.153).

Factores que influyen en el proceso de lagunaje

1. Radiación solar

Se define como la radiación total de luz directa, difusa o dispersa, que se recibe sobre una superficie horizontal, por unidad de superficie y unidad de tiempo.

La radiación que se recibe depende, fundamentalmente, de la latitud del lugar, pero también está influenciada por la altitud, la nubosidad y por la contaminación atmosférica.

La absorción de la radiación solar por las aguas de las lagunas facultativas y de maduración juega un papel muy importante en su funcionamiento, al influir sobre:

- La temperatura que alcanzan las aguas en las lagunas.
- La actividad fotosintética de las microalgas y la consiguiente producción de oxígeno y modificación del pH del medio.
- La eliminación de organismos patógenos.

La intensidad de la radiación solar fluctúa a lo largo del día y de las distintas estaciones del año, con la consiguiente repercusión sobre los factores mencionados. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.170).

2. Temperatura

Todas las reacciones físicas, químicas y bioquímicas que ocurren en las lagunas de estabilización son muy influenciadas por la temperatura. Este es un parámetro que se relaciona con la radiación solar y afecta tanto la velocidad de la fotosíntesis como la del metabolismo de las bacterias responsables de la depuración de las aguas residuales. Esos fenómenos son retardados por las bajas temperaturas. Por eso, en el lagunaje se debe tener en cuenta siempre las condiciones de temperatura más adversas.

En cuanto a la actividad bacteriana, se torna más intensa en temperaturas más altas, en las cuales el oxígeno disuelto es usado a una tasa mayor. Si la cantidad de oxígeno solicitada no se compensa por una producción más alta de oxígeno, las condiciones anaerobias pueden prevalecer y el efluente puede tornarse turbio, y aparecer malos olores. (Rolim Mendonça, 2000, p.202).

3. Nutrientes

El crecimiento y la actividad de los microorganismos están controlados tanto por la concentración, como por el tipo de los nutrientes que se encuentren presentes en el medio.

Los requisitos nutricionales se clasifican en:

- Fuente energética.
- Macronutrientes (C, H, O, N, P, K y S)
- Micronutrientes (Fe, Mg, Ca, B, Zn, Cu, M, Co, Mo, etc.).
- Factores de crecimiento (determinados compuestos orgánicos).

(Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.170).

Tanto las bacterias como las algas necesitan de una fuente de nutrientes para crecer y multiplicarse. Varios elementos son necesarios; por ejemplo, el carbono, el nitrógeno y el fósforo se requieren en mayor cantidad. (Rolim Mendonça, 2000, p.229).

4. Viento

El viento influye sobre el comportamiento de los lagunajes:

- Contribuyendo a la oxigenación de las aguas vía reaireación superficial, que es función de la velocidad del viento.
- Favoreciendo las condiciones de mezcla en las lagunas, evitando los fenómenos de estratificación.

Un buen grado de mezcla en la capa superior de las lagunas asegura una distribución más uniforme de la DBO₅, del oxígeno disuelto, de las microalgas y de las bacterias, lo que redunda beneficiosamente en el nivel de depuración que se alcanza en el proceso de tratamiento. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.173).

Siempre que sea posible, las lagunas deben construirse en lugares donde la acción de los vientos dominantes no esté en dirección de las viviendas, por el olor que algunos tipos de lagunas puedan llegar a producir.

Los dispositivos de entrada y salida de las lagunas deben estar ubicados, en el sistema, de modo que la dirección de los vientos predominantes ocurra del efluente hacia el afluente. Esto hará que no se favorezca la formación del denominado corto-circuito en las lagunas, y evitará la salida de sobrenadantes en el efluente. (Rolim Mendonça, 2000, p.202).

5. Profundidad de las lagunas

La profundidad de las lagunas afecta a:

- La temperatura del agua: lagunas profundas, con baja relación superficie/volumen (caso de las lagunas anaerobias), minimizan la pérdida de calor por radiación a la atmósfera.
- El grado de mezcla de las aguas: la intensidad de mezcla es función de la profundidad, a menor profundidad el viento provoca un mayor grado de mezcla.
- El crecimiento de vegetación indeseable en las lagunas: profundidades del orden o superiores a 1 m., son suficientes para evitar estos crecimientos. Al nivel consumo de oxígeno por parte de los gases que escapan desde el fondo de las lagunas hasta su superficie: a mayor profundidad de las lagunas, mayor grado de oxidación de estos gases. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.173).

6. Evaporación y precipitación

La evaporación trae como consecuencia un incremento de la salinidad de las aguas almacenadas en las lagunas. En casos extremos, este incremento puede invalidar el empleo de los efluentes depurados para el riego de especies vegetales sensibles a la conductividad de las aguas. Se estima, que valores de evaporación inferiores a 5 mm/d no afectan, de forma apreciable, a la salinidad de las aguas de las lagunas.

Con relación a la precipitación, el nivel de oxígeno disuelto en las lagunas puede bajar después de las tormentas, debido a la demanda adicional de oxígeno provocada por los sólidos arrastrados por el agua de lluvia. Además, en días cálidos la lluvia provoca el enfriamiento superficial de las lagunas, que favorece el ascenso de fangos del fondo hacia la superficie. La lluvia también provoca una cierta oxigenación de la zona superficial de las lagunas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.173).

Tipos de lagunas según su mecanismo de depuración

Las lagunas se clasifican teniendo en cuenta la concentración de oxígeno disuelto (nivel de aerobiedad), y la fuente que suministra el oxígeno necesario para la asimilación bacteriana de compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales. (Crites, R. & Tchobanoglous, J, 2000, p.475).

El esquema de funcionamiento de una instalación de lagunaje es, en esencia, semejante al de un tratamiento convencional, constando de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y, en cierto grado, tratamiento terciario. En función del tipo de reacciones que predominan, pueden distinguirse tres tipos de lagunas: anaerobias, facultativas, aerobias de alta tasa y de maduración.

El objetivo que se persigue con los tratamientos primarios, eliminación de la materia sedimentable y flotante, se logra en el caso del lagunaje en las lagunas anaerobias, dispuestas en cabecera del tratamiento.

La reducción mediante mecanismos biológicos, objetivo del tratamiento secundario de la materia orgánica tanto en forma disuelta, como coloidal y tiene lugar, vía aerobia en la superficie y vía anaerobia en el fondo, se logra en las lagunas facultativas que se disponen a continuación de ambas etapas.

En cuanto al tratamiento terciario en las lagunas aerobias de alta tasa y de maduración, situadas en cola del tratamiento, en las que imperan condiciones aerobias, tiene lugar una mejora de la calidad de las aguas (eliminación de sólidos en suspensión, de materia orgánica remanente, de nutrientes y de patógenos) antes del vertido final de los efluentes depurados, hecho que justifica la denominación adoptada para este tipo de lagunas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.154).

El proceso aerobio se caracteriza porque la descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en presencia de oxígeno, produciéndose compuestos inorgánicos que sirven de nutrientes a las algas, las cuales a su vez producen más oxígeno que facilita la actividad de las bacterias aerobias. El proceso de desdoblamiento de la materia orgánica se lleva a cabo con intervención de enzimas producidas por las bacterias en sus procesos vitales.

A su vez, las algas logran sintetizar materia orgánica que se incorpora a su propio protoplasma. Este proceso que se lleva a cabo en presencia de la luz solar recibe el nombre de fotosíntesis. En el mismo se desprende oxígeno (que es aprovechado por las bacterias aerobias para satisfacer la DBO). (Crites, R. & Tchobanoglous, J, 2000, pp.476).

– **Lagunas anaerobias**

Son lagunas de 3 a 10 m. de profundidad en las que imperan en toda la masa líquida, salvo en una delgada capa superficial, condiciones de ausencia de oxígeno disuelto, por lo que los microorganismos que en ellas se desarrollan son casi exclusivamente bacterias anaerobias. Los tiempos de retención hidráulicos de estas lagunas son altos ya que se tiene que se tienen que presentar la descomposición de los lodos en el fondo de la laguna, estos tiempos suelen estar alrededor de los 20 y 50 días.

Entre los mecanismos que contribuyen a mantener el ambiente anaerobio en este tipo de lagunas destacan:

- Las elevadas cargas orgánicas con las que se opera (más de 100 g DBO₅ m⁻³d⁻¹), que hacen que el posible oxígeno introducido en las lagunas con las aguas residuales influentes se consuma rápidamente.
- La generación de sulfuros por reducción de los sulfatos (tóxicos para las algas) y que, además, al oscurecer las aguas dificultan la penetración de la luz solar, imposibilitando su desarrollo.
- Su escasa superficie, que limita los fenómenos de reaireación superficial.

Los lodos decantados experimentan reacciones de degradación anaerobia, por lo que se van mineralizando (aumentando la relación mineral—materia volátil) a la vez que disminuye su volumen. Tras un tiempo de operación, que suele oscilar entre 5-10 años, se procede a la purga de los lodos que, al encontrarse altamente mineralizados, tan sólo precisan ser deshidratados antes de su disposición final.

Como subproducto de las reacciones anaerobias que tienen lugar en estas lagunas, se genera biogás (mezcla de metano y de dióxido de carbono en proporción aproximada 70:30) que se desprende en forma de burbujas a través de la superficie de las lagunas.

Los objetivos básicos de la etapa anaerobia son:

- Retener la mayor cantidad de sólidos sedimentables y flotantes.
- Estabilizar los lodos que se van acumulando en el fondo de las lagunas. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.154).

“La gran ventaja de las lagunas anaerobias es que pueden oxidar elevadas cargas orgánicas con buenas reducciones de DBO_5 que se encuentran alrededor de un 60 y 90% al igual que de sólidos suspendidos en un 50 y 70% en áreas bastante reducidas, a su vez logra alcanzar una reducción de nitrógeno y fósforo en un 10 y 5% respectivamente. Su principal desventaja es la producción de malos olores principalmente por la liberación de sulfuro de hidrógeno (H_2S)”. (Rolim Mendonça, (2000), p.232).

– **Lagunas facultativas**

Las lagunas facultativas tienen profundidades que varían de 1,5 a 2,5 metros, con áreas relativamente grandes. La profundidad mínima de las lagunas facultativas primarias debe ser igual 1,5 metros, mientras que las lagunas facultativas secundarias no deben tener profundidades inferiores a 1,2 metros. El área máxima de las lagunas facultativas no debe exceder de 15 ha.

Funcionan a través de la acción de algas y bacterias, con la influencia de la luz solar y de la fotosíntesis. La materia orgánica contenida en los desechos se estabiliza, en parte, transformándose en materia más estable en forma de algas, y en parte, transformándose en productos inorgánicos finales que salen con el efluente. La cantidad de algas presentes en las lagunas facultativas varía entre 30 y 40 mg/l.

Estas lagunas son llamadas facultativas, debido a las condiciones aerobias de la superficie, liberan oxígeno, y a las condiciones anaerobias mantenidas en la parte inferior donde la materia orgánica se sedimentan, y son el tipo de laguna más usado. En las lagunas facultativas se logra una reducción de DBO_5 alrededor de un 60 y 90% y se logra alcanzar una reducción de nitrógeno y fósforo en un 80 y 60% respectivamente. (Rolim Mendonça, 2000, p.236).

Según el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

- En el fondo de estas lagunas, donde se acumulan los sedimentos, se establecen condiciones de anaerobiosis, en las que se dan los fenómenos y reacciones descritos en el anterior apartado.
- En la zona intermedia, en la que se dan condiciones muy variables, se establece una zona en la que predominan las bacterias de tipo facultativo, de las que toman el nombre este tipo de lagunas.
- En la zona superficial de las lagunas, se instauran condiciones aerobias, gracias a la actividad fotosintética de las microalgas que en ella se desarrollan y, en menor medida, a fenómenos de reaireación superficial inducidos por el viento.

El espesor de estos estratos varía en función de:

- El momento del día: durante la noche, al cesar la actividad fotosintética, decrece el espesor de la capa aerobia, incrementándose el de la anaerobia.
- Las estaciones: en primavera-verano, al intensificarse la actividad de las microalgas, se amplía el espesor de la capa aerobia.

- El nivel de carga orgánica aplicada a la laguna: si se sobrecarga la laguna, la zona anaerobia puede extenderse a todo su volumen. (p. 156).

Los tiempos de retención hidráulica de estas lagunas son relativamente altos, los mismos se encuentran alrededor de 5 y 30 días,

- **Lagunas aerobias de alta tasa**

Según Rolim Mendonça, (2000) “Las lagunas estrictamente aerobias o de alta tasa de degradación son muy pocas profundas por lo general, varían de 0,3 a 0,5 metros”.

Estas lagunas están diseñadas para aumentar la actividad fotosintética de las algas. Cabe resaltar que el término “alta tasa” se refiere a la velocidad de producción fotosintética de oxígeno por parte de las algas presentes, y no a la velocidad de asimilación metabólica de compuestos orgánicos, la cual permanece invariable.

El oxígeno producido por las algas permite a las bacterias degradar en forma aerobia los compuestos orgánicos presentes en el agua residual. Durante las horas de luz solar el oxígeno y el pH aumentan alcanzando valores máximos; mientras en las horas de oscuridad dichos parámetros disminuyen en forma considerable respecto del valor máximo. (Crites, R. & Tchobanoglous, J, 2000, pp.476).

Los tiempos de retención de estos sistemas son relativamente cortos (valor usual de 5 días). Las lagunas aerobias se utilizan en combinación con otras lagunas y su aplicación se limita a zonas con climas cálidos y soleados.

Deberán usarse solo como método tratamiento de aguas residuales, cuando hubiera la factibilidad del reaprovechamiento de la producción de algas. Su operación exige personal capaz y permiten reducciones del 80 al 95% de la DBO₅ y un 40% de sólidos suspendidos. (RolimMendonça, 2000, p.2).

– **Lagunas de maduración**

Las lagunas de maduración tienen la principal finalidad de reducir los coliformes fecales (CF) contenidos en los desechos de las aguas residuales. Se construyen siempre, después del tratamiento completo, por medio de una laguna facultativa primaria o secundaria o de una planta de tratamiento convencional. Con adecuado dimensionamiento pueden conseguirse remociones de coliformes fecales mayores que 99,999%. Tienen profundidades menores que las lagunas facultativas, variando de 0,6 a 1,5 metros. El área máxima de su nivel medio no debe sobrepasar de 3 ha. (Rolim Mendonça, 2000, p.201).

El principal objetivo de las lagunas de maduración, se centra en conseguir un elevado grado de desinfección de las aguas mediante el abatimiento de un gran número de los organismos patógenos presentes. Los periodos de retención hidráulica de estas lagunas suelen ser de 5 a 20 días. Estas lagunas poseen una alta capacidad de duración, ya que logra reducir hasta un 80% la DBO₅, un 40% de sólidos en suspensión, 80% de nitrógeno y 60% de fósforo. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.163).

Ventajas de sistemas Lagunares.

- a. Bajo coste de inversión (que es función, básicamente del costo del terreno y de la permeabilidad del mismo).
- b. Facilidad constructiva, siendo el movimiento de tierras la actividad principal en la construcción de las lagunas.
- c. Consumo energético nulo, si el agua a tratar puede llegar por gravedad hasta la estación depuradora. Las únicas fuentes de energía son el sol y el viento.
- d. Ausencia de averías electromecánicas al carecer de equipos.
- e. Solamente con la observación visual y olfativa de las distintas lagunas se tiene una estimación bastante exacta de su estado operativo.

- f. Escaso y simple mantenimiento, que se limita a retirar los residuos del pretratamiento y a mantener las superficies de las lagunas libres de flotantes para evitar la proliferación de mosquitos.
- g. Escasa producción de fangos que experimentan una alta mineralización a consecuencia de los elevados tiempos de retención con los que se opera (5-10 años), lo que facilita enormemente su manipulación y evacuación. Por el contrario, en las estaciones depuradoras de lodos activos el tratamiento y evacuación de los lodos generados puede llegar a suponer el 55% de los costos totales de explotación y mantenimiento.
- h. Gran inercia, por los elevados volúmenes y por los largos tiempos de retención, lo que le permite una fácil adaptación a cambios de caudal y de carga orgánica, muy habituales en las poblaciones de pequeño tamaño.
- i. Se puede emplear para tratar aguas residuales industriales con elevados contenidos en materias biodegradables. El lagunaje anaerobio constituye un excelente pretratamiento para vertidos con elevados contenidos en materia orgánica y sólidos en suspensión.
- j. Alto poder de abatimiento de microorganismos patógenos, que puede llegar a 4-5 potencias de diez, en lugar de las 2 potencias de diez que se alcanzan en los tratamientos de lodos activos.
- k. Integración medioambiental.

Desventajas de sistemas Lagunares.

- a. Elevados requisitos de terreno para su implantación.
- b. La implantación de este sistema de depuración puede verse imposibilitada en zonas frías o de baja radiación solar.
- c. Generación de olores desagradables en las lagunas anaerobias.
- d. Posible proliferación de mosquitos.
- e. Pérdidas de agua por evaporación.
- f. Elevadas concentraciones de sólidos en suspensión en los efluentes finales, como consecuencia de la proliferación de las microalgas.
- g. Riesgo de contaminación de acuíferos por infiltraciones.

DISEÑO DEL LAGUNAJE

Básicamente, puede decirse que las lagunas anaerobias y facultativas se diseñan con el objetivo primordial de la eliminación de DBO₅, mientras que en las lagunas de maduración este objetivo se centra en la eliminación de organismos patógenos. Si bien, ello no excluye que en las lagunas de maduración también se produzca una cierta eliminación de DBO₅, ni que en las lagunas anaerobias y facultativas también se eliminen patógenos. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.188).

– Diseño de lagunas anaerobias

El Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008), dice lo siguiente:

Las lagunas anaerobias se diseñan para lograr dos objetivos básicos:

- Retener la mayor cantidad de sólidos sedimentables.
- Estabilizar los lodos que se van acumulando en las lagunas.

El diseño es básicamente empírico y se basa en criterios de carga orgánica volumétrica y/o tiempos de retención.

La carga orgánica volumétrica viene dada por la siguiente ecuación:

$$\text{COV} = \text{Co} \frac{Q}{V} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Donde:

COV = carga orgánica volumétrica (g DBO m⁻³.d⁻¹)

Co = DBO₅ del influente (g/m³)

Q = caudal (m³/d)

V = volumen de la laguna (m³)

De la ecuación anterior, despejando el volumen se obtiene:

$$V = C_o \frac{Q}{COV} \quad (\text{Ecuación 25})$$

El límite superior de carga orgánica volumétrica se limita a 350 g DBO₅ m⁻³d⁻¹, para minimizar la generación de olores desagradables. Este límite es aplicable para el tratamiento de aguas residuales con contenidos en sulfatos menores de 300 mg SO₄/l.

Dependiendo de la temperatura de diseño, los valores que suelen emplearse de carga volumétrica se recogen en la siguiente tabla, en la que también se muestran los rendimientos medios de DBO₅ para cada situación (Mara y Pearson, 1986; Mara y col. 1997).

Tabla 13. *Valores recomendados de carga orgánica volumétrica en función de la temperatura de diseño y rendimientos.*

T de diseño (°C)	Carga volumétrica (Λ _v) (g m ⁻³ d ⁻¹)	Eliminación DBO ₅ (%)
<10	100	40
10-20	20T-100	2T+20
20-25	10T+100	2T+20
>25	350	70

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

Una vez determinado el volumen de la etapa aerobia, se puede calcular el tiempo de retención hidráulica con la siguiente ecuación.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 26})$$

Donde

T = tiempo de retención hidráulica

Q = caudal (m³/d)

V = volumen de la laguna (m³)

Si de la ecuación anterior se obtiene un valor de menos de un día, debe usarse un valor de 2 d y recalcularse el volumen.

La acumulación de lodos en el fondo de las lagunas anaerobias se estima en torno a $0,04 \text{ m}^3 \text{ hab-eq}^{-1} \text{ año}_1$. Otras consideraciones son las siguientes:

- Se aconseja trabajar con lagunas anaerobias en serie, ya que las lagunas que reciben los efluentes depurados presentan problemas de operación por la baja carga orgánica aplicada.
- La frecuencia de purga de lodos depende de la naturaleza del vertido, carga aplicada y clima de la zona. En función a estas variables, la limpieza debe hacerse cada 5-10 años.

Ciertos estudios demuestran que la recirculación es contraproducente, dado que la mayor turbulencia provoca el mantenimiento de sólidos en suspensión que, en ausencia de recirculación, se incorporarían a la capa de lodos. El desprendimiento de burbujas es suficiente para garantizar un nivel adecuado de mezcla. (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), 2008, p.189).

– **Diseño de lagunas facultativas**

Este tipo de lagunas se diseñan de forma que se favorezcan los mecanismos de oxigenación del medio: actividad fotosintética (principalmente) y reaireación superficial. Dado que las algas precisan luz para generar oxígeno y que la difusión de éste en el agua es muy lenta, la profundidad de estas lagunas oscila entre 1,5 – 2,0 m.

En el dimensionamiento de las lagunas facultativas cabe distinguir entre métodos racionales, matemáticos y empíricos. Los métodos racionales intentan explicar, en términos científicos, lo que ocurre en las lagunas facultativas, asumiendo hipótesis restrictivas tales como:

- La composición de la alimentación es constante durante todo el año.
- El régimen hidráulico en las lagunas se corresponde con un modelo ideal de flujo.
- No se consideran las sedimentaciones de materia orgánica particulada en el fondo de las lagunas.
- Las lagunas funcionan en régimen estacionario.
- La cinética de la depuración es de primer orden, con una constante de velocidad que varía exponencialmente con la temperatura.

Los métodos matemáticos si bien, pueden ser considerados como una subcategoría de los métodos racionales. Se diferencian de los mismos por hacer uso de hipótesis muy diferentes, considerando las lagunas como sistemas dinámicos con cinéticas complejas y regímenes de flujo no ideales.

Por último, los métodos empíricos son relaciones matemáticas sencillas, deducidas de la observación experimental y que utilizan como variables de diseño el caudal de aguas residuales a tratar, el tiempo de residencia y la carga orgánica superficial.

1. Métodos racionales

1.1 Modelo de mezcla completa y cinética de primer orden

Basándose en las hipótesis siguientes:

- La reducción de la materia orgánica sigue una cinética de primer orden.
- En la laguna se dan condiciones de mezcla completa.
- No se producen pérdidas por evaporación y/o filtración

Del balance de masa se obtiene la siguiente ecuación.

$$Q \cdot C_e = Q \cdot C_i - K_c \cdot V \cdot C_e \quad (\text{Ecuación 27})$$

El tiempo de retención hidráulico.

$$t = \frac{V}{Q} \quad (\text{Ecuación 28})$$

Multiplicando ambos miembros de la ecuación 27 por $1/Q$ y considerando la ecuación 28, se obtiene:

$$C_e = C_i - K_c \cdot C_e \cdot t \quad (\text{Ecuación 29})$$

$$C_e = \frac{C_i}{1 + K_c \cdot t} \quad (\text{Ecuación 30})$$

$$t = \frac{1}{K_c} \left(\frac{C_i}{C_e} - 1 \right) \quad (\text{Ecuación 31})$$

Donde

C_e = DBO₅ del efluente (mg/l)

C_i = DBO₅ del influente (mg/l)

T = el tiempo de retención (d)

k_c = constante de reacción de primer orden para la eliminación de DBO₅. (d⁻¹)

Su influencia respecto a la temperatura viene dada por la siguiente tabla.

Tabla 14. *Constante de reacción de primer orden.*

Autor	Ecuación
Marais (1966)	$k_{cT} = k_{c35} (1,085)^{T-35}$
Mara (1976)	$k_{cT} = 0,35 (1,05)^{T-20}$
Gloyna (1973)	$k_{cT} = 0,17$
Israel (Mara, 1976)	$k_{cT} = 0,8 (1,05)^{T-20}$
Sudáfrica (Mara, 1976)	$k_{cT} = 0,17$ si $T > 5$ °C
	$k_{cT} = 0,14$ si $T < 5$ °C
Tchobanoglous (1985)	$k_{cT} = 0,2—0,4$

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

Donde:

k_{cT} = constante de reacción a la temperatura T (d^{-1})

k_{c35} = constante de reacción a 35 °C = 1,2 d^{-1}

T = temperatura de operación (°C)

1.2 Modelo de flujo pistón y cinética de primer orden.

La ecuación básica del modelo del flujo pistón es la siguiente:

$$\frac{C_e}{C_i} = \exp [-K_p \cdot t] \quad (\text{Ecuación 32})$$

Donde

$$t = \frac{1}{K_p} \ln\left(\frac{C_e}{C_i}\right) \quad (\text{Ecuación 33})$$

Donde:

C_e = DBO₅ del efluente (mg/l)

C_i = DBO₅ del influente (mg/l)

\emptyset = tiempo de retención (d)

k_p = constante de velocidad (d^{-1})

Para el modelo de flujo pistón, su influencia respecto a la temperatura viene dada por la expresión (EPA, 1983):

$$K_{pt} = K_{p20} (1,09)^{t-20} \quad (\text{Ecuación 34})$$

Donde:

k_{pT} = constante de reacción a la temperatura T (d^{-1})

k_{p20} = constante de reacción a 20 °C

T = temperatura de operación (°C)

El valor de k_{p20} en función de la carga orgánica superficial (COS) se muestra en la siguiente Tabla (EPA, 1983).

Tabla 15. *Valores de k_{p20} en función de la carga orgánica superficial.*

COS (kg DBO ₅ h ⁻¹ d ⁻¹)	K _{p20} (d ⁻¹)
22	0,045
25	0,071
67	0,083
90	0,095
112	0,129

Fuente: Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla (CENTA), (2008).

2. Métodos matemáticos

2.1 Modelo de Flujo Arbitrario

Thirumurthi (1969) establece que el modelo de flujo en las lagunas facultativas se encuentra entre los modelos anteriores (mezcla completa y flujo pistón), y recomienda el uso de la ecuación, desarrollada en 1958 por Wehner-Wilhelm, para el diseño de reactores químicos, en la que grado de mezcla se representa mediante un parámetro adimensional “d” (coeficiente de dispersión), cuyos valores oscilan entre cero para condiciones de flujo pistón, a infinito para sistemas de mezcla completa.

Para el tratamiento de aguas residuales urbanas, Thirumurti propone la siguiente relación entre la constante de reacción y la temperatura:

$$K = 0,15 (1,072)^{t-20} \quad (\text{Ecuación 35})$$

Donde:

K = constante de reacción de DBO₅ a la temperatura de diseño (d⁻¹)

T = temperatura de diseño (°C)

3. Métodos empíricos

3.1 Métodos basados en la Carga Orgánica Superficial

Estos métodos experimentales recomiendan valores de la Carga Orgánica Superficial (COS) muy dispares, dado que las experiencias de las que se han extraído se han llevado a cabo en distintas ubicaciones geográficas, bajo distintas temperaturas, con diferentes profundidades de las lagunas y con aguas residuales influentes de características diversas. Entre ellos destacan:

3.1.1 Método de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 1987)

La OMS recomienda dimensionar las lagunas facultativas en lugares de clima templado con cargas orgánicas superficiales entre 200 y 400 kg DBO5/ha.d.

3.1.2 Ecuación de Arceivala (1973) o método indio

Este método está deducido a partir de datos experimentales obtenidos de lagunas facultativas que operan en la India, por lo que sólo es válido para países con una ubicación geográfica similar (intervalo de latitud 8° N - 36° N). Según este método, la carga orgánica superficial admisible por una laguna facultativa viene dada por:

$$COS = 375 - 6,25L \quad \text{(Ecuación 36)}$$

Donde:

COS = carga orgánica superficial (kg DBO5/ha.d)

L = latitud el lugar donde se ubica el lagunaje

3.1.3 Método de McGarry y Pescod (1970)

Tras el estudio de más de un centenar de lagunas facultativas que operaban con cargas comprendidas entre 34 y 560 kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹, se obtuvo la siguiente expresión que relaciona la carga orgánica superficial máxima que puede aplicarse a una laguna facultativa, con la temperatura media el mes más frío:

$$COS_{max} = 60(1,099)^t \quad \text{(Ecuación 37)}$$

Donde:

COS_{max} = carga orgánica superficial máxima (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

T = temperatura media del mes más frío (°C)

El hecho de tomar como temperatura de diseño la temperatura media del mes más frío, añade un cierto margen de seguridad, puesto que la temperatura del agua en las lagunas en esos momentos es del orden de 2-3 °C superior a la temperatura del aire.

Por otro lado, según McGarry y Pescod (1970), la carga orgánica superficial aplicada y la carga orgánica superficial eliminada, se relacionan mediante la expresión:

$$COS_{el} = 10,35 + 0,725COS_{ap} \quad \text{(Ecuación 38)}$$

Donde:

COS_{el} = carga orgánica superficial eliminada (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

COS_{ap} = carga orgánica superficial aplicada (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

3.1.4. Método de Arthur (1983)

Relaciona la carga orgánica superficial máxima que puede aplicarse a una laguna facultativa, con la temperatura media del mes más frío de acuerdo con la expresión:

$$COS_{max} = (20 \times T) - 60 \quad \text{(Ecuación 39)}$$

Donde:

COS_{max} = carga orgánica superficial máxima (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

T = temperatura media del mes más frío (°C)

3.1.5 Métodos de Mara

Aplicando un factor de seguridad, de aproximadamente 1,5 a la ecuación de McGarry y Pescod, se obtiene la expresión siguiente que relaciona la carga orgánica superficial máxima que puede aplicarse a una laguna facultativa con la temperatura media del mes más frío (Mara, 1976):

$$COS_{max} = (20T) - 120 \quad \text{(Ecuación 40)}$$

Donde:

COS_{max} = carga orgánica superficial máxima (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

T = temperatura media del mes más frío

Posteriormente (Mara, 1987) propone para lagunas facultativas con profundidades comprendidas entre 1,5 – 2,0 m:

$$COS_{max} = 100 \text{ kg DBO}_5 \text{ ha}^{-1}\text{d}^{-1} \quad \text{para } T < 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{(Ecuación 41)}$$

$$COS_{max} = 350(1,107 - 0,002)^{t-25} \quad \text{para } T > 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{(Ecuación 42)}$$

Donde:

COS_{max} = carga orgánica superficial máxima (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

T = temperatura de diseño (°C)

3.1.6 Métodos de Gloyna

Gloyna (1973), recomienda para la carga orgánica superficial, en función de las características climáticas de la zona, los valores que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 16. *Valores de la carga orgánica superficial en función de las características climáticas de la zona.*

kg DBO5 ha ⁻¹ d ⁻¹	Características climáticas
< 10	Zonas muy frías con cobertura de hielo estacional, aguas con temperatura uniforme baja y nubosidad variable
10 – 50	Clima frío con cobertura de hielo estacional y temperatura templada de verano en una estación corta
50 – 150	Clima entre templado y semitropical, cobertura ocasional de hielo, sin nubosidad persistente
150 – 300	Clima tropical, sol y temperatura uniformes, sin nubosidad estacional

Fuente: Gloyna (1973)

Igualmente, Gloyna (1973) relaciona la carga orgánica superficial máxima que puede aplicarse a una laguna facultativa, con la temperatura media mensual mínima del agua, de acuerdo con la expresión:

$$\text{COSmax} = 357,4(1,085)^{t-20} \quad (\text{Ecuación 43})$$

Donde:

COSmax = carga orgánica superficial máxima (kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹)

T = temperatura media mensual mínima del agua (°C)

En este método, desarrollado a partir de estudios a escala real y piloto, el volumen necesario de laguna facultativa viene definido por la expresión:

$$V = 3,5 \times 10^5 \cdot Q \cdot L \cdot (\theta^{(35-T)}) \cdot f \cdot f' \quad (\text{Ecuación 44})$$

Donde:

V= volumen de la laguna, en m³

θ = coeficiente de temperatura= 1,085 (adimensional)

f= factor de toxicidad de algas=1,0 para aguas residuales domésticas y varios tipos de desechos industriales (adimensional)

f'= demanda sulfhídrica de oxígeno= 1,0 para concentración de iones equivalentes a SO₄²⁻ menores que 500 mg/l

Q = caudal de aguas residuales a tratar (l/d)

3.1.7 Método empírico israelí

En Israel, tras muchos años de seguimiento de numerosas instalaciones de lagunaje, han llegado a la conclusión de no diseñar lagunas facultativas con cargas orgánicas superficiales superiores a 100 kg DBO₅ ha⁻¹d⁻¹.

– Diseño de lagunas aerobias y de maduración

Tiempo de retención y temperatura son los principales parámetros involucrados en el diseño de las lagunas de maduración, diseño que se basa en modelos cinéticos para la eliminación de DBO₅ organismos patógenos representados, generalmente, por medio de los coliformes fecales. La mayoría de los modelos proponen cinéticas de primer orden, siendo la ecuación de diseño más habitual la desarrollada por Marais en 1974:

$$N_e = \frac{N_i}{1 + K_b \cdot t} \quad (\text{Ecuación 45})$$

Donde:

Ne = número de coliformes fecales/100 ml en el efluente

Ni = número de coliformes fecales/100 ml en el influente

K_b= constante de velocidad para la eliminación de coliformes (d⁻¹)

t= tiempo de retención (d)

$$K_b = 2,6(1,19)^{T-20} \quad (\text{Ecuación 46})$$

Donde

T = temperatura media del agua (°C)

En el caso de disponer varias lagunas de maduración en serie la ecuación de diseño correspondiente queda como sigue:

$$N_e = \frac{N_i}{(1+K_b T_1)(1+K_b T_2)\dots(1+K_b T_n)} \quad (\text{Ecuación 47})$$

Donde:

Ne= número de coliformes fecales del efluente

Ni= número de coliformes fecales del influente

K_b = coeficiente de remoción de coliformes fecales, Días⁻¹

t = tiempo de retención de las lagunas de estabilización, en días

Área de Laguna

$$A_s = \frac{Q \cdot t}{h} \quad (\text{Ecuación 48})$$

Donde:

Q = Caudal del Afluente (m³/s)

t = Tiempo de retención (seg)

h= Altura (m)

Ancho de Laguna

$$W = \left(\frac{As}{Ra}\right)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 49})$$

Donde:

As = Área de laguna de Maduración (m²)

Ra = Proporción Long/ancho.

Se recomienda una proporción 2:1 para garantizar un comportamiento de flujo pistón.

Largo de Laguna

$$L = \frac{As}{W} \quad (\text{Ecuación 50})$$

As = Área de laguna de Maduración (m²)

W = Ancho de laguna de maduración (m)

Eficiencia de Remoción de Lagunas aerobias y de maduración.

La eficiencia de remoción de una laguna es un factor de gran importancia, ya que nos permite conocer los resultados que podrían generarse del diseño de un sistema de depuración. A continuación se presenta la ecuación que permite determinar la eficiencia tanto de las lagunas de maduración como de lagunas Facultativas.

$$E = \frac{100K_1t}{1+K_1t} \quad (\text{Ecuación 51})$$

$$E = \frac{100K_b t}{1+K_b t} \quad (\text{Ecuación 52})$$

Donde:

E= eficiencia de la laguna (%)

K_1 = coeficiente de velocidad de remoción de DBO₅

K_b = coeficiente de velocidad de remoción bacteriana

t= tiempo de retención hidráulica (días)

La OMS (1987) recomienda un tiempo mínimo de residencia de 5 días si se dispone de una única laguna de maduración, y de 3 días para cada laguna si se dispone de varias dispuestas en serie.

Tras el dimensionamiento, debe comprobarse que la carga orgánica superficial con la que opera la primera laguna de maduración no supera la carga con la que opera la laguna facultativa precedente, recomendándose que no supere el 75% de esta última carga.

BASES LEGALES

DECRETO N° 883

NORMAS PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA.

SECCION III

De las descargas a cuerpos de agua

ARTICULO 10.- A los efectos de este Decreto se establecen los siguientes rangos y límites máximos de calidad de vertidos líquidos que sean o vayan a ser descargados, en forma directa o indirecta, a ríos, estuarios, lagos y embalses:

Parámetros fisicoquímicos límites máximos o rangos

Aceites minerales e hidrocarburos	20 mg/l
Aceites y grasas vegetales y animales.	20 mg/l
Alkil Mercurio	No detectable (*)
Aldehidos	2,0 mg /l
Aluminio total	5,0 mg/l
Arsénico total	0,5 mg/l
Bario total	5,0 mg/l
Boro	5,0 mg/l
Cadmio total	0,2 mg/l
Cianuro total	0,2 mg/l
Cloruros	1000 mg/l
Cobalto total	0,5 mg/l
Cobre total	1,0 mg/l
Color real	500 Unidades de Pt-Co
Cromo Total	2,0 mg/l
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5,20)	60 mg/l
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	350 mg/l
Detergentes	2,0 mg/l
Dispersantes	2,0 mg/l
Espuma	Ausente
Estaño	5,0 mg/l
Fenoles	0,5 mg/l
Fluoruros	5,0 mg/l
Fósforo total (expresado como fósforo)	10 mg/l
Hierro total	10 mg/l
Manganeso total	2,0 mg/l
Mercurio total	0,01 mg/l
Nitrógeno total (expresado como nitrógeno)	40 mg/l
Nitritos + Nitratos (expresado como nitrógeno)	10 mg/l
pH	6 – 9

Plata total	0,1 mg/l
Plomo total	0,5 mg/l
Selenio	0,05 mg/l
Sólidos flotantes	Ausentes
Sólidos suspendidos	80 mg/l
Sólidos sedimentables	1,0 mg/l
Sulfatos	1000 mg/l
Sulfitos	2,0 mg/l
Sulfuros	0,5 mg/l
Zinc	5,0 mg/l

Parámetros Biológicos

Número más probable de organismos coliformes totales no mayor de 1.000 por cada 100 ml, en el 90% de una serie de muestras consecutivas y en ningún caso será superior a 5.000 por cada 100 ml.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

ENFOQUE, TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El siguiente trabajo de investigación será desarrollado bajo un enfoque cuantitativo. El mismo permitirá obtener resultados numéricos a través de ensayos y estudios a realizar de calidad de agua a los afluentes sin canalización de la margen izquierda del Lago de Macagua. Estas pruebas y estudios serán un factor determinante, ya que permitirán conocer todas las características fisicoquímicas, biológicas y bacteriológicas que poseen los afluentes, haciendo mucho más fácil realizar una selección adecuada y pertinente del tratamiento específico que debe poseer cada uno de estos afluentes.

TIPO DE INVESTIGACIÓN

La orientación de la investigación será tipo evaluativo ya que se manejan aspectos fisicoquímicos, biológicos y bacteriológicos del agua, con la finalidad de obtener las características necesarias de calidad de los afluentes de la margen izquierda del Lago de Macagua para así seleccionar el tratamiento más adecuado y de bajo impacto ecológico. La investigación también será de tipo aplicada, ya que a través de los resultados obtenidos de las pruebas de calidad de agua, sumado a los conocimientos adquiridos durante la preparación como ingenieros y con la ayuda de bibliografías, se pretende diseñar una propuesta de mitigación de los niveles de contaminación que se generan en los afluentes sin canalización sobre la margen izquierda del Lago de Macagua, para así obtener como resultado un agua cuya características se encuentren dentro de los parámetros establecidos en el Decreto 883. Para Fuente Silva (2004, p.76). “La investigación de tipo aplicada busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren, esta se encuentra estrechamente vinculada con la investigación básica, pues depende de los resultados y avances de la investigación”.

DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Como diseño de campo Rojas de Narváez (2003, pág. 36) define “Se realiza observando el grupo o fenómeno estudiado en su ambiente natural. Permite investigar las prácticas, comportamientos, creencias y aptitudes de individuos o grupos, tal como se presentan en la vida real”. Para el diseño de laboratorio Rojas de Narváez (2003, pág. 36) establece “Se crea o reproduce un ambiente natural en un ambiente artificial o cuarto especialmente acondicionado para la investigación”.

El diseño de investigación de este estudio se encuentra catalogado de campo y de laboratorio. Se toma el diseño de campo debido a la manera utilizada para obtener los datos a usar en la investigación, los cuales serán tomados directamente sobre el cauce del afluente, sin embargo todas las pruebas y estudios de calidad de agua del afluente serán realizadas en el laboratorio de ingeniería sanitaria, al igual que el diseño correspondiente de la propuesta de mitigación de niveles de contaminante más idónea.

UNIDADES DE ANÁLISIS

El objetivo principal de esta investigación es el de realizar propuestas que permitan mitigar los niveles de contaminación del afluente sin canalización, ubicado en la margen izquierda del Lago de Macagua, sector Rio Sipapo UD-298, el cual fue escogido teniendo en cuenta su cercanía y accesibilidad. Tomando como unidad de análisis este afluente, ya que para realizar estas propuestas se debe conocer el estado y la calidad de sus aguas. A medida que avance la investigación se realizarán estudios que permitirán conocer las características del afluente y con estos parámetros se procederá a diseñar propuestas de mitigación de los niveles de contaminación. Los resultados de dichas propuestas se deben encontrar dentro de lo establecido por el Decreto 883 (Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua).

TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

Para la realización de esta investigación se procedió a caracterizar y delimitar el afluente natural, a través de un software de sistema de posicionamiento global (google earth), con el mismo se logró conocer las coordenadas de latitud, altitud y longitud del afluente.

Se utilizaron técnicas de recopilación de datos por medio de la recolección de muestras. Los estudios de las muestras se llevaron a cabo en el laboratorio de ingeniería sanitaria de la Universidad Católica Andrés Bello Extensión Guayana, bajo los requerimientos exigidos para la certificación del ministerio de ambiente y las normas que rigen los ensayos.

Los ensayos realizados durante la investigación, corresponden a los parámetros fisicoquímicos y biológicos de aguas residuales, y son métodos estandarizados internacionalmente. Los ensayos que se llevaron a cabo para la caracterización y análisis del afluente fueron los siguientes:

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Coliformes totales
- Coliformes fecales
- Sólidos totales
- Conductividad
- Nitritos y nitratos

Estos ensayos se realizaron con la finalidad de conocer si este afluente cumple con lo estipulado en Decreto 883, y de no cumplir con el mismo se realizarán una serie de

propuestas que permitan la mitigación de los niveles de contaminación y se adapten a las condiciones naturales del cauce.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La información obtenida de esta investigación se presentara en gráficos, tablas, cuadros comparativos y esquemas, esto con el fin de mostrar los parámetros fisicoquímicos y biológicos del afluente, para así comparar los resultados de muestras de distintos lugares dentro del mismo afluente, y de esta manera entender el comportamiento de estos parámetros a lo largo del cauce del afluente y así poder evidenciar la verdadera problemática y realizar la propuesta más eficiente.

PROCEDIMIENTO

- a) Caracterizar el afluente, ubicado en la UD-298 de Ciudad Guayana, en la margen izquierda del Lago de Macagua, por medio de la recolección de información de documentos, planos, batimetría y utilización de software de localización satelital, para ubicar geográficamente dicho afluente y conocer su longitud, ancho medio de cause y caudal del mismo. Se procedió a la toma de las muestras de las aguas en puntos estratégicos para posteriormente realizarle ensayos de laboratorio.
- b) Analizar el nivel de contaminación del afluente, mediante la elaboración de ensayos de calidad de agua para conocer sus distintas características fisicoquímicas y biológicas tales como: temperatura, oxígeno disuelto, DBO, conductividad, coliformes totales, coliformes fecales, nitritos y nitratos, para comparar estas características con los parámetros establecidos en el Decreto 883.
- c) Recopilar información acerca del manejo y tratamiento de vertidos o efluentes líquidos, y evaluar los distintos métodos y procesos de tratamientos fisicoquímicos y biológicos que se adapten a las características y condiciones del afluente.

- d) En base a la recopilación bibliográfica de la investigación y posterior a su comparación, se diseñarán una serie de propuestas que permitirán mitigar los niveles de contaminación presentes en el afluente y a su vez generaran el menor impacto social, ecológico y económico posible.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y ELABORACIÓN DE LA PROPUESTA

A continuación se presenta el análisis e interpretación de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta investigación, esquematizándose por medio de los objetivos específicos planteados en el capítulo I, que formaron parte del estudio para cumplir con el objetivo general.

CARACTERIZAR EL AFLUENTE, UBICADO EN LA UD-298 DE CIUDAD GUAYANA, EN LA MARGEN IZQUIERDA DEL LAGO DE MACAGUA.

Para llevar a cabo este objetivo, se hizo uso de un software de sistema de posicionamiento global llamado (google earth), para determinar la ubicación del afluente, establecer una logística y rutina para la toma de muestras en cada uno de los distintos puntos del cauce, conocer la longitud, pendiente y superficie que este ocupaba. Estos parámetros son indispensables para poder elaborar una caracterización hidráulica, física, química y biológica del afluente donde se desarrolla la investigación.

Delimitación del afluente

El afluente donde se desarrollará la investigación se encuentra ubicado en el margen izquierdo del el Lago de Macagua, aguas arriba de la torre toma para dotación de agua potable del sector Toro Muerto, específicamente en el sector UD-298.

En la metodología de toma de muestras para determinar las características hidráulicas, fisicoquímicas y biológicas del agua del afluente, se escogieron tres puntos de gran importancia en el comportamiento hidráulico del cauce. La muestra número uno se

tomó justo después de la unión de un colector de aguas de lluvias y el cauce natural del afluente, la muestra numero dos se tomó aproximadamente a 500 metros del primer punto, aguas abajo de la intersección de un colector de aguas servidas y el cauce natural del afluente, y la última muestra se tomó aproximadamente a 100 metros aguas arriba de la desembocadura en el lago Macagua. En cada uno de estos puntos se tomaron tres muestras, dos en recipientes plásticos para estudio de DBO, nitritos y nitratos, conductividad, sólidos suspendidos y sólidos disueltos, y otra en recipientes de vidrio (Winkler de 200ml) previamente esterilizados para análisis de coliformes totales y coliformes fecales. A continuación se presenta una imagen y un cuadro resumen donde se representarán las coordenadas geográficas de cada punto y longitud del cauce.



Figura 7. *Ubicación Geográfica del afluente.*

Fuente: Google Earth.

Expresión de resultados

Tabla 17. *Coordenadas geográficas de los puntos de toma de muestras.*

Muestra	Coordenadas Geográficas		Elevación (m)
	"N"	"O"	
1	8° 15' 51.60"	62° 45' 43.64"	104
2	8° 15' 48.05"	62° 45' 29,76"	98
3	8° 14' 52.96"	62° 44' 47.17"	66

Fuente: Propia.

Tabla 18. *Longitud del cauce.*

Longitud del Cauce (m):	4181 m
--------------------------------	--------

Fuente: Propia.

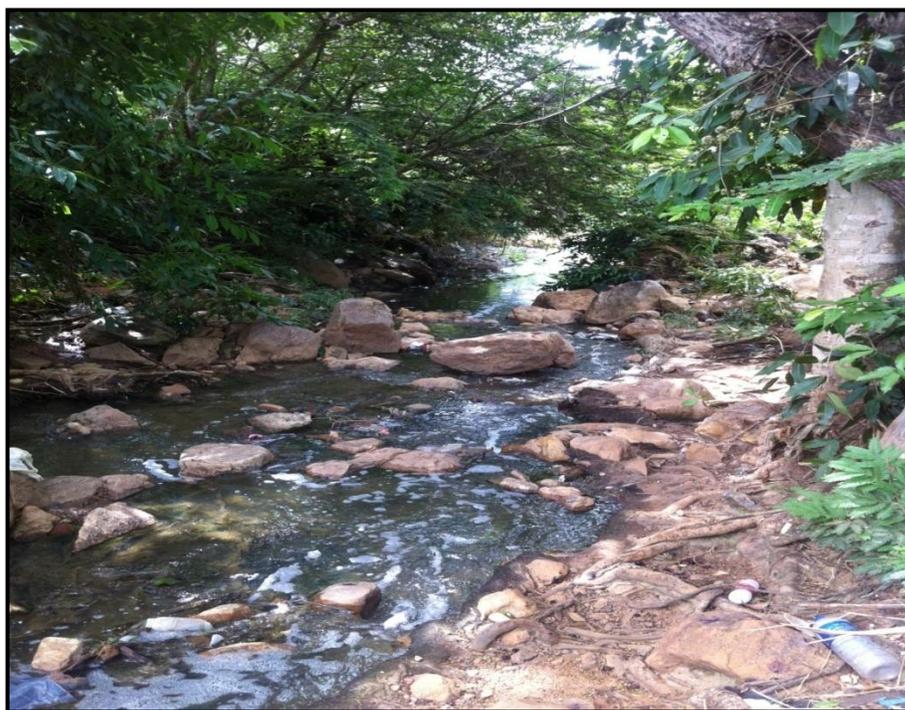


Figura 8. *Afluente donde se desarrolló la investigación.*

Fuente: Propia.

Medición del caudal

Para la estimación del caudal, primero se calculó la velocidad media del afluente, partiendo del principio de la conductividad eléctrica del agua. El proceso consistió en verter sal al cauce del río para modificar su concentración de sólidos disueltos y medir en un rango de 1,5 metros sobre el cauce del río, el tiempo en que tarda en cambiar la conductividad eléctrica del agua. Se calculó la velocidad del cauce con este método, ya que el mismo generaba resultados muy precisos y se optimizaba la utilización de los equipos que se tenían a la mano durante la investigación. Posteriormente se procedió a determinar el área de la sección transversal de los tres puntos donde se midió la velocidad del río, y luego se calculó el caudal por medio de la ecuación 2. Los datos registrados para el cálculo del caudal fueron tomados en el periodo de sequía, aproximadamente en el mes de Marzo, ya que esta es la época del año donde se encuentra más comprometida la calidad de las aguas residuales.

Expresión de resultados

Tabla 19. *Valores de la velocidad media del efluente.*

VELOCIDAD MEDIA					
Punto	Tiempo de cambio de Conductividad (seg)	Distancia recorrida por la concentración de Sal (m)	Cambio de Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Velocidad (m/s)	Velocidad prom. (m/s)
1	6,8	1,5	144-200	0,22	0,25
	6,4	1,5	150-220	0,23	
	4,66	1,5	150-290	0,32	
	6,81	1,5	152-290	0,22	
	5,42	1,5	148-302	0,27	

Cont.

VELOCIDAD MEDIA					
Punto	Tiempo de cambio de Conductividad (seg)	Distancia recorrida por la concentración de Sal (m)	Cambio de Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)	Velocidad (m/s)	Velocidad prom. (m/s)
2	6,1	1,5	222-298	0,24	0,26
	5,13	1,5	218-290	0,29	
	5,22	1,5	225-291	0,28	
	5,7	1,5	200-290	0,26	
	6	1,5	200-302	0,25	
3	5,9	1,5	201-298	0,25	0,27
	4,8	1,5	205-290	0,31	
	5,8	1,5	198-291	0,25	
	6,9	1,5	200-290	0,21	
	6,1	1,5	205-302	0,24	

Fuente: Propia.

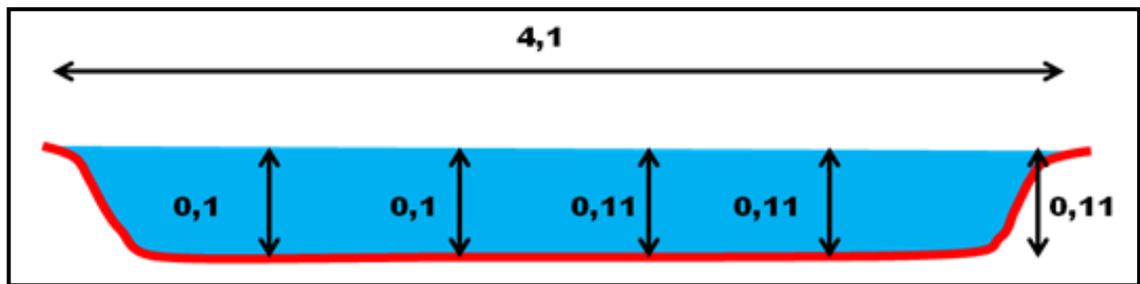


Figura 9. Sección transversal del cauce en el punto 1.

Fuente: Propia.

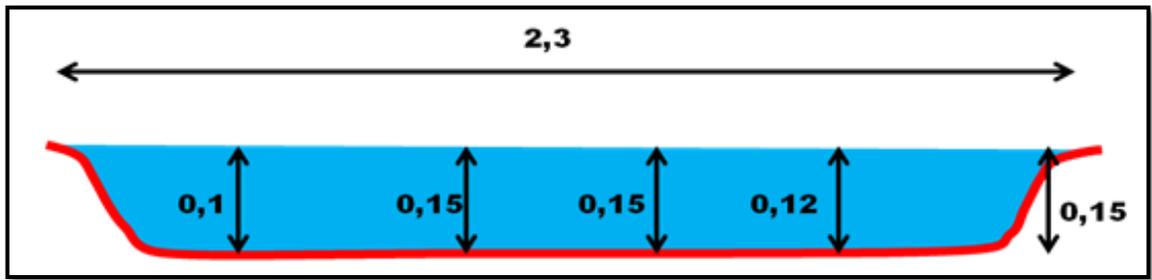


Figura 10. Sección transversal del cauce en el punto 2.

Fuente: Propia.

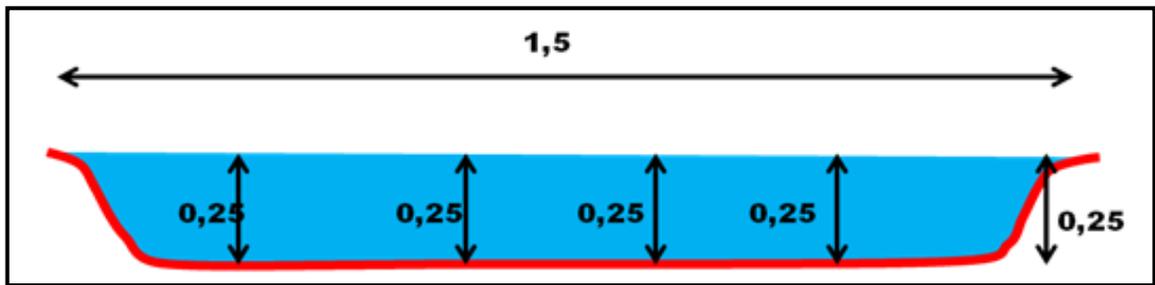


Figura 11. Sección transversal del cauce en el punto 3.

Fuente: Propia.

Tabla 20. Valores obtenidos del caudal medio del afluente.

Muestra	Ancho del Cauce (m)	Profundidad (m)	Ancho de secciones de aforo (m)	Áreas Parciales (m ²)	Área Total (m ²)	Ecua ción	Q (l/s)	Q prom (l/s)
1	4.1	0.1	0.82	0.082	0.42	Ec. 2	108.63	95.16
		0.1	0.82	0.082				
		0.1	0.82	0.082				
		0.11	0.82	0.0902				
		0.11	0.82	0.0902				
2	2.3	0.1	0.46	0.046	0.30	Ec. 2	82.52	95.16
		0.15	0.46	0.069				
		0.15	0.46	0.069				
		0.12	0.46	0.0552				
		0.15	0.46	0.069				

Cont.

Muestra	Ancho del Cauce (m)	Profundidad (m)	Ancho de secciones de aforo (m)	Áreas Parciales (m ²)	Área Total (m ²)	Ecua ción	Q (l/s)	Q prom (l/s)
3	1.5	0.25	0.3	0.075	0.36	Ec. 2	94.32	95.16
		0.25	0.3	0.075				
		0.22	0.3	0.066				
		0.25	0.3	0.075				
		0.25	0.3	0.075				

Fuente: Propia.

ANALIZAR EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN DEL AFLUENTE, SEGÚN LAS CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS Y BIOLÓGICAS QUE POSEA EL MISMO, Y COMPARARLAS CON LOS PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS ESTABLECIDOS EN EL DECRETO 883.

Revisión bibliográfica y selección de ensayos

Para el cumplimiento de este objetivo, se investigó en la bibliografía para definir conceptos básicos para la obtención de los parámetros fisicoquímicos y biológicos necesarios para la caracterización de las aguas servidas y de vertidos o efluentes naturales, teniendo en cuenta lo establecido en el Decreto 883 de las Normas para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua.

Los ensayos realizados durante la investigación para conocer las principales características fisicoquímicas y biológicas que determinan la calidad de un cuerpo de agua fueron las siguientes.

- Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
- Coliformes totales
- Coliformes fecales
- Sólidos totales

- Conductividad
- Nitritos y nitratos

Sin embargo el Decreto 883 establece una mayor cantidad de parámetros fisicoquímicos y biológicos para la caracterización de un cuerpo de agua, como se muestran en las bases legales del capítulo II. Tomando en cuenta las limitaciones que posee la investigación al momento de realizar el diagnóstico del afluente, se seleccionaron los ensayos mencionados anteriormente, ya que la universidad no cuenta con los equipos necesarios para la elaboración de muchos de los ensayos establecidos en el Decreto 883.

Elaboración de los ensayos y determinación de las características fisicoquímicas y biológicas del afluente

Los ensayos para la caracterización de las aguas, fueron realizados en el laboratorio de ingeniería sanitaria de la Universidad Católica Andrés Bello extensión Guayana, gracias a prácticas aprendidas y realizadas durante la carrera de ingeniería civil, en la cátedra de Ingeniería Sanitaria, teniendo en cuenta las especificaciones exigidas por cada método estandarizado para la obtención de resultados veraces.

Resultados Obtenidos

Los resultados de la caracterización están expresados según las características fisicoquímicas y biológicas de aguas residuales.

- **Conductividad**

La conductividad se define como la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica y es lo contrario de la resistencia. La unidad de medición utilizada comúnmente es el Siemens/cm (S/cm), con una magnitud de 10^{-6} , es decir micro Siemens/cm ($\mu\text{S/cm}$).

La conductividad es una medida generalmente útil como indicador de la calidad de aguas dulces, debido a que es una medida indirecta de la cantidad de iones en solución, fundamentalmente cloruro, nitrato, sulfato, fosfato, sodio, magnesio y calcio. Cuando existe la presencia de un vertido de aguas servidas en un cuerpo de agua suelen aumentar los valores de la conductividad debido al aumento de la concentración de Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-} u otros iones.

Expresión de resultados

Tabla 21. *Valores obtenidos de la conductividad en cada muestra.*

Muestra	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
1	120
2	201
3	222

Fuente: Propia.

- **Sólidos totales, sólidos suspendidos y sólidos disueltos.**

Los sólidos suspendidos son la porción de sólidos que es retenida en un filtro con un tamaño de poro de $2,0 \mu\text{m}$ o menos y se determina por pesada del filtro o como la diferencia entre sólidos totales y sólidos disueltos, mientras que los sólidos disueltos son la porción de sólidos que pasa a través de un filtro con tamaño de poro de $2,0 \mu\text{m}$ o menos bajo condiciones especiales, se puede determinar por la diferencia entre sólidos totales y sólidos suspendidos. Los SST son el residuo no filtrable de una muestra de agua, y se define como la cantidad de sólidos retenida por un filtro de fibra de vidrio, previamente pesado, posteriormente se deja en el horno para eliminar la humedad y se vuelve a pesar una vez secada para comparar el peso y obtener los sólidos totales.

Expresión de resultados

El cálculo de los sólidos totales, sólidos disueltos y sólidos suspendidos se realizó mediante las Ec. 4, Ec. 5 y Ec. 6 respectivamente.

Tabla 22. Valores obtenidos de los ST, SST, SDT.

Muestra	Sol. Totales (mg/l)	Sol. Suspendidos totales (mg/l)	Sol. Disueltos (mg/l)	Ecuación. Sólidos Totales	Ecuación. Sólidos suspendidos
1	128	16,67	111,33	Ec.4	Ec. 6
2	144	4,44	139,56	Ec.4	Ec. 6
3	186	15,56	170,44	Ec.4	Ec. 6

Fuente: Propia.

Una vez elaborado el ensayo de sólidos se puede observar una variación significativa en relación a cada uno de los tres puntos. Esto se debe a que en el punto #2 el cauce del afluente se intercepta con una tubería colectora de aguas servidas, modificando así todas las características fisicoquímicas y biológicas que se han generado aguas arriba de esta intersección.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la presencia de sólidos en el agua, hay que destacar que en los tres puntos la magnitud de los resultados de sólidos suspendidos totales se encuentra dentro los parámetros establecidos en el Decreto 883 alrededor de un 80% por debajo de lo establecido en la norma.

- **Temperatura**

La temperatura es una variable de gran importancia a tomar en cuenta en el tratamiento de aguas residuales a través de procesos biológicos. Esta puede afectar positiva o negativamente en las reacciones fisicoquímicas que ocurren en el agua,

produciendo un aumento o desaceleración en la actividad bacteriana y la solubilidad del oxígeno en el agua.

La temperatura es una variable utilizada en la mayoría de los ensayos para determinar la calidad de un agua residual o potable. Debido a la sensibilidad que posee esta variable es necesario que la misma sea medida al momento de hacer la captación de la muestra.

Expresión de resultados.

Tabla 23. *Valores obtenidos de la conductividad en cada muestra.*

Muestra	Temperatura °C
1	29,7
2	30,1
3	28,5

Fuente: Propia.

La medición de la temperatura se llevó a cabo entre las 8 y 9 de la mañana, horario en el que se generan temperaturas moderadas en el trópico. Para la elaboración de los cálculos se asumirá una temperatura de 29°C, ya que es muy cercana a los resultados obtenidos en campo y se encuentra en el rango de temperatura óptimo para la reproducción bacteriana.

- **Demanda bioquímica de oxígeno**

La DBO_{5,20} no es más que el parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión, en los 5 días que dura el ensayo de la DBO se llega a oxidar entre el 60% y el 70%. Se utiliza para medir el grado de contaminación, normalmente se mide transcurridos cinco días de reacción y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mgO₂/l). El método consiste en llenar una botella de cierre hermético (Winkler)

con una porción de muestra e inocular hasta rebosar, incubarla bajo condiciones específicas de temperatura (20 °C) durante 5 días. El oxígeno disuelto (OD) se mide antes y después de la incubación, y la DBO se mide con la diferencia de (ODi) inicial y (ODf) final.

Tabla 24. *Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 1.*

		Concentración de la muestra			
Muestra		5ml	10ml	20ml	
1		7	6,95	6,77	ODi (mg/L)
		2,9	2,85	2,4	ODf (mg/L)

Fuente: Propia.

Tabla 25. *Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 2.*

		Concentración de la muestra			
Muestra		5ml	10ml	20ml	
2		6,9	6,81	6,71	ODi (mg/L)
		3,9	2,83	3,42	ODf (mg/L)

Fuente: Propia.

Tabla 26. *Valores experimentales de oxígeno disuelto muestra 3.*

		Concentración de la muestra			
Muestra		10ml	20ml	30ml	
3		6,73	6,62	6,55	ODi (mg/L)
		3,06	2,76	2,84	ODf (mg/L)

Fuente: Propia.

Oxígeno disuelto del inóculo en el día 1 y el día 5.

ODi= 702 mg/L

ODf= 4,55 mg/L

El cálculo de la DBO₅ se realizó mediante la ecuación 8 y debido a que cada una de las diluciones cumple con los criterios de selección de resultados, expuestos en el capítulo II, donde el consumo de OD debe ser como mínimo 1mg/l, la diferencia entre el ODi y ODf debe ser como mínimo 2mg/l y el OD consumido debe estar en un 30 y 70% del ODi por esta razón se presentará como resultado final, un promedio de los resultados obtenidos.

Tabla 27. *Valores calculados de la DBO₅ de muestra 1.*

Diluciones	DBO₅ (mg/L)	DBO₅ promedio (mg/L)
5ml	246	144.85
10ml	123	
20ml	65.55	

Fuente: Propia.

Tabla 28. *Valores calculados de la DBO₅ de muestra 2.*

Diluciones	DBO₅ (mg/L)	DBO₅ promedio (mg/L)
5ml	180	116.05
10ml	118.8	
20ml	49.35	

Fuente: Propia.

Tabla 29. *Valores calculados de la DBO₅ de muestra 3.*

Diluciones	DBO₅ (mg/L)	DBO₅ promedio (mg/L)
10ml	110.1	68.36
20ml	57.9	
30ml	37.1	

Fuente: Propia.

Analizando los resultados obtenidos, se puede observar una disminución considerable del DBO₅ en un 19,88% del punto #2 con respecto al punto #1, esto se debe a la singularidad que posee el cauce en el punto #2, en donde el mismo se intercepta con un vertido de aguas servidas proveniente de las comunidades de dicho sector. Este vertido de aguas servidas tiene una característica muy peculiar, ya que en su recorrido antes de unirse al cauce natural atraviesa una especie de filtros biológicos o sustrato generados por el bote de residuos sólidos producto de escombros, arenas y material de construcción. Al unirse este bote de aguas servidas con el cauce natural se produce una mejora en la calidad de agua del cauce. Hay que destacar que en los tres puntos el parámetro DBO₅ se encuentra fuera lo requerido por el Decreto 883.

- **Coliformes.**

Los coliformes presentan bacterias aerobias y anaerobias que son de tipo gran negativas, estas fermentan la lactosa, produciendo gas y ácido en 48 horas de incubación a 35 °C. Los coliformes fecales cuyas especies clásicas, son *Escherichia coli* y *Enterobacter aerógenes*, fermentan la lactosa con producción de ácido y gas a 44 °C ($\pm 0,5$) en 24 horas. El método para la determinación de la presencia de coliformes totales y fecales en el agua residual consiste en una prueba con la técnica de fermentación de tubos múltiples; esta técnica se puede dividir en dos fases, la fase presuntiva y la fase confirmativa; la presuntiva se realiza mediante la incubación de las bacterias sembradas en el caldo lactosado, y para la fase confirmativa se utiliza el caldo verde brillante en caso de coliformes totales y el E.C. Broth en caso de coliformes fecales. Para la muestra #1 y #2 se utilizaron 6 diluciones y para la muestra #3 se utilizaron 5 diluciones. Para la lectura de los tubos de fermentación se utilizará el anexo de la página 177.

Tabla 30. *Lecturas de los tubos de ensayo*

Muestra	Lectura Presuntiva de tubos (48 horas)	Lectura Confirmativa de Coliformes Totales	Lectura Confirmativa de Coliformes Fecales (48 horas)
1	3-3-2	3-3-2	3-3-2
2	3-3-1	3-1-1	3-1-1
3	3-3-2	3-3-2	3-3-2

Fuente: Propia.

Tabla 31. *Valores obtenidos de coliformes totales y fecales.*

Muestra	Diluciones	NMP/100ml
1	6	1100x10 ⁵
2	6	75x10 ⁵
3	5	1100x10 ⁴

Fuente: Propia.

De los resultados obtenidos se destaca la reducción de este parámetro en un 93% entre el punto #1 y el punto #2. El punto #3 presenta condiciones de calidad de agua más desfavorables que el punto #2 pero comparándolo con el punto #1 se logra observar una reducción del 90%, hay que destacar que en los tres puntos los coliformes totales y fecales se encuentran fuera de lo requerido por el Decreto 883.

- **Nitritos y nitratos**

Los nitritos y nitratos son iones que existen de manera natural en la aguas y forman parte del ciclo del nitrógeno. La nitrificación ocurre cuando se produce la oxidación de un compuesto de amonio y esta pasa a nitrito, especialmente por la acción nitrificante llamada nitrosomas, posteriormente los nitritos serán entonces oxidados a nitratos por la bacteria nitrobacter. Cuando estos compuestos son lanzados al medio acuático, pueden producir enfermedades a recién nacidos y toxicidad para los peces. Para el análisis de este parámetro se utilizaron dos test de nitritos y nitratos utilizados en acuarios y peceras marca SALIFERT.

Tabla 32. Valores obtenidos de nitritos en cada muestra.

Muestra	NO ₂ (mg/L)
1	0,75
2	1
3	0,25

Fuente: Propia.

Tabla 33. Valores obtenidos de nitratos en cada muestra.

Muestra	NO ₃ (mg/L)
1	10
2	7
3	3

Fuente: Propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se logra observar que las concentraciones de nitritos NO₂⁻ y nitratos NO₃⁻ en el punto #1 se encuentra al límite de lo permitido por la norma Decreto 883, sin embargo en los puntos #2 y #3 ambos parámetros se encuentran dentro de lo establecido por la norma. Durante el desarrollo de la investigación de campo se observó la ausencia total de peces o cualquier otra especie macroscópica.

Tabla 34. *Resumen de Caracterización de las aguas servidas para cada muestra.*

Parámetros evaluados	Unidad	Valores permitidos por norma(Decreto 883)	Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3
Conductividad	µs/cm	-	120	201	222
Sólidos Suspendidos	mg/l	80	16.67	4.44	15.56
Sólidos Disueltos	mg/l	-	111.33	139.56	170.44
Sólidos Totales	mg/l	-	128	144	186
Temperatura	°C	-	29.7	30.1	28.5
DBO ₅	mg/l	60	144.85	116.05	68.36
Coliformes totales	NPM/100ml	1000	1100x10 ⁵	75x10 ⁵	1100x10 ⁴
Coliformes fecales	NPM/100ml	1000	1100x10 ⁵	75x10 ⁵	1100x10 ⁴
Nitritos	mg/l	NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ =10	0.75	1	0.25
Nitratos	mg/l	NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ =10	10	7	3

Fuente: Propia.

Tabla 35. *Capacidad de remoción de contaminantes del Afluyente.*

Porcentaje de remoción de contaminantes del Afluyente	
Parámetro	% Remoción de Parámetros
DBO ₅	52.80
Coliformes Totales	90.00
Coliformes Fecales	90.00
Nitritos NO ₂	75.00
Nitratos NO ₃	70.00

Fuente: Propia.

Analizando los resultados de todos los parámetros que determinan la calidad de agua de un afluyente, podemos observar que el cauce natural posee una excelente capacidad de remoción de contaminantes, en donde se logra reducir hasta en un 90% la cantidad de coliformes totales y fecales además de un 52,80% en la reducción de DBO₅. Sin embargo las magnitudes de muchos de estos parámetros se encuentran fuera de lo establecido en el

Decreto 883, en donde se puede observar que la DBO₅ se encuentra fuera de los parámetros establecidos en la normativa al igual que los coliformes totales y fecales. Estos dos indicadores son la principal fuente de contaminación del afluente, por ende se requiere diseñar un sistema de tratamiento de aguas servidas que reduzcan principalmente estos dos parámetros, para así disminuir el nivel de contaminación del afluente, que es el principal objetivo de esta investigación.

- **Descripción del comportamiento del cauce natural.**

De acuerdo con los resultados obtenidos de la delimitación del cauce natural y de los ensayos de calidad de agua, se logró observar que el mismo posee una gran versatilidad de características y capacidades hidráulicas. El punto #1 presenta la unión entre un colector de aguas de lluvia con el cauce natural, en el mismo punto se observa una gran cantidad de sólidos suspendidos y flotantes como bolsas, envases plásticos, cartones, entre otros; el punto #1 a su vez presenta la mayor sección transversal del cauce en comparación con los otros dos puntos de toma de muestras.

El punto #2 posee un comportamiento muy particular, ya que en el mismo se evidencia la unión entre: un vertido de aguas servidas proveniente de las comunidades aledañas(a través de un colector de cloacas) y un cauce natural. El colector de cloacas se encuentra a unos 50 metros del cauce natural, y de acuerdo a los comentarios hechos por los habitantes del sector, “en esta zona se producen malos olores” y se observa la formación de una cárcava que ha ido incrementando sus dimensiones con el tiempo. Con la finalidad de reducir el avance de la cárcava los lugareños la convirtieron en una zona de bote de escombros: rocas y arenas, restos cerámicos, productos de las actividades de construcción, esto trajo como consecuencia que el vertido de aguas servidas tuviera que pasar por una serie de estratos formados por los escombros antes citados, antes de unirse al cauce natural, otra consecuencia de gran importancia que se generó por esta medida, fue que se logró controlar casi en su totalidad los malos olores producidos por las aguas servidas (según comentarios emitidos por la comunidad). Analizando los resultados de los ensayos de

calidad de agua, se observa una disminución considerable de DBO_5 y coliformes del punto #2 con respecto al punto#1.

El punto #3, que se encuentra a 100 metros de la desembocadura respecto al Lago Macagua, presenta la sección transversal más pequeña, generando así velocidades del cauce mayores en comparación con el punto #1 y #2. En dicho punto las aguas del cauce presentan una apariencia cristalina y no se observa la presencia de algas ni peces. Los análisis de calidad de agua del punto #3 presentan los parámetros DBO_5 y coliformes fecales, también fuera de lo requerido por la norma Decreto 883. (Ver figura 12).

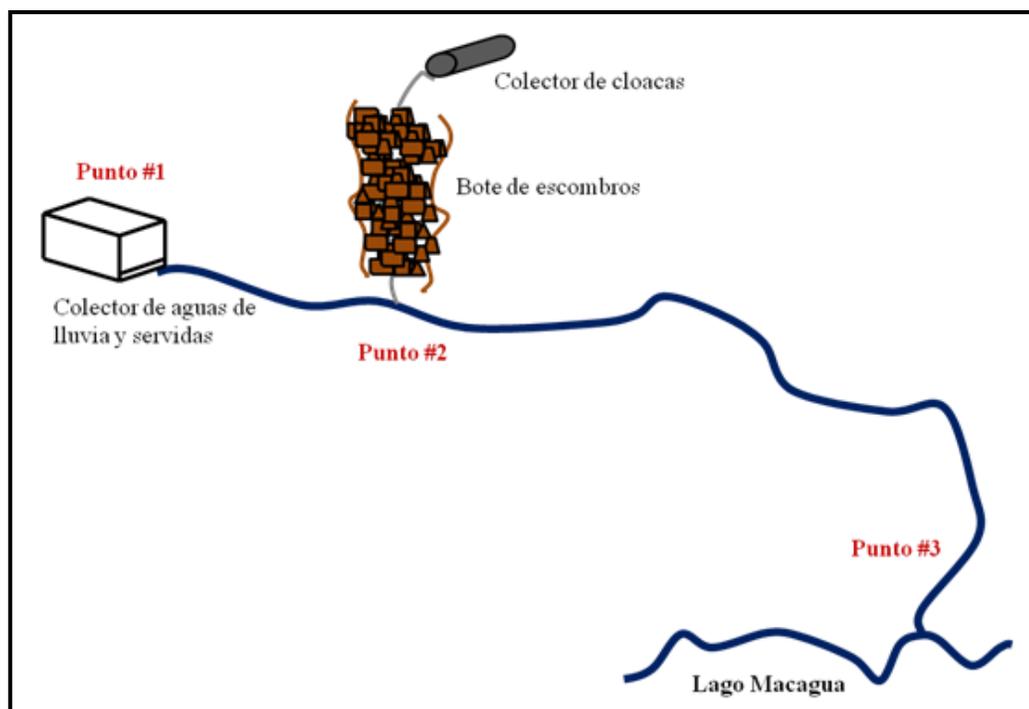


Figura 12. *Características y comportamiento del cauce natural.*

Fuente: Propia.



Figura 13. *Punto #1, unión de canal colector con el cauce natural.*

Fuente: Propia.



Figura 14. *Unión entre el bote de escombros y vertido de aguas servidas.*

Fuente: Propia.



Figura 15. *Efluente aguas abajo del bote escombros.*

Fuente: Propia.



Figura 16. *Punto #2, aguas debajo de la unión entre el vertido de aguas servidas y el cauce natural.*

Fuente: Propia.



Figura 17. Punto #3, toma de muestras, a 100 metros de la desembocadura en el Lago Macagua.

Fuente: Propia

EVALUAR LOS DISTINTOS MÉTODOS Y PROCESOS DE TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE AFLUENTES NATURALES, DE BAJO IMPACTO ECOLÓGICO Y QUE SE ADAPTEN AL AFLUENTE.

Para el desarrollo de este objetivo se realizó una investigación bibliográfica generada por distintos autores donde se plantean varios métodos de tratamiento de aguas servidas a través de procesos biológicos. Estos métodos se enfatizarán en tratamientos de aguas servidas en suelo, utilizando sistemas de humedales artificiales y sistemas lagunares. De acuerdo a las características de las aguas residuales obtenidas en el diagnóstico se puede aclarar que el cuerpo de agua a tratar no requiere un tratamiento convencional como lodos activados, ya que las características de las aguas a tratar se encuentran en magnitudes relativamente baja para un tratamiento convencional y a su vez ideales para ser tratadas por los métodos no convencionales como humedales artificiales y sistemas lagunares. En este objetivos se presentarán cada una de las características, funciones, ventajas y desventajas de

cada uno de estos métodos de tratamiento y se compararan, para así seleccionar el método que más se adapte a las características del afluente y genere el menor impacto desde el punto de vista ecológico, operativo y de mantenimiento como fue explicado con más detalles en las delimitaciones de la investigación.

Características de sistemas de humedales como opción para la remoción de contaminantes en las aguas servidas

Tabla 36. *Comparación de Sistemas de Humedales Artificiales.*

	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	
		Horizontal	Vertical
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios (aguas ya tratadas, ej. lagunas, lodos activados, entre otros).	Para tratar flujos primarios (efluentes de tanques IMHOFF, pozos sépticos, lagunas de estabilización).	Para tratar flujos primarios (efluentes de tanques IMHOFF, pozos sépticos, lagunas de estabilización).
Olor	Puede ser controlado con cúpulas para la posterior extracción del olor.	No existe	No existe
Insectos	Control es costoso	No existe	No existe
Protección térmica	Mala, las bajas temperaturas afectan el proceso de actividad bacteriana y biológica ya que el agua se encuentra a la intemperie.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo, el agua mantiene una temperatura constante en su proceso de tratamiento.	Buena, por acumulación de restos vegetales y el flujo subterráneo, el agua mantiene una temperatura constante en su proceso de tratamiento.
Área	Requieren grandes extensiones de Superficie.	Requieren superficies de menor tamaño en comparación con los humedales de flujo superficial de 2,5 - 5 ha.	Son los que requieren menor superficie para tratar el agua residual.
Altura del Humedal (m)	<0,6	0,45 - 0,6	1<

Cont.

	Flujo superficial	Flujo subsuperficial	
		Horizontal	Horizontal
Pendiente (%)	0,5 – 1	0,5 -1	N/A
Carga Orgánica g DBO5/ m2.día	4 – 6	4 – 6	20 – 40
Nitrificación	Complicada	Complicada	Se consigue
Tiempo de retención Hidráulica (días)	5 – 15	5 – 10	1 – 2
Tipo de Relleno	N/A	Arenas y Gravas	Arenas y Gravas
Costo	Menor costo en relación al subsuperficial	Mayor costo debido al material granular utilizado.	Mayor costo debido al material granular utilizado.
Valor ecosistema	Mayor valor para la fauna	Menor valor como ecosistema, el agua es poco accesible para la fauna	Menor valor como ecosistema, el agua es poco accesible para la fauna
Usos	Son tratamientos adicionales a los sistemas convencionales (usadas para tratamientos terciarios)	Puede usarse como tratamiento secundario.	Puede usarse como tratamiento secundario.
Usos generales	Son de restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento de aguas servidas de pequeñas poblaciones.	Tratamiento de aguas servidas de pequeñas poblaciones.
Operación	Sencilla	Sencilla	Compleja
Funcionamiento	Continuo	Continuo	Discontinuo

Fuente: Propia.

Características de sistemas lagunares como opción para la remoción de contaminantes en las aguas servidas

Tabla 37. Comparación de sistemas lagunares.

	Tipos de Lagunas			
	Anaerobia	Facultativa	Maduración	Aerobia de alta tasa
% Remoción de Sólidos en suspensión	50 – 70	40	70 – 90	30 – 40
% Remoción de DBO	60 – 90	60 – 90	60 – 80	80 – 95
% Remoción de Nitrógeno	05 – 10	30 – 60	35 – 80	–
% Remoción de Fósforo	0 – 5	0 – 30	10 – 60	–
Tiempo Retención (días)	20 – 50	5 – 30	5 – 20	3 – 6
Área (ha)	< 5	≤ 15	≤ 3	≤ 1
Profundidad (m)	3 – 10	1,5 – 2,5	0,6 – 1,5	0,3 – 0,5
Insectos	Existe la presencia de mosquitos cuando hay excesivos residuos flotantes en estas lagunas.	Puede existir la proliferación de mosquitos cuando hay una excesiva reproducción de plantas acuáticas, ya que las mismas sirven de habitat para los mosquitos.	Puede existir la proliferación de mosquitos cuando hay una excesiva reproducción de plantas acuáticas, ya que las mismas sirven de habitat para los mosquitos.	Puede existir la proliferación de mosquitos cuando hay una excesiva reproducción de plantas acuáticas, ya que las mismas sirven de habitat para los mosquitos.

Cont.

Tipos de Lagunas				
	Anaerobia	Facultativa	Maduración	Aerobia de alta tasa
Olor	Existe la presencia de malos olores debido a la liberación de sulfuro de hidrógeno (H ₂ S) en la reducción vía anaerobia de los sulfatos presentes.	Se presentan malos olores cuando la laguna es mal diseñada o poseen sobrecarga orgánica.	Se presentan malos olores cuando la laguna es mal diseñada o poseen sobrecarga orgánica.	No deberían de presentarse malos alores, a menos que la laguna esté mal diseñada o posea una sobrecarga orgánica.
Operación	Sencilla	Sencilla	Sencilla	Sencilla
Usos	Funcionan como tratamiento primario, siendo su objetivo primordial la eliminación de materia sedimentable y flotante, además de que estabiliza los lodos que se van sedimentando en el fondo de las lagunas.	Funcionan como tratamiento secundario y su objetivo se centra en la reducción de contaminantes mediante mecanismos biológicos de la materia orgánica tanto en forma disuelta, como coloidal y tiene lugar, vía aerobia en la superficie y vía anaerobia en el fondo. (Reducción de DBO ₅).	Funcionan como tratamiento terciario y su objetivo se centra en conseguir un elevado grado de desinfección de las aguas mediante el abatimiento de un gran número de los organismos patógenos.	Deberán usarse solo como método tratamiento de aguas residuales, cuando hubiera la factibilidad del reaprovechamiento de la producción de algas. Su operación exige personal capaz y su uso se restringe a unidades experimentales

Fuente: Propia.

ELABORAR UNA PROPUESTA CON LOS DISTINTOS MÉTODOS, PROCESOS Y/O ESTRUCTURAS, QUE PERMITAN MITIGAR LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN PRESENTES EN LAS AGUAS DEL AFLUENTE Y ADAPTARLAS A LOS PARÁMETROS ESTABLECIDOS EN EL DECRETO 883.

Haciendo un análisis al diagnóstico de la calidad de agua del afluente, se denota que la principal fuente de contaminación se encuentra en la demanda biológica de oxígeno y la cantidad de organismos patógenos presentes. La selección del diseño del mecanismo y/o estructura que servirá como sistema de depuración estará delimitada bajo los siguientes criterios y premisas:

- El diseño debe poseer la mayor eficiencia posible de remoción de DBO_5 y organismos patógenos.
- Debe generar el menor impacto posible tanto al ecosistema como a la sociedad.
- El mecanismo de depuración debe ser de fácil operación y poco mantenimiento.
- La propuesta debe contener la menor cantidad de procesos y equipos con la finalidad de generar una autogestión en el sistema.
- Se debe diseñar una alternativa de bajo costo.

En muchos casos una limitante en el diseño de un sistema de depuración es la superficie donde se colocara la estructura. El diseño actual contará con una superficie de construcción de 40,5 hectáreas y se pudieran agregar otras 10,5 hectáreas en donde se encuentran propiedades privadas como viviendas y sembradíos, sin embargo en el diseño de las propuestas se utilizará únicamente la superficie 1.

Tabla 38. *Superficie disponible para construcción de sistema de depuración de aguas servidas.*

Superficie disponible Actual (1)	
Ancho (m):	450
Largo (m):	900
Área de trabajo (m2):	405000
Área de trabajo (ha):	40,5

Fuente: Propia.

Tabla 39. *Posible superficie adicional de uso privado.*

Superficie de uso Privado (2)	
Ancho (m):	150
Largo (m):	700
Área de trabajo (m2):	105000
Área de trabajo (ha):	10.5

Fuente: Propia.



Figura 18. *Superficies para construcción de sistema de depuración de aguas servidas.*
Fuente: Google Earth.

Comparando las características, usos, eficiencias, ventajas y desventajas de los métodos de depuración de aguas residuales descritas en el objetivo anterior con el diagnóstico realizado del afluente, se determinó que los métodos que más se adaptaban a las características del agua a tratar, a las condiciones geográficas y a las premisas del diseño, son los humedales de flujo subsuperficial horizontal y las lagunas de maduración, ya que ambas opciones son capaces de procesar altas carga de demanda orgánica y de organismos patógenos, además de esto se adaptan a las dimensiones de superficie disponibles.

En la selección del método de depuración se descartaron los humedales de flujo superficial ya que no se cuenta actualmente con la suficiente área superficial para la depuración del afluente, a su vez también fueron descartados los humedales de flujo subsuperficial vertical ya que el mismo posee un funcionamiento y mantenimiento complejo además de ser el más costoso por el material granular utilizado en la conformación del sustrato. Las lagunas anaeróbicas y facultativas fueron descartadas ya que las características de las aguas del afluente presentan niveles de DBO_5 relativamente bajos y fácil de tratar con lagunas de menor envergadura y a su vez contiene un nivel de organismos patógenos que rondan alrededor de la quinta potencia y contienen un nivel de conductividad relativamente alto, otra consecuencia que generan las opciones anteriores, son la proliferación de mosquitos y malos olores, afectando severamente a los habitantes de los alrededores del sistema de tratamiento. Todas estas limitaciones y consecuencias hacen que las lagunas de maduración y los humedales de flujo subsuperficial horizontal sean las mejores opciones para tratar el afluente.

En esta etapa de la investigación se procedió a realizar todos los cálculos matemáticos que conllevan el diseño de tratamientos de aguas servidas a través de los métodos antes mencionados. Como herramienta para la elaboración de estos cálculos se hizo uso del software Microsoft Excel.

A continuación se presentaran tres propuestas para la solución de la problemática actual que se centran en la combinación de humedales de flujo subsuperficial horizontal y lagunas de maduración para el tratamiento del afluente. Los datos de entrada para el diseño de las propuestas referentes a la calidad de agua del afluente serán tomados de la tabla 34, específicamente los de la muestra #3, ya que se desea aprovechar el potencial de remoción de contaminantes del cauce natural y de esta manera facilitar el tratamiento del afluente.

Propuesta 1.

MADURACIÓN – MADURACIÓN (EN SERIE).

La propuesta 1 consiste en el diseño de dos lagunas de maduración en serie. Esta opción tiene como objetivo principal la disminución de organismos patógenos que son la principal fuente de contaminación del afluente. El diseño de todas las propuestas estará compuesto por un tratamiento primario que contendrá un desbastador y un vertedero Parshall, seguido del método de tratamiento. La figura 19 representa el orden y funcionamiento de la propuesta 1.

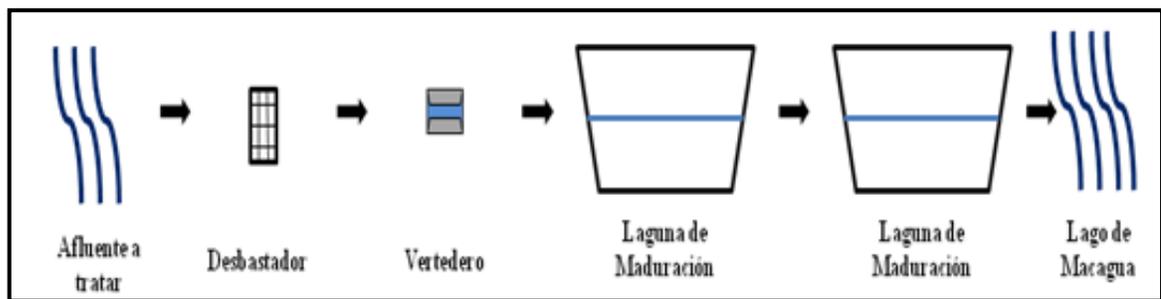


Figura 19. *Esquema de propuesta 1. L. Maduración – L. Maduración (en serie).*

Fuente: Propia.

4. Diseño y dimensionamiento.

En el dimensionamiento de las lagunas de maduración se asumieron valores conservadores que se encuentren dentro de los expuestos en la Tabla 37 y cuyo resultado final de calidad del afluente cumpliera con los requisitos establecidos en el Decreto 883.

5. Datos de entrada.

Tabla 40. *Datos de entrada para diseño de laguna de maduración.*

Datos de entrada de Laguna		
Caudal de Afluente (m ³ /día)	8222.09	Tabla. 20
Altura "h"(m)	1	Tabla. 37
Temperatura (°C)	29	-
Tiempo de retención (días)	9	Tabla. 37
Coliformes fecales de entrada (NMP/100ml)	11000000	Tabla. 34
Concentración de DBO ₅ (mg/l)	68.36	Tabla. 34

Fuente: Propia.

6. Resultados obtenidos.

Tabla 41. *Resultados del diseño de laguna de maduración.*

Características y Parámetros	Resultados	Ecuaciones
Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)	12.44	Ec. 46
Coefficiente de velocidad de remoción de DBO ₅ (días ⁻¹)	1.87	Ec. 12
Área (m ²)	73998.81	Ec. 48
Ancho (m)	192.35	Ec. 49
Largo (m)	384.70	Ec. 50
Cantidad de Lagunas de Maduración en serie	2.00	-
Eficiencia de reducción de DBO ₅ (%)	94.38	Ec. 51
Concentración de DBO ₅ en el efluente (mg/l)	0.22	-
Concentración de CF en el efluente del sistema (CF/100 ml)	861.77	Ec.45
Eficiencia de reducción de Coliformes (%)	99.11	Ec. 52

Fuente: Propia.

Con el diseño de la propuesta 1 se puede observar que el sistema de depuración logra reducir la DBO₅ en un 94,38% y la cantidad de coliformes totales y fecales en un 99,11%. La gran eficiencia que posee el sistema de depuración genera un efluente de muy buena calidad para ser vertido en un cuerpo de agua natural, en donde ambos parámetros se encuentran por debajo de lo requerido en el Decreto 883 en un 83,13% y 13,82% respectivamente.

Tabla 42. *Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.*

Parámetro	Porcentaje por debajo de la Norma. (%)
DBO ₅	99,63
Coliformes Fecales	13,82

Fuente: propia

Propuesta 2.

MADURACIÓN – 2 HASSH (PARALELO).

El diseño de esta propuesta consiste en la utilización de una laguna de maduración en serie con dos humedales de flujo subsuperficial horizontal que a su vez se encuentran en paralelo. Esta propuesta permite la eliminación de metales pesados y sólidos en suspensión que se dan con mayor dificultad en los sistemas de depuración lagunar, además de la remoción de DBO₅ y coliformes fecales. La siguiente imagen representa el funcionamiento de esta propuesta.

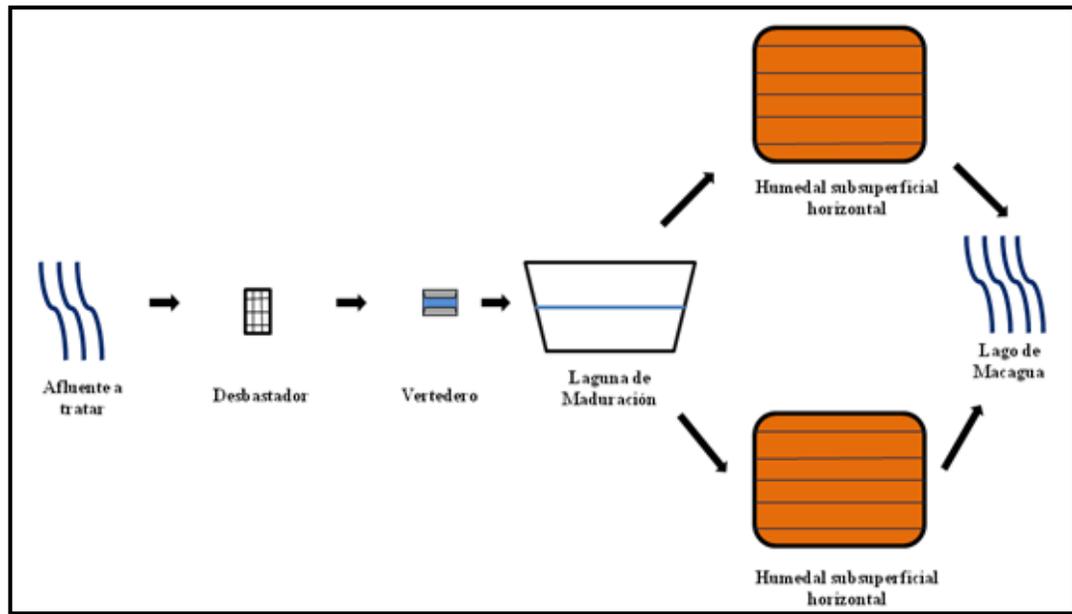


Figura 20. Esquema de propuesta 2. 1 L. Maduración (en serie) – 2 HASSH (paralelo).
Fuente: Propia.

7. Diseño y dimensionamiento.

En el dimensionamiento de los humedales artificiales y las lagunas de maduración se asumieron valores conservadores que se encuentren dentro de los expuestos en la Tabla 36 y Tabla 37 respectivamente cuyo resultados finales de calidad de agua del efluente cumplieran con los requisitos establecidos en el Decreto 883.

8. Datos de entrada para el diseño de laguna.

Tabla 43. Datos de entrada para diseño de laguna de maduración.

Datos de entrada de Laguna		
Caudal de Afluente (m ³ /día)	8222.09	Tabla. 20
Altura "h"(m)	1	Tabla. 37
Temperatura (°C)	29	-
Tiempo de retención (días)	10	Tabla. 37
Coliformes fecales de entrada (NMP/100ml)	11000000	Tabla. 34
Concentración de DBO ₅ (mg/l)	68.36	Tabla. 34

Fuente: Propia.

9. Resultados obtenidos.

Tabla 44. Resultados del diseño de laguna de maduración.

Características y Parámetros	Resultados	Ecuaciones
Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)	12.44	Ec. 46
Coefficiente de velocidad de remoción de DBO ₅ (días ⁻¹)	1.87	Ec. 12
Área (m ²)	82220.9	Ec. 48
Ancho (m)	202.75	Ec. 49
Largo (m)	405.51	Ec. 50
Cantidad probables de lagunas	1	-
Eficiencia de reducción de DBO ₅ (%)	94.91	Ec. 51
Concentración de DBO ₅ en el efluente (mg/l)	3.48	-
Concentración de CF en el efluente del sistema (CF/100 ml)	87704.15	Ec.45
Eficiencia de reducción de Coliformes (%)	99.20	Ec. 52

Fuente: Propia.

10. Datos de entrada para el diseño de humedal.

Tabla 45. Datos de entrada para diseño de cada HASSH.

Datos de entrada para cada Humedal		
Caudal de Afluente/2 (m ³ /día)	4111.045	Tabla. 20
Altura "h"(m)	0.9	Tabla. 36
Temperatura (°C)	29	-
Tiempo de retención (días)	9	Tabla. 36
Coliformes fecales del Afluente (NMP/100ml)	87704.15	Tabla. 34
Concentración de DBO ₅ del Afluente (mg/l)	3.48	Tabla. 34
Porosidad "n"	0.35	Tabla. 9
"Ra" Proporción Long/ancho. 2:1	2	Pág. 111
Pendiente %	0.5	Tabla. 10

Fuente: Propia.

11. Resultados obtenidos.

Tabla 46. Resultados del diseño de cada HASSH.

Características y Parámetros	Resultados	Ecuaciones
Coefficiente de velocidad de remoción de DBO ₅ (días ⁻¹)	1.87	Ec.12
Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)	12.44	Ec.13
Área de cada humedal (m ²)	117458.43	Ec.15
Ancho (m)	242.34	Ec.16
Largo (m)	484.68	Ec.17
Cantidad probable de humedales en paralelo	2.00	-
Concentración de DBO ₅ en el efluente (mg/l)	0.19	Ec.11
Eficiencia de reducción de DBO ₅ (%)	94.37	-
Concentración de CF en el efluente del humedal (NMP/100 ml)	776.28	Ec.11
Eficiencia de reducción de Coliformes Fecales (%)	99.11	-

Fuente: Propia.

En la primera etapa de esta propuesta el sistema alcanzó depurar el 94,91% de DBO₅ y el 99,20% de coliformes fecales, sin embargo los organismos patógenos siguen estando fuera de los parámetros establecidos en el Decreto 883, por esto se hace la introducción en serie a la laguna de maduración de dos humedales subsuperficiales de flujo horizontal que a su vez se encuentran en paralelo entre ellos. Esta segunda etapa del tratamiento alcanza a reducir la DBO₅ proveniente de la laguna de maduración en un 94,37% y los coliformes fecales en un 99,11% situando ambos parámetros de contaminación por debajo de lo establecido en el Decreto 883 en un 99,67% y 22,37% respectivamente.

Tabla 47. Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.

Parámetro	Porcentaje por debajo de la Norma. (%)
DBO ₅	99,67
Coliformes Fecales	22,37

Fuente: Propia.

Propuesta 3.

2 L. MADURACIÓN (SERIE) – 2 L. MADURACIÓN (PARALELO).

Esta propuesta consiste en el diseño de dos lagunas de maduración en serie, que a su vez se encuentran en paralelo con otras dos lagunas de maduración. Con esta propuesta se pretende aumentar la capacidad de recepción del caudal a tratar del sistema de depuración en un 100% en comparación con la propuesta 1; permitiendo una mejor maniobrabilidad del flujo ante la presencia de un evento extremo como una creciente máxima probable que ocasione un aumento del caudal del río o simplemente la ocurrencia de un mantenimiento preventivo o correctivo de alguna de las lagunas, sin que ocurra la interrupción del tratamiento del afluente. La figura 21 presentada a continuación representa el funcionamiento de la propuesta 2.

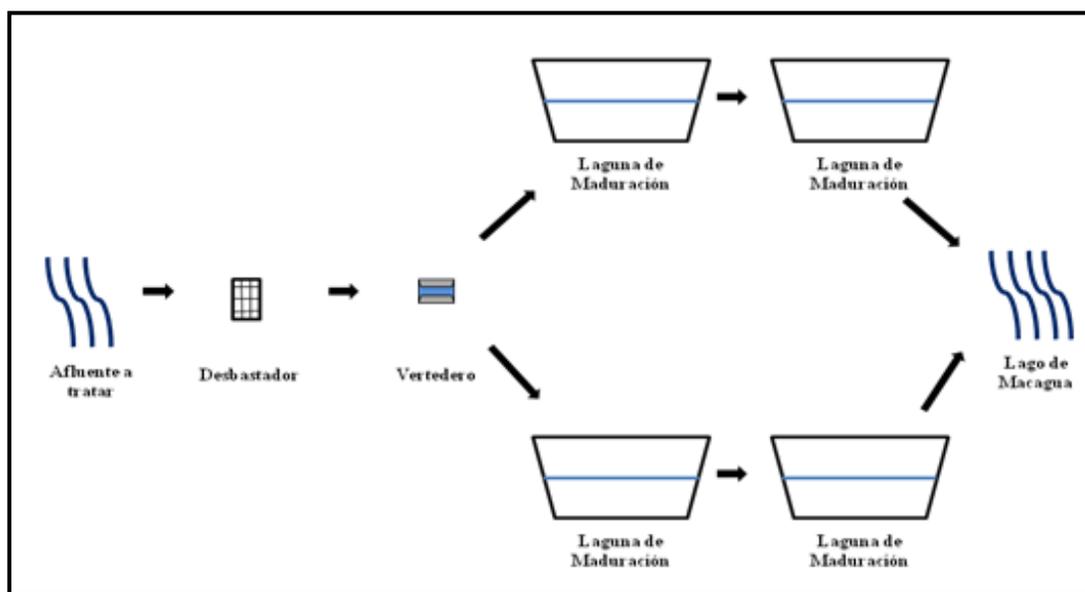


Figura 21. Esquema de propuesta 3. 2 L. Maduración (serie) – 2 L. Maduración (paralelo).

Fuente: Propia.

12. Diseño y dimensionamiento.

En el dimensionamiento de las lagunas de maduración se asumieron valores conservadores que se encuentren dentro de los expuestos en la tabla 37 y cuyo resultado final de calidad del afluente cumpliera con los requisitos establecidos en el Decreto 883.

13. Datos de entrada.

Tabla 48. *Datos de entrada para diseño de cada laguna de maduración.*

Datos de entrada de Laguna		
Caudal de Afluente (m ³ /día)	4111.04	Tabla. 20
Altura "h"(m)	0,5	Tabla. 37
Temperatura (°C)	29	-
Tiempo de retención (días)	9	Tabla. 37
Coliformes fecales de entrada (NMP/100ml)	11000000	Tabla. 34
Concentración de DBO ₅ (mg/l)	68.36	Tabla. 34

Fuente: Propia.

14. Resultados obtenidos.

Tabla 49. *Resultados del diseño de cada laguna de maduración.*

Características y Parámetros	Resultados	Ecuaciones
Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)	12.44	Ec. 46
Coefficiente de velocidad de remoción de DBO ₅ (días ⁻¹)	1.87	Ec. 12
Área (m ²)	73998.81	Ec. 48
Ancho (m)	192.35	Ec. 49
Largo (m)	384.70	Ec. 50
Cantidad de Lagunas de Maduración en serie	2	-
Eficiencia de reducción de DBO ₅ (%)	94.38	Ec. 51
Concentración de DBO ₅ en el efluente (mg/l)	0.22	-
Concentración de CF en el efluente del sistema (CF/100 ml)	861.77	Ec.45
Eficiencia de reducción de Coliformes (%)	99.11	Ec. 52

Fuente: Propia.

Al igual que en la propuesta 1, se logró reducir la DBO₅ en un 94,38% y la cantidad de coliformes totales y fecales en un 99,11%, situándose por debajo de los parámetros establecidos en el Decreto 883 en un 99,63% y 13,82% respectivamente.

Tabla 50. *Comparación de resultados con el Decreto 883 “Normas para el control de la calidad de los cuerpos de agua”, Capítulo III, sección III, Art. 18.*

Parámetro	Porcentaje por debajo de la Norma. (%)
DBO ₅	99,63
Coliformes Fecales	13,82

Fuente: Propia.

Propuesta Final

Esta propuesta consiste en el diseño de una tabla comparativa donde se exponen cada una de las características, ventajas y desventajas de las propuestas antes analizadas.

Tabla 51. *Comparación de propuestas para una selección más acertada.*

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Calidad de agua	Al igual que la propuesta 3 los parámetros de calidad de agua DBO ₅ y coliformes fecales logran situarse por debajo de lo establecido en el Decreto 883 en un 99,63% y 13,82% respectivamente.	Esta propuesta ofrece la mejor calidad de agua del afluente en comparación con la propuesta 1 y 3, con la misma se logra establecer por debajo de lo requerido en el Decreto 883 los parámetros DBO ₅ y coliformes fecales en un 99,67% 22,37% respectivamente.	Al igual que la propuesta 1 los parámetros de calidad de agua DBO ₅ y coliformes fecales logran situarse por debajo de lo establecido en el Decreto 883 en un 99,63% y 13,82% respectivamente.

Cont.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Beneficio a la comunidad	<p>En esta propuesta al igual que en la #3 se puede implantar el desarrollo de la piscicultura en la segunda laguna del sistema en serie, pero su volumen de agua y capacidad para desarrollar estas actividades está limitada por la utilización de una sola laguna, a diferencia de la propuesta 3 en donde se cuenta con dos lagunas de la misma envergadura.</p>	<p>Esta propuesta no ofrece algún beneficio de gran relevancia para la comunidad, ya que en su segunda etapa del tratamiento, el agua no se encuentra al alcance de algún posible usuario porque la misma se encuentra por debajo de la superficie del humedal.</p>	<p>Esta propuesta ofrece el mayor beneficio a la comunidad, ya que en la segunda serie de lagunas del sistema se podrían desarrollar actividades de riego ó piscicultura debido al gran volumen de agua que estas poseen y a la excelente calidad del agua. Esta sería una fuente de trabajos e ingresos económicos de gran importancia para la comunidad.</p>
Insectos	<p>Si no se hace un control de malezas en los alrededores del sistema lagunar, podría generarse la proliferación de zancudos y otros insectos.</p>	<p>Únicamente en la primera fase del tratamiento pudiera generarse la proliferación de zancudos si no se controlan las malezas en los alrededores de la laguna, sin embargo en la segunda fase del tratamiento no existe la presencia de zancudos ya que el agua no se encuentra al alcance de los mismos.</p>	<p>Si no se hace un control de malezas en los alrededores del sistema lagunar, podría generarse la proliferación de zancudos y otros insectos.</p>

Cont.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Superficie	<p>Esta es la propuesta que requiere menor superficie para construir el sistema de depuración, abarcando un área superficial de 14,79 ha.</p>	<p>En comparación con las demás propuestas, esta solicita la mayor superficie para la construcción del sistema de depuración, debido a la gran área que abarcan los 2 humedales del sistema. Esta propuesta abarca un 53% más de área que la propuesta 1 y un 7% más que la propuesta 3. La misma abarca un área superficial de 31,71 ha.</p>	<p>Esta propuesta requiere un 100% más de superficie que la propuesta 1, pero sigue siendo inferior a la propuesta 2 en un 7%, la misma posee un área superficial de 29,59 ha.</p>
Mantenimiento	<p>El mantenimiento en esta propuesta es prácticamente nulo, se debe controlar que no se generen obstrucciones en el desbastador y en caso de producirse ciertas algas o boras se debe retirar manualmente.</p>	<p>Esta propuesta genera el mantenimiento más complejo ya que se debe controlar que el agua que ingrese al humedal contenga la menor cantidad de sólidos flotantes que puedan ocasionar obstrucciones en el humedal, también se debe hacer un resembrado de macrófitas en el sustrato del humedal cada vez que este lo requiera, a su vez se debe hacer un dragado de los lodos que pudieran generarse en la laguna de maduración cuando lo requiera.</p>	<p>El mantenimiento en esta propuesta es prácticamente nulo, se debe controlar que no se generen obstrucciones en el desbastador y en caso de producirse ciertas algas o boras se debe retirar manualmente.</p>

Cont.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Operatividad	<p>El manejo de esta propuesta es muy sencillo, llegando a ser auto gestionable en su proceso de operación en una gran parte del tiempo. La desventaja de esta propuesta es que una vez que se necesite hacer un mantenimiento en las lagunas maduración, el proceso de tratamiento del agua debe interrumpirse.</p>	<p>El manejo de esta propuesta es muy sencillo, llegando a ser auto gestionable en su proceso de operación en una gran parte del tiempo. La desventaja de esta propuesta es que una vez que se necesite hacer un mantenimiento correctivo ó preventivo en el sistema de depuración, el proceso de tratamiento del agua debe interrumpirse.</p>	<p>Esta propuesta es la más versátil desde el punto de vista operativo, ya que si una serie de lagunas tendría que paralizarse por un mantenimiento preventivo, correctivo ó por la ocurrencia de un evento extremo, la otra serie de lagunas que se encuentra en paralelo a ellas podría asumir el 100% de la carga hidráulica generada por el afluente, además de que si ambas series de lagunas trabajan en paralelo poseerán una mayor capacidad para recibir una carga hidráulica superior a la actual.</p>
Costo	<p>Es la propuesta que genera menores costos de construcción ya que es la que requiere menor superficie de construcción.</p>	<p>Esta propuesta es la que genera los mayores costos de construcción debido a que es la que abarca la mayor área superficial y necesita un material granular muy específico para la elaboración del sustrato de los humedales.</p>	<p>El costo de esta propuesta está ligado directamente al área superficial que ocupa, no requiere ningún material granular específico para su construcción lo que lo hace mucho más económico que la propuesta 2 y un 100% más costoso que la propuesta 1.</p>

Fuente: Propia.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Caracterizar el afluente, ubicado en la UD-298 de Ciudad Guayana, en la margen izquierda del Lago de Macagua.

La caracterización del afluente fue lograda mediante procedimientos realizados en campo y mediciones hechas in situ, posteriormente se realizaron ensayos de las muestras del efluente, las cuales se llevaron a cabo en el laboratorio ingeniería sanitaria de la UCAB Guayana. Los resultados obtenidos nos permitieron saber hasta cierto punto el nivel de contaminación existente en dicho afluente, y posteriormente comparar sus características con lo expresado en la norma. (Ver tabla. 34).

De los ensayos se pudo observar cambios a lo largo del cauce de los valores de la DBO_5 y de los coliformes fecales, aunque en el punto #2 se presenta la unión entre un vertido de aguas servidas proveniente de las comunidades aledañas y el cauce natural, los valores de coliformes fecales y DBO_5 disminuyen en vez de aumentar, cabe destacar que entre el cauce natural y el vertido de aguas servidas los lugareños de manera intuitiva utilizaron este espacio para el bote de escombros: rocas, arenas, restos cerámicos, productos de las actividades de construcción, con la finalidad de controlar el aumento de las dimensiones de la cárcava formada en esta zona. Esto trajo como consecuencia que el vertido de aguas servidas tuviera que pasar por una serie de estratos formados por las arenas y escombros antes de unirse al cauce natural, otra consecuencia de gran importancia que se generó por esta medida, fue que se logró controlar casi en su totalidad los malos olores producidos por las aguas servidas y se evidencio una disminución considerable de DBO_5 y coliformes del punto #2 con respecto al punto#1.

Basándonos en lo investigado en la bibliografía y en lo observado en campo se puede decir que el comportamiento del flujo entre el vertido de aguas servidas y el cauce natural, pasa de ser de flujo superficial a ser de flujo subsuperficial, y de esta forma se puede decir que se comporta como un humedal de flujo subsuperficial sin la presencia de macrófitas, donde el sustrato actúa como un filtro biológico, donde se forma colonias bacterianas que contribuyen con el tratamiento y mejora de la calidad de agua del vertido antes de incorporarse al cauce natural. Una vez incorporado el vertido de aguas servidas al cauce natural en el punto #2, se ven modificadas las características fisicoquímicas y biológicas del agua, ya que es sometida a un proceso de dilución generado por la unión de los dos cuerpos de aguas, por esto se observa una disminución considerable de la DBO₅.

Analizar el nivel de contaminación del afluente, según las características fisicoquímicas y biológicas que posea él mismo, y compararlas con los parámetros físico-químicos y biológicos establecidos en el Decreto 883.

Los valores obtenidos de los ensayos fueron comparados con los parámetros establecidos por el Decreto 883 “NORMAS PARA EL CONTROL DE LA CALIDAD DE LOS CUERPOS DE AGUA”.

De esta forma se logró evidenciar el problema de contaminación existente en dicho afluente, donde se logra apreciar que los valores obtenidos de la DBO₅ y coliformes fecales se encuentran fuera de los valores y rangos establecidos por la norma, y de esta manera se determinó que la principal fuente de contaminación del afluente son los coliformes fecales (Ver tabla. 34).

De los otros parámetros evaluados se pudo observar que los resultados de los sólidos disueltos son mucho mayores a los sólidos suspendidos, pudiendo indicar la presencia de sales inorgánicas, ácidos y bases disueltas como fosfatos, nitritos, nitratos y otros metales pesados que son indicativos de contaminación en el agua. La magnitud de los

sólidos disueltos se encuentra directamente relacionada con la alta conductividad que posee el agua en las tres zonas de toma de muestras.

Evaluar los distintos métodos y procesos de tratamientos biológicos de afluentes naturales, de bajo impacto ecológico y que se adapten al afluente.

Luego de realizar la investigación bibliográfica se logró resumir y sintetizar información de diversos autores, para así definir los procesos y mecanismos que puedan depurar el afluente y se ajusten de mejor manera al entorno del mismo.

Dentro de los mecanismos y procesos escogidos se encuentran los humedales artificiales, los cuales se subdividen en: humedales de flujo horizontal y humedales de flujo vertical. Otro de los métodos planteados para la purificación de las aguas residuales es el método del lagunaje, este método se subdivide en: lagunas anaerobias, lagunas facultativas, aerobias y de maduración. Los mecanismos desarrollados en la investigación, se caracterizan por poseer procesos de bajo impacto biológico y fueron comprados por sus condiciones, características y rendimientos. De la utilización de algunos de estos métodos o de la combinación de los mismos mencionados anteriormente se realizó la propuesta.

Elaborar una propuesta con los distintos métodos, procesos y/o estructuras, que permitan mitigar los niveles de contaminación presentes en las aguas del afluente y adaptarlas a los parámetros establecidos en el Decreto 883.

Las distintas propuestas planteadas tuvieron como propósito principal, la reducción de la DBO₅ y de los coliformes fecales, ya que estos valores se encuentran por fuera de lo establecido por la norma. En base al diagnóstico realizado de las características del afluente y comparándolo con la bibliografía investigada, se logró observar que los humedales de flujo subsuperficial horizontal y las lagunas de maduración son los métodos que mejor se adaptan a la problemática actual.

La propuesta 1 consistió en un sistema que permite disminuir los organismos patógenos de una forma más económica ocupando el menor espacio posible, esta alternativa ofrecería valores de DBO₅ y coliformes fecales que logran situarse por debajo de lo establecido en el Decreto 883 en un 99,63% y 13,82% respectivamente.

Para la propuesta 2, se pensó en un sistema más versátil, con la eliminación de una laguna de maduración y la inclusión de dos humedales de flujo subsuperficial horizontal en paralelo, que además de eliminar coliformes y DBO₅, también pudiera disminuir niveles de metales pesados. Este sistema ofrece niveles de DBO₅ y de coliformes fecales por debajo de lo permitido en la norma y con la inclusión de humedales de flujo subsuperficial se disminuye la proliferación de zancudos y otros insectos. Esta propuesta ofrece la mejor calidad de agua del afluente en comparación con la propuesta 1 y 3, con la misma se logra establecer valores por debajo de lo requerido en el Decreto 883 para los parámetros de DBO₅ y coliformes fecales en un 99,67% 22,37% respectivamente.

Con la propuesta 3 se pretende aumentar la capacidad de recepción del caudal a tratar en un 100% en comparación con la propuesta 1; permitiendo una mejor maniobrabilidad del flujo ante la presencia de un evento extremo como una creciente máxima probable que ocasione un aumento del caudal del río o simplemente la ocurrencia de un mantenimiento preventivo o correctivo de alguna de las Lagunas sin la interrupción del tratamiento del afluente, este sistema ofrece porcentajes de reducción de DBO₅ y coliformes fecales que logran situarse por debajo de lo establecido en el Decreto 883 en un 99,63% y 13,82% respectivamente.

La tabla comparativa de la propuesta final se realizó con la finalidad de que el ente encargado de ejecutar cualquiera de estas propuestas seleccione la más acertada de acuerdo a las prioridades, necesidades y limitaciones que se presenten en dicha comunidad al momento de ejecutar la obra.

RECOMENDACIONES

- Realizar estudios hidrológicos del efluente para conocer su comportamiento en las distintas épocas del año y obtener valores del periodo de retorno y la creciete máxima probable con el fin de diseñar sistemas que se adapten a este tipo de eventos.
- De tomarse la propuesta 1 y 3, se deberán realizar trabajos de desmalezamiento para evitar la proliferación excesiva de zancudos e insectos que puedan afectar a las comunidades de personas cercanas. Después de 8 a 10 años realizar estudios de batimetría para conocer el nivel de los lodos y realizar mantenimiento con un dragado.
- De tomarse la propuesta 2, los humedales artificiales deberán estar aislados de animales que empleen las especies vegetales como alimento, también se debe evitar que las ramas secas y vegetales muertos caigan sobre el sustrato por lo que se debe hacer manteniendo periódicamente, también se debe evitar pisar el sustrato para impedir su compactación y disminuir su conductividad.
- Realizar estudios más avanzados del sistema que se generó en el punto #2 con la finalidad de documentar el funcionamiento de la estructura del mismo.
- Rediseñar y construir una estructura en el punto #2, con un sustrato que posea una granulometría más uniforme y de forma agavionada para que le dé mayor soporte a la estructura, con la finalidad de producir un flujo más uniforme donde se puedan producir procesos de purificación del agua y que permita la reducción de olores.
- De seleccionarse la propuesta #1 o #3, se recomienda desarrollar actividades de piscicultura en las dos lagunas secundarias, con la finalidad de integrar a la comunidad con el sistema depuración de agua.

BIBLIOGRAFÍA

APHA, AWWA, WPCF. (1995). *Standard method for the examination of water and wastewater*. (19th Edition). Washintong, D.C, United States.

Araujo D. y Araujo Y. (2011). Alternativas para el manejo de las aguas residuales municipales en la parroquia La Puerta, Municipio Valera, edo. Trujillo. Tesis de ing. Agrícola, Universidad de los Andes, ULA, Mérida, Venezuela.

Boccalon, Adriana (2001). *El nivel de contaminación acelera el proceso de envejecimiento en las aguas del embalse*. Bolívar, Venezuela. Disponible en: <http://www.analitica.com/info/2621098.asp>.

CENTA (Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua de Sevilla); secretariado alianza por el agua/ ecología y desarrollo (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*, Sevilla, España.

Crites & Tchobanoglous (2000). *Tratamiento de Agua Residuales en pequeñas poblaciones*. Mc Graw-Hill.

FONDONORMA. *Norma Venezolana Aguas naturales, industriales y residuales. Definiciones COVENENIN 2634:2002 (1ra. Revisión)*. Caracas, Venezuela.

Global wáter watch, international center for aquaculture and acuatic environment, México. Disponible en: <http://www.globalwaterwatch.org/MEX/MXesp/MXInfoBasicaParametrosSp.aspx>.

Mendez, M. (2009). *Elementos de Hidráulica de canales*. (2^{da} ed.) Caracas, Venezuela: Publicaciones UCAB.

Mendoça, R (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización (como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío)*. Colombia: Mc Graw- Hill.

Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales (Tratamiento, Vertido y Reutilización)*. Madrid: Mc Graw- Hill.

Normas Venezolanas para el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua, Decreto 883. Caracas, Venezuela.

Normas sanitarias para proyecto, construcción, reparación, reforma y mantenimiento de edificaciones, decreto 4044. Caracas, Venezuela.

Oscar Delgadillo, Alan Camacho, Luis F. Pérez y Mauricio Andrade (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia.

Roa Marquez, J.A. (2001). *Fundamentos básicos de los procesos ambientales para ingenieros*. (1ra ed.) San Cristóbal, Venezuela: fondo Editorial Unet.

Rodriguez, J. (2010). *Neutralización de los vertidos líquidos residuales. Caso: área de análisis de hierro total y metálico del laboratorio de la empresa Orinoco Iron*. Trabajo de grado de Ingeniero Industrial, Universidad Nacional Experimental de Guayana. Bolívar, Venezuela.

Rojas de Narvaez, Rosa. (1997). *Orientaciones prácticas para la elaboración de informes de investigación*. (2^{da} ed.). Puerto Ordaz, Venezuela: Ediciones UNEXPO.

Sabino, C. (1992). *El proceso de investigación*. (1ra ed.). Caracas, Venezuela: Ed. Panapo.

Santallla, Z. (2011). *Guía para la elaboración formal de reportes de investigación*. Caracas: publicación UCAB.

Seijas Antonio. (2014). *Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, Ensayo de coliformes. Guayana, Venezuela.*

Seijas Antonio. (2014). *Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, Ensayo de DBO₅. Guayana, Venezuela.*

Seijas Antonio. (2014). *Manual de prácticas de laboratorio de ingeniería sanitaria, Universidad Católica Andrés Bello-Guayana, Ensayo de Sólidos. Guayana, Venezuela.*

Silva M, Jesus. (2006). *Metodología de la investigación*. Caracas, Venezuela: Ediciones CO-BO.

Valarino, Elizabeth. (2010). *Metodología de la investigación: paso a paso*. Trillas, México.

ANEXOS

ANEXO 1.

Memoria fotográfica del cauce natural.



Anexo 1.1. PTO #1
Fuente: Propia.



Anexo 1.2. PTO #2 del cauce
Fuente: Propia.



Anexo 1.3. PTO #3 del cauce
Fuente: Propia.



Anexo 1.4. Unión entre colector de aguas residuales y el cauce natural
Fuente: Propia.



Anexo 1.5. Sector aguas abajo de bote de escombros del PTO #2
Fuente: Propia.



Anexo 1.6. Toma de muestras
Fuente: Propia.

ANEXO 2.

Memoria fotográfica de ensayo de DBO5.



Anexo 2.1. Ensayo del DBO_5
Fuente: Propia.



Anexo 2.2. Preparación del inóculo
Fuente: Propia.

ANEXO 3.

Memoria fotográfica de ensayo de coliformes totales y fecales.

Combinación de tubos Positivos	NMP/ 100 ml	95% de Confianza	
		Inferior	Superior
0-0-0	< 3		
0-0-1	3	<0,5	9
0-1-0	3	<0,5	13
1-0-0	4	<0,5	20
1-0-1	7	1	21
1-1-0	7	1	23
1-1-1	11	3	36
1-2-0	11	3	36
2-0-0	9	1	36
2-0-1	14	3	37
2-1-0	15	3	44
2-1-1	20	7	89
2-2-0	21	4	47
2-2-1	28	10	150
3-0-0	23	4	120
3-0-1	39	7	130
3-0-2	64	15	380
3-1-0	43	7	210
3-1-1	75	14	230
3-1-2	120	30	380
3-2-0	93	15	380
3-2-1	150	30	440
3-2-2	210	35	470
3-3-0	240	36	1300
3-3-1	460	71	2400
3-3-2	1100	150	4800
3-3-3	≥2400		

Anexo 3.1. NMP y límites de confianza 95% para varias combinaciones de resultados positivos cuando se usan diluciones de 10 ml, 1ml y 0,1 ml. Para tres tubos de dilución.

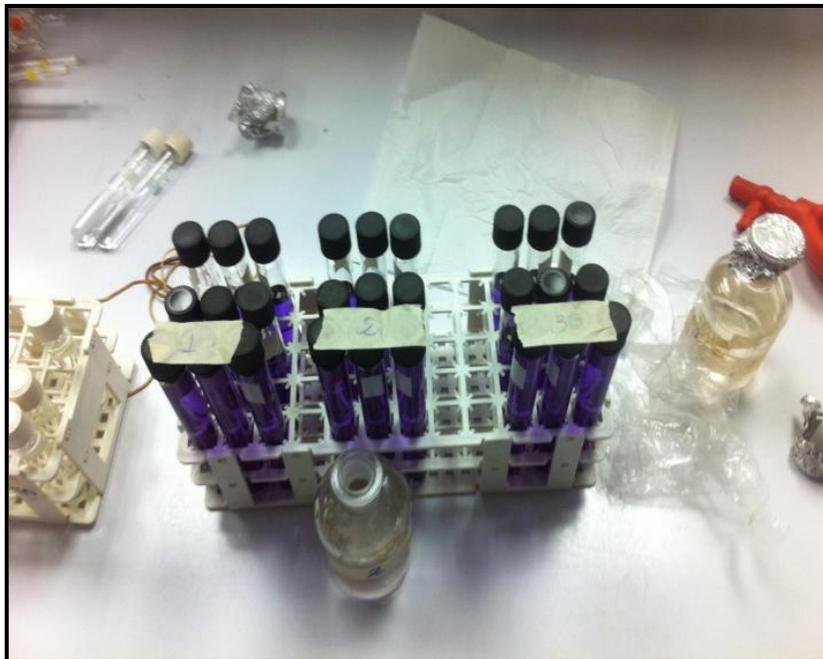
Fuente: APHA 1996

NOTA: Esta tabla se puede utilizar para diluciones $\geq 0,1$ - 0,01 - 0,001, el resultado del NMP de la tabla se multiplica por la penúltima dilución.



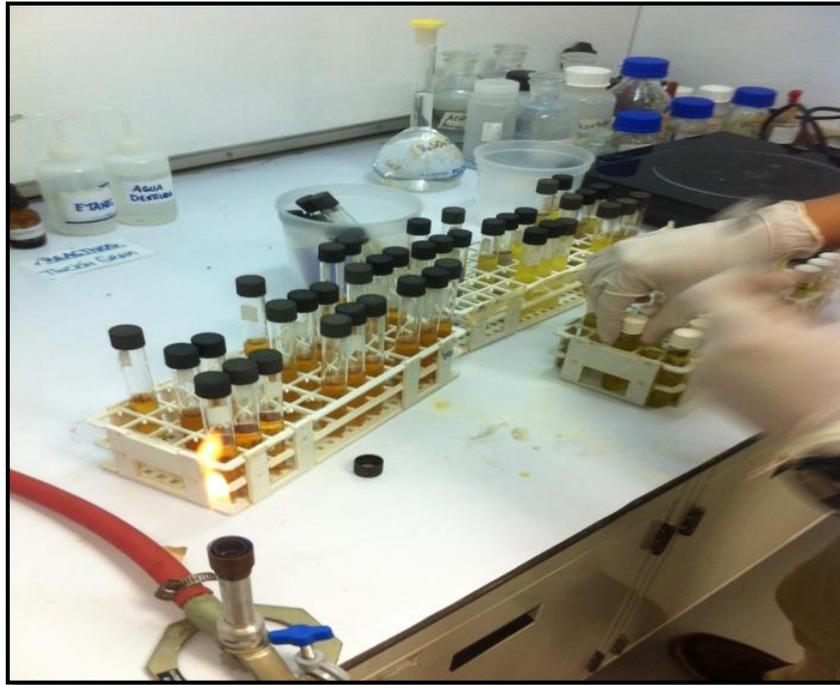
Anexo 3.2. Muestras del afluyente

Fuente: Propia.



Anexo 3.3. Evaluación de pruebas presuntivas de ensayo coliformes totales

Fuente: Propia.



Anexo 3.4. Evaluación de pruebas confirmativas de ensayo coliformes fecales

Fuente: Propia.

ANEXO 4.

Memoria fotográfica de ensayo de Sólidos.



Anexo 4.1. Determinación de peso de los instrumentos para ensayo de sólidos totales

Fuente: Propia.



Anexo 4.2. Preparación de filtros con la muestra para el ensayo de sólidos totales

Fuente: Propia.



Anexo 4.3. Introducción de muestras al horno

Fuente: Propia.

ANEXO 5.

Memoria fotográfica de ensayo de Nitritos y Nitratos.



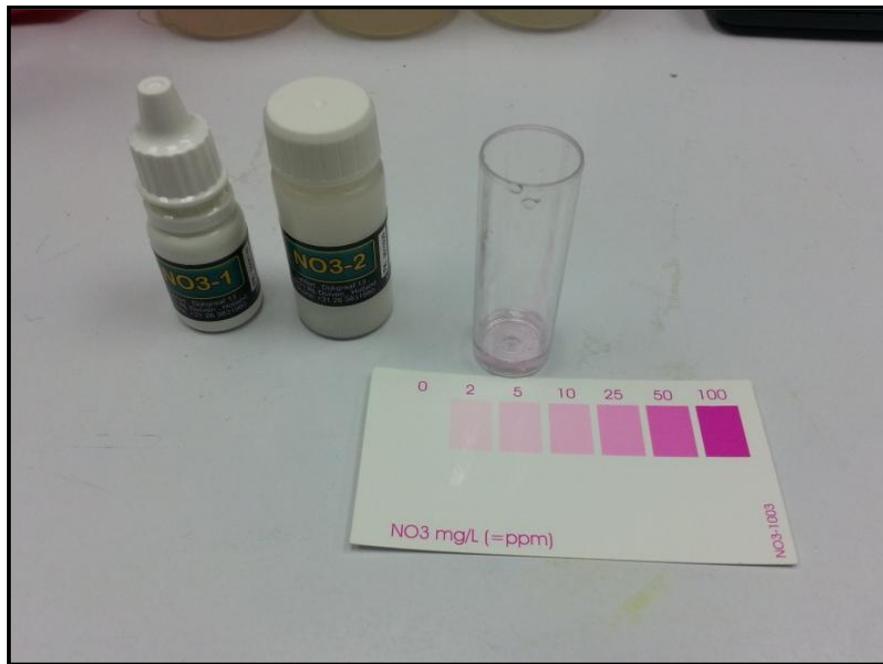
Anexo 5.1. Ensayo de nitritos

Fuente: Propia.



Anexo 5.2. Evaluación de resultados de ensayo de nitritos

Fuente: Propia.



Anexo 5.3. Evaluación de resultados de ensayo de nitratos

Fuente: Propia.

ANEXO 6.

Elaboración de cálculos. (Software: Microsoft Excel).

caracterizacion del efluente - Microsoft Excel

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1												
2	MODIFICABLE		NO MODIFICABLE									
3												
4	DATOS DE LAGUNA DE MADURACION						Diseño y Eficiencia de Laguna de maduración					
5							Cantidad probables de lagunas	1.97	2			
6	Largo (m)			384.7045899			Área de lagunas (m ²)	73998.81				
7	Ancho (m)			192.3522946			Eficiencia (%) de reduccion de DBO 5,20	94.38				
8	Area (m2)			73998.81051			Eficiencia (%) de reduccion de Coliformes	99.11			% Por debajo de la norma	
9	h(m)			1			Concentración de DBO5 en el efluente (mg/l)	0.22	CUMPLE		99.64	
10	"Ra" Proporción Long/ancho. 2:1			2			Concentración de CF en el efluente del sistema (CF/100 ml)	861.77	CUMPLE		13.82	
11	Vol (m3)			73998.81051								
12	Temperatura (°C)			29								
13	Tiempo de retención (días)			9								
14	Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)			12.44216626								
15	Coefficiente de velocidad de remoción de DBO5 (días ⁻¹)			1.865184771								
16	Coliformes fecales de entrada (NMP/100ml)			11000000								
17	Coliformes fecales de salida (NMP/100ml)			1000								
18	Concentración de DBO5 (mg/l)			68.36								

Anexo 6.1. Cálculos de la propuesta #1

Fuente: Propia.

caracterizacion del efluente - Microsoft Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1										
2				MADURACION - HUMEDAL						
3										
4	MODIFICABLE		NO MODIFICABLE							
5										
6	DATOS DE LAGUNA DE MADURACION						Diseño y Eficiencia de Laguna de maduración			
7							Cantidad probables de lagunas	1.93	1	Nro Lagunas
8	Largo (m)			405.514243			Área de lagunas (m ²)	82220.90		
9	Ancho (m)			202.757121			Eficiencia (%) de reduccion de DBO 5,20	94.91		
10	Area (m2)			82220.9006			Eficiencia (%) de reduccion de Coliformes	99.20		
11	h(m)			1			Concentración de DBO5 en el efluente (mg/l)	3.48	CUMPLE	
12	Vol (m3)			82220.9006			Concentración de CF en el efluente del sistema (CF/100 ml)	87704.15	NO CUMPLE	
13	"Ra" Proporción Long/ancho. 2:1			2						
14	Temperatura (°C)			29						
15	Tiempo de retención (días)			10						
16	Coefficiente de velocidad de remoción de coliformes (días ⁻¹)			12.4421663						
17	Coefficiente de velocidad de remoción de DBO5 (días ⁻¹)			1.86518477						
18	Coliformes fecales de entrada (NMP/100ml)			11000000						
19	Coliformes fecales de salida (NMP/100ml)			1000						
20	Concentración de DBO5 (mg/l)			68.36						

Anexo 6.2. Cálculos de la propuesta #2

Fuente: Propia.

caracterización del efluente - Microsoft Excel

Diseño de humedal de flujo Subsuperficial Horizontal

$d_w =$	0.9	$n =$	0.35	MODIFICABLE		NO MODIFICABLE	
Temp=	29	$Q (m^3/día) =$	8222.09006				
Porosidad (n)=	0.38	Rae	2				
Pendiente % =	0.5	DBO Afluentemg/l =	3.48	Coliformes Afluyente NMP/100ml =	87704.15		
$k_s m/s =$	0.11574074						

Sustrato	tamaño efectivo d_p, mm	Porosidad efectiva n
Arena (media)	1	0.3
Arena (grueso)	2	0.32
Arena con grava	8	0.35
Grava (media)	32	0.4
Grava (grueso)	128	0.45

Unidad	DBO	Ec.	Coliformes	Ec.
-	kt= 1.865184771	Ec. 7	12.44216626	Ec. 8
días	t= 9	Ec. 9	9	Ec. 9
m ²	As= 117458.4294	Ec. 10	117458.4294	Ec. 10
m	W= 242.3411123	Ec.11	242.3411123	Ec.11
m	L= 484.6822245	Ec.12	484.6822245	Ec.12

Concentración Final de Coliformes en NMP/100 ml	776.283753	% Por debajo de Norma	22.37162466
Eficiencia de remoción de coliformes (%)	99.1148836		
Concentración Final de DBO5 (mg/l)	0.19557088		99.67404853
Eficiencia de remoción de DBO5 (%)	94.3778099		

Anexo 6.3. Cálculos de la propuesta #3
Fuente: Propia.